《新能源汽车动力电池用气凝胶隔热片》

团体标准编制说明

（征求意见稿）

标 准 编 制 组

2025 年 9 月

团体标准《新能源汽车动力电池用气凝胶隔热片》

编　制　说　明

一 工作简况

（一）任务来源

中国汽车工业协会于2025年2月12日下达了2025年第一批协会标准制修订计划的通知，《新能源汽车动力电池用气凝胶隔热片》计划号2025-12，牵头起草单位国检测试控股集团南京国材检测有限公司，项目周期12个月。

（二）工作过程

新能源汽车动力电池气凝胶隔热片是我国当前新能源汽车动力电池安全问题的关键材料，国家标准GB38031-2025《电动汽车用动力蓄电池安全要求》的实施，对新能源汽车动力电池提出了不起火不爆炸的要求，使得车企以及上游电池组装厂对动力电池热管理尤为重视，也促进了我国新能源汽车动力电池热管理技术和材料取得了显著的进步。

为了争取更长的逃生时间、控制热失控时不起火不爆炸，电池组内通常在单体电芯之间放置隔热片，来延缓或阻断单体电芯热失控向整个电池系统的扩散。气凝胶相比于其他材料具有导热系数低、超疏水、阻燃、使用温度范围广、寿命长、抗压、无毒等优点，与传统保温隔热材料相比，同等隔热效果下气凝胶材料厚度更薄。另外可供定制的封装工艺和边框也使气凝胶隔热片可以满足具有不同电芯封装工艺的性能和结构需求。因此，气凝胶隔热片由于其成熟稳定的工艺、优秀的性能以及定制化的产品服务，在隔热材料中的应用比例得到进一步提高。

目前，行业存在测试方法不统一、数据没有可比性的问题，应用企业根据生产企业提供的数据无法判断隔热片性能优劣，造成选材到装机验证的过程复杂、延缓电池热管理系统研发迭代，也造成验证成本的增加。因此，为了保障气凝胶隔热片产品质量，提高产品一致性和性能可比性，需要对气凝胶隔热片制定统一的标准进行评价，使隔热片测试有标可依，促进行业健康发展。鉴于上述情况，国检测试控股集团南京国材检测有限公司向中国汽车工业协会申请立项研制《新能源汽车动力电池用气凝胶隔热片》团体标准。

任务下达后，起草单位组织具有多年生产、测试和标准化经验的技术人员组成标准起草小组，调研国内外先进的测试方法和设备，走访生产企业、电池组装企业、新能源车企、高校院所，充分了解我国气凝胶隔热片的发展分支路线和性能参数、应用单位的测试方法、指标要求和方法制定依据等信息，经过对标准涉及方法的可行性论证后形成标准草案。

2025 年 3 月 18 日，标准编制组在南通市崇川经济开发区组织召开了标准启动会。来自上汽研究总院、上汽时代、泛亚、蜂巢能源、欣旺达动力等应用单位、生产企业以及相关单位的 70 余名代表参加了本次会议。会议确定了标准编制的计划进度，并对草案的各项内容进行认真的讨论和修改，确定了标准的适用范围、产品分类、试验方法及需要进行验证试验的检测项目。

图 1 标准启动会议照片

国检测试控股集团南京国材检测有限公司

关于成立《新能源汽车电池用气凝胶隔热片标准》标准编制工作组的通知

公司各部门：

经中国汽车工业协会批准，团体标准《新能源汽车电池用气凝胶隔热片标准》（标准编号：2025-12）已立项。为了切实做好标准编制工作，确保团体标准编制工作质量，根据公司标准化工作要求，决定成立《新能源汽车电池用气凝胶隔热片标准》内部编制工作组，负责标准编制、验证试验、技术研讨和意见反馈等具体任务。工作组人员分工如下：

序号	姓名	部门	职责
1	左进鹏	标准认证中心	项目负责人，撰写标准文本，编制说明，负责数据归纳分析，负责电学和阻燃热冲击性能指标的验证试验，负责自研设备的合作开发
2	张剑红	总工办	标准技术层面审核把关
3	吴永坤	标准认证中心	统筹标准研制进度，标准文本材料审核把关
4	黄晨	绝热材料测试中心	负责尺寸、密度、吸湿率和尺寸稳定性指标的验证试验和方法可行性论证
5	张坤馆	绝热材料测试中心	负责压缩性能和界面强度指标的方法研究、验证试验和方法可行性论证
6	潘阳	绝热材料测试中心	负责垂直燃烧和常温热阻指标的验证试验，负责老化试验过程监控
7	闫慧峰	绝热材料测试中心	负责高温导热系数指标的验证试验，协同自研设备的开发
8	万泽韬	化学测试中心	负责公司有能力的禁限用物质部分验证试验和方法可行性论证

工作组成员在不影响日常工作的前提下，按照项目负责人要求的时间节点完成标准编制和验证试验工作，标准发布后工作组按照成员参与度分配成果

国检测试控股集团南京国材检测有限公司

2025 年 03 月 25 日

图 2 标准编制组成立公文

启动会结束后，2025-3-25 日牵头单位以公司发文的形式正式成立内部标准起草标准编制组，明确标准编制组成员的分工安排。标准编制组收集具有代表性企业的产品进行验证试验；研究国内外标准。此外，起草小组还走访了国内具有规模和代表性的企业和技术专家交流和讨论。在验证试验和第三稿草案完成后，于 2025 年 8 月 29 日通过线上线下同时进行的方式召开了第二次工作会议。此次会议共邀请 20 家相关单位，包括上海汽车集团股份有限公司创新研发院、泛亚汽车技术中心有限公司、上汽时代动力电池系统有限公司、欣旺达电子股份有限公司等应用单位，南京工业大学、中国汽车工程研究院股份有限公司等科研单位。会议上，标准编制组成员依据收集的数据和验证试验结果，讨论各项性能的指标要求。会议主要意见集中在未进行验证试验的尺寸密度参数指标以及部分试验方法描述上。会后，标准编制组根据会议讨论结果修改草案，并就关键试验方法与业内专家多次进行讨论磋商，最终形成标准征求意见稿。

二 标准编制原则

1、与相关法律、法规、强制性标准等协调一致。

2、根据我国现有产品情况、应用要求、国际和国内相近产品标准要求进行制定，确保标准指标准确合理，与现有标准体系协调一致。

3、标准结构、格式和表达方式等按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写规则》、GB/T 1.2-2020《标准化工作导则 第二部分：标准中规范性技术要素内容的确定方法》和 GB/T 20001.10-2014《标准编写规则 第 10 部分 产品标准》的规定进行编写。

三 标准主要内容

3.1 标准名称说明

标准名称为新能源汽车动力电池用气凝胶隔热片，英文名称为Aerogel insulation sheets for power batteries of new energy vehicles。标准名称使用产品标准一般所属领域加标准化对象的格式，明确应用领域为新能源汽车动力电池，标准化对象为气凝胶隔热片。

关于适用电池种类的说明：经过调研，了解到我国新能源电池的发展方向大致分为几条关键的技术路线，分别是磷酸铁锂和三元锂等锂离子电池、固体硫化物的固态电池、钠离子电池等其他金属系电池以及燃料电池等，虽然现在隔热片主要应用于锂离子电池，但是其他种类电池也有应用需要，因此将标准范围扩大到新能源汽车用，而不是仅适用于锂离子电池。标准名称中明确了动力电池，因为储能电池也为新能源电池中占比较大的一种分类，即使隔热片也可以应用于储能电池，但是由于关键指标和性能的要求差异较大，不适合以一项标准做全面规定，所以标准范围限定了动力电池用。

标准化对象气凝胶隔热片指出了隔热片的芯材为气凝胶材料，测试对象为经过封装后的成品隔热片，与标准范围中适用于封装后的隔热片对应。

3.2 标准范围说明

标准的范围为：本标准规定了新能源汽车动力电池用气凝胶隔热片（以下简称气凝胶隔热片）术语定义、产品分类、指标要求、测试试验方法、检验规则以及储运的要求。本标准适用于经过封装的新能源汽车动力电池电芯间的气凝胶隔热片的性能测试。未经封装的气凝胶隔热片也可参考采用。

标准的适用范围明确了标准的主要技术内容、适用场景和补充说明：

标准的主要技术内容涵盖气凝胶隔热片术语定义、分类要求、指标要求、测试方法，构成了产品标准的主要要素。能够做到通过标准提供统一的测试方法，用代表当前我国国产产品的一般水平的指标进行判定，以定义的关键术语进行交流，满足供需双方的要求。

适用场景是用于隔热片性能检测，主要适用对象为气凝胶隔热片全产业链检测人员、生产企业和应用企业技术研究人员，作用对象明确。

补充说明内容是未经封装的气凝胶隔热片也可参考采用，主要考虑到目前的隔热片产品生产过程中一般由气凝胶生产企业提供芯材给隔热片封装企业作为原料，封装主要改变的是隔热片的机械性能、电性能和抗火焰冲击性能，对于隔热性能、导热性能等其他标准测试项目来说芯材和封装产品采用同一种方法仍具有适用性，而且芯材作为隔热片性能的主要贡献结构部分，封装制品的大多数性能可以通过测试芯材得到反馈。另一方面，随着隔热片芯材气凝胶产品的技术进步和电池封装技术发展，没有外覆层的陶瓷纤维气凝胶纸也可以作为成品直接使用，为了防止标准的实施给此类产品的发展带来阻碍，本标准对于标准的适用对象做开放处理，规定部分标准方法芯材也可适用，在标准检验规则一章提供了对于不同分类和是否封装的产品不同的试验项目要求，给原料和半成品供需双方提供检测依据，增加标准对气凝胶隔热片的适用性。

3.3 规范性引用文件说明

本标准的规范性引用文件包括基础标准、方法标准和产品标准，具体情况如下：

1)基础标准有 GB/T 191 包装储运图示标志、GB/T 4132 绝热材料及相关术语；

2)方法类标准有GB/T 1695 硫化橡胶 工频击穿电压强度和耐电压的测试方法、GB/T 2408 塑料 燃烧性能的测定 水平法和垂直法 、GB/T 2792 胶粘带剥离强度的试验方法、GB/T 5480 矿物棉及其制品试验方法、GB/T 10294 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法、GB/T 10295 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 热流计法、GB/T 30512 汽车禁用物质要求 GB/T 31838.2 固体绝缘材料 介电和电阻特性 第2部分：电阻特性(DC方法) 体积电阻和体积电阻率等；

3)产品类标准有GB/T 34336 纳米孔气凝胶复合绝热制品、GB/T 16491 电子式万能试验机、GB/T 16839.2 热电偶 第2部分:允差、JB/T 6412 排风柜。

本标准的引用文件均为我国现行有效的国家标准和行业标准。为了提高本标准与现行标准体系的协调性，对于标准化水平较为成熟的测试项目，经过调研方法适用对象验证试验参数合理性后，标准编制组尽可能选择适用的国家标准方法或先进国际标准转化成的国家标准，并通过规定试样状态和测试环境等影响因素保证测试方法的可靠性和重复性。在发现某种测试具有

多种具有相似性的国家标准方法时，标准编制组首先采用适用范围与气凝胶隔热片类型接近的，如测试电性能就选择绝缘材料的测试方法，部分方法的适用范围与本标准有差别时，标准编制组会通过以气凝胶隔热片产品的验证试验来分析标准方法的可行性。为了使标准方法更适合气凝胶隔热片产品减少直接引用国标造成的测试预实验工作量大的问题，标准编制组通过验证试验得出标准中最适合的试验参数，并将这些参数固定到标准方法中，使本标准的可操作性和实用性更高，减少测试过程中预实验选择试验参数的试错次数，增加不同实验室的数据可比性。为了解决试验装置的精密度和设计差异性，增加了关于试验机、热电偶和通风橱的要求，并按照相关标准进行规范。

在规范性引用文件格式和规范性上，标准编制组进行多次审查。经过前后排序格式和引用情况检查，引用文件编号排序和引用频次均满足 GB/T 1.1 的要求。经过查询引用文件最新版本情况，未发现已废止的标准，所有标准均为有效标准。经核对文本中引用情况，未发现实际引用没有填写到规范性引用文件列项中的标准。

3.4 术语和定义说明

本标准的术语定义是 GB/T 4132 和 GB/T 34336 界定的部分术语与新定义的术语两部分组成。其中 GB/T 4132 为绝热材料及相关术语，GB/T 34336 为气凝胶的产品标准，是本标准主要的芯材术语和绝热测试相关术语的来源。其他新定义的术语包含三部分:

第一部分为产品定义，明确了气凝胶隔热片的产品状态和用途。

第二部分为厚度名词定义，考虑到实际使用过程中，不同单位声称的厚度往往存在歧义，对于测试厚度时的测试压力均有不同的方法，导致以厚度为参数的其他试验也出现系统性的偏差，影响了数据可靠性。标准编制组根据从隔热片供货出厂到电池可能发生热失控产生形变和放热过程中隔热片的承压情况定义了隔热片的厚度术语，包括气凝胶隔热片在未承受压力或承受极小压力情况下，接近自然状态的厚度值-零载厚度；气凝胶隔热片处于正常封装状态的一般压力值下的厚度值-封装厚度；气凝胶隔热片在承受模拟热失控电芯膨胀压力时出现结构性破坏的厚度值-损坏厚度；气凝胶隔热片在承受模拟热失控电芯开阀泄压前最大压缩量时的厚度值-开阀厚度。明确了测试和交流中关于气凝胶柔性材料厚度的问题，避免因测试厚度问题导致的数据偏差。

第三部分为方法释义，将描述隔热片最直接的冷热面温差试验定义为热冲击防护性能，主要考虑到在电池发生热失控时电芯的外壳会发生变形，使隔热片承受较大的压力，同时由于热失控反映释放大量热量，导致隔热片在较短的时间内承受骤然增大的高温高压，经过讨论，标

准编制组将这种状态定义为热冲击状态。此外，因为隔热片在动力电池热失控控制过程中起到的是防护背温侧未发生热失控电芯的作用，所以将气凝胶隔热片的防护性能定义为热冲击防护性能。本标准通过完善一般热台法的测试参数和测试过程以期达到更好测试精密度的效果，提高测试的重复性和应用单位认可度。

3.5 产品分类说明

本标准的产品分类依据是按照芯材的种类区分，分为玻璃纤维复合气凝胶（FG）、陶瓷纤维复合气凝胶（CF）、预氧丝复合气凝胶（PF）以及其他气凝胶（OF）。

标准编制组做过分类计划和考虑如下：

1）按照电池类型分，如磷酸铁锂电池用、三元锂离子电池用等。经过分析，认为电池种类太多，且电池技术还在快速发展，可能存在由于新电池技术出现使标准出现时效性差问题。

2）按照使用温度分，如使用温度 500℃~600℃为 1 类气凝胶隔热片、使用温度 600℃~800℃为 2 类气凝胶隔热片等。依据热失控温度来分级是一个复杂的过程，在实际模拟电芯热失控时，由于热失控温度实际是一个受到大量的环境和测试条件影响的经验范围，往往在电池热失控模拟时也很难得到一个极为精准的温度点。这种分类方法的另一个问题是由于隔热片整体封装膜的材料往往是耐温性较差的 PI/PET/PEI，很难在声称使用的温度下具有防护效果，若无法将整体制品全部通过声称温度的耐温、耐火测试，对于产品的耐温性评定与分级产生问题。此外，经过调研发现产品厚度和气凝胶含量等对耐温温度有很大影响，若按照温度区分会在标准使用过程中出现以肉眼难以区分的低气凝胶含量产品以次充好的现象，也很难避免为达到更高温度分级的目的增加产品厚度，影响电池组装效果。最后，关于温度分区来说，不同类型电池由于工艺和加工水平的差距，热失控温度存在交集，导致按照线性分区的产品出现分类重叠的情况，影响气凝胶隔热片的采购与使用。

3）按照芯材种类区分。经过调研，目前市场上主流的气凝胶隔热片芯材为玻璃纤维气凝胶、陶瓷纤维气凝胶和预氧丝气凝胶，另外还有少量的微孔纤维气凝胶、酚醛气凝胶、碳增强气凝胶等，这里均归类为其他气凝胶。以芯材种类区分的原因是气凝胶隔热片的耐高温性能和火焰防护效果主要来源是芯材的气凝胶，其耐温耐火性能的指标上限是由芯材决定的。另一方面，标准的一个作用是引导行业技术发展，设置其他种类既可以给行业技术发展留有一定空间，又能够满足目前 90%以上产品的性能指标需要，提高标准的兼容性。

按照芯材种类区分可能存在标准化对象为封装产品，分类依据是芯材的问题。此问题的解释如下：因为气凝胶隔热片的高度定制性，往往生产过程是根据应用单位的耐温需求选择耐温

极限满足要求的芯材，之后根据应用单位的组装需要进行膜材料封装或硅胶边框封装。封装方式较多，从材料来说常见热压膜有 PI/PET/PEI/PBT/PPO/PEEK，加强介质有环氧热固化胶水/水性丙烯酸/聚胺酯/聚酯/热熔胶/改性硅，从工艺来说又有两片包、一片包、带硅胶条四边包、三包封边、真空封装等，若分类按照封装产品种类来分势必会引入芯材和封装工艺分类，造成标准冗长复杂影响使用，还可能导致产品技术路线同质化，影响技术发展。因此，仅按照芯材种类区分的方法是简单有效的，可以满足市场的应用需要和技术发展需要。

本标准规定的产品标记主要格式为【产品分类名称 标准号 芯材标记 尺寸密度信息 （工艺等备注信息）】。标记信息明确产品种类，提供详细的声称尺寸密度信息，包括长度、宽度、零载厚度、密度、封装厚度，方便供需双方确认产品规格。

3.6 指标要求说明

本标准涉及的主要性能指标包括外观、尺寸和密度、垂直燃烧、压缩性能、尺寸稳定性、绝缘性能、导热性能、热冲击防护性能、质量吸湿率、禁限用物质、耐老化性能、抗火焰冲击性能、剥离强度。涵盖了机械性能、传热性能、燃烧性能、电性能、防护性能、环境属性、耐久属性等全面合规性指标。按照产品的分类对不同的性能提出有差异化的要求。因部分测试对于芯材和特定种类产品的意义不大，例如对绝缘性能来说主要影响因素是封装膜，所以对封装使用的芯材来说测试绝缘性能是没有必要的，考虑到这种情况，本标准没有在正文试验方法章节设置选做实验，而是在检测要求章节中用不同分类、是否封装产品需要测试的项目表格加以规定，对测试项目的必要性分为必做、选做和不做几类，在一定程度上简化产品的指标参数测试的要求，提高标准的接受度。下面对所有涉及到的产品指标要求进行说明。

3.6.1 外观

要求试样表面平整，不得有妨碍使用的污迹、破损和鼓包。

外观测试主要针对封装后的产品进行定性的目视检查要求。试样表面平整是影响电池组装公差的主要因素，污迹和破损是从生产到电池组装车间前由于储存和运输等因素造成的产品质量缺陷，以上判据对于未经封装的试样仍然适用。鼓包是封装后产品的质量判据，主要观察经过封装后在使用前可能受到穿刺、高温环境、挤压等环境因素出现的是否有对使用产生影响的膜材鼓包，避免因空气鼓包导致的尺寸精度问题。

3.6.2 尺寸和密度

尺寸分为尺寸允许偏差和对角线差两部分。因不同分类的产品对于应用单位来说没有使用功能上的差别，所以在尺寸的要求上不做产品分类的区分。

本标准规定以允许偏差值作为合规性判定指标，仅测试产品的尺寸偏差范围，衡量产品的尺寸一致性。尺寸允许偏差作为判据主要是由于气凝胶隔热片是根据应用方电池电芯尺寸定制的，具有批次差异化和企业差异化的特点，因此根据本标准分类要求里的产品标识中声称产品尺寸作为测试参数，以实测值和声称值的差值为偏差值做判定。不限制具体的确定数值为参考值，给供需双方带来便利，防止出现因部件尺寸限制后续电池工艺的现象。在指标要求的数值确定上，经过标准编制组走访调研应用企业指标和收集样品验证试验，决定根据具体尺寸范围不同确定不同的指标要求，整体思路是尺寸越小的产品精度要求越高，同时满足生产企业可以控制的尺寸精度工艺水平要求。

对角线差是衡量产品机加工工艺的参数，表征产品切割和封装后整体的规则程度，即矩形规则性。当封装产品两条对角线差距过大时，相邻两边的垂直度越差，产品平行四边形相邻两内角的差越大，在电池组装时会影响封装精度。此外，经过了解现在市场上的主流电池有大尺寸电芯，如比亚迪的刀片电池，由于面积较大导致隔热片的对角线长度长，会放大对角线差，因此本标准指标以对角线长度平均值的1%做为指标，可以很好衡量产品的规则性同时避免由于规定具体尺寸导致尺寸较大规格的产品合规性难以达到的情况。

密度指标参照尺寸，同样以允许偏差作为判定依据，同时也遵循密度越小，允许偏差范围越小的原则。密度指标衡量产品质量一致性，是密度均匀性的直接表征方式。

3.6.3 燃烧性能

燃烧性能指标确定为符合GB/T 2408中的V0级要求，即每根试样的有焰燃烧时间≤10s、五根试样有焰燃烧时间总和≤50s、每根试样第二次施焰后有焰燃烧时间加无焰燃烧时间≤30s、不存在蔓延到夹具现象和滴落物引燃脱脂棉现象。

经过验证试验发现，可能存在不合规情况是由于生产工艺、试样老化和封装膜材和硅胶边框导致的。关于生产工艺，并非所有芯材均满足GB/T 2408中点V0级要求，验证试验过程出现部分产品引燃后长时间续燃的情况，重复大量测试此产品以及其他同类产品的燃烧特性后，发现属于工艺层面的不均匀导致产品燃烧性能出现偶发性不合格，属于较为严重的使用性能缺陷。关于试样老化，某些产品可能做过阻燃处理，经过高温高湿的长期老化后，由于表面阻燃成分的失效，存在试样引燃情况。关于封装膜材和硅胶边框，发现部分封装产品燃烧性能不合格的主要原因是表面膜材的燃烧，试验后拆解试样发现芯材仍然完好。经过与应用单位的讨论，标准编制组认为隔热片整体作为一种产品，本身需要具备一定阻燃性，垂直燃烧是形容产品最基本燃烧特性的试验，反映了试样的可燃性、离火自熄特性、燃烧产物特性等参数，作为阻燃性

能测试的基础性能是必须要进行的。垂直燃烧项目测试时需带有表面膜材测试整体效果，若有可拆卸边框，应该提供边框做测试，所有部件均通过燃烧评级后判定隔热片燃烧性能符合要求。

3.6.4 压缩性能

压缩性能指标分为压缩弹性模量和规定载荷压缩曲线两部分。考虑到电池封装工艺的区别，部分应用单位需要柔软回弹性好的隔热片，以保证电池正常运转时减少电池组内电芯与隔热片排布变形量；部分应用单位需要硬度较大的隔热片，以保证在安装机械夹具把整排电芯和隔热片交错夹紧放入模组内时不会由于隔热片与夹具夹臂距离不同导致隔热片压缩量不同的情况出现。两种指标要求是相反的，所以标准编制组删掉原本计划的压缩回弹实验项目，改为现有的两个试验，并对试验指标做满足使用要求的基础上尽可能低的要求。

压缩弹性模量是形容隔热片硬度的物理量，由产生规定位移变形量的载荷差值计算得到，满足应用方对隔热片柔性或硬度判断需求。在走访调查和电话回访中，发现企业对压缩弹性模量指标反馈意见较大，担心这个指标不合格影响整体合格判定。标准编制组将收集样品中数据较低的产品分类性能指标作为判定依据，保证此指标为应用单位提供数据参考的同时确保报告数据判定完整性。另外，经过验证试验发现绝大多数曲线为类指数函数曲线，无明显弹性段，所以根据产品实际压缩情况将指标确定为弹性段或规定变形区间的压缩模量，防止出现全压缩区间无弹性段影响结果表示的情况。

规定载荷压缩曲线同样是参考性指标，要求报告中提供达到规定载荷前的应力应变曲线及要求载荷点的试样厚度，硬性指标是压强达到1.0MPa前不应出现屈服点。经过咨询相关电池热管理系统设计专家，标准编制组了解到动力电池在发生热失控时电芯内部压力增大，达到0.9MPa左右时会打开卸压阀，通过喷射内部电解液和气体达到降温效果。所以一般情况下，气凝胶隔热片的最大承受压力不会超过1.0MPa。将产品压缩至理论最大压力，观察在压缩过程中是否出现屈服点，不出现屈服点说明材料还处于弹性压缩阶段，没有发生结构性破坏。在压缩过程中不出现结构破坏是保证隔热片防护效果的最基本要求，在本标准中作为规定载荷压缩性能的合格判据。同时，绝大部分应用单位需要全程压缩曲线作为动力电池设计参数，为了满足应用需求，本标准要求报告中提供全程压缩曲线，并把压缩过程中对应零载厚度、封装厚度、开阀厚度、损坏厚度等特征点的压缩强度值进行报告，方便供需双方确定产品性能、为动力电池研发提供隔热片产品压缩参数。

3.6.5 尺寸稳定性

经标准起草组的应用单位讨论确定，一般动力电池不发生事故的正常极限工作温度范围为-40℃~70℃左右，各家电池生产企业工艺设计不同略有区别。经过验证试验，气凝胶芯材冷热尺寸稳定性非常优秀，但是气凝胶隔热片封装材料为塑料或有机材料，在70℃温度下有发生软化变形的可能性，在-40℃温度下有收缩变形的可能性。因此，尺寸稳定性试验针对封装样品，衡量在冷热极限温度条件下的尺寸变化。由于气凝胶隔热片厚度较薄，所以隔热片的三维尺寸中长度宽度以原始尺寸的尺寸变化率表示，厚度方面考虑到较厚的试样厚度变化量会因厚度增加而放大，标准编制组决定将厚度按照较为常见的3mm规格作为分界线，小于3mm以厚度变化量表示，大于3mm以厚度变化率表示。

3.6.6 绝缘性能

作为应用在新能源动力电池内的材料，正常工作环境是高电压环境，处于热失控或电池破裂防护工况时可能出现高压电弧和泄漏电流。因此测试电学性能是评价材料安全可靠性的重要因素。另外，防火隔热材料多为绝缘材料，因此需要针对绝缘属性测试其电学性能。从击穿电压、泄漏电流、表面电阻率、体积电阻率和介电常数等一系列电参数的应用范围和表征意义进行分析，标准编制组选取击穿电压和体积电阻率两项试验作为隔热片绝缘性能指标项目。

击穿电压试验反映在高电压环境下材料的耐压能力。通过测试击穿电压表征绝缘材料的介电能力及可承受的工作电压值。标准编制组了解到正常动力电池工作电压在 400V 左右，但是绝缘材料在高压环境中长期工作会出现极化情况，导致隔热片击穿导电。经过大量验证试验，标准编制组发现封装试样的击穿电压远大于同样厚度的芯材，且一方面芯材具有多孔结构另一方面测试方法原因击穿位置多为直径 1mm 左右小点，所以可能存在较大误差。鉴于芯材测试的结果重复性和数据有效性问题，仅针对具有膜材封装的材料或直接以芯材状态作为成品的材料做击穿电压要求。通过换算电池设计规范中对电池内材料的要求，电池工作最低安全击穿电压值一般在 2kV 左右。击穿电压强度与产品厚度相关，根据验证试验结果，将指标确定为4kV/mm，达到此指标要求的气凝胶隔热片通过厚度比例计算数值超过电池工作最低安全击穿电压。

体积电阻率和表面电阻率是描述电阻特性的两个参数，但它们之间没有直接的换算关系，因为它们的物理意义、单位及测试条件完全不同。体积电阻率（ρ_v）是材料内部的电阻特性，单位为Ω·m，作为材料本身固有的物理性能反映材料的导电能力，反映材料体相的载流子迁移能力，与杂质、晶格结构等有关，表征材料的绝缘性和防静电水平。表面电阻率（ρ_s）是材料表面的电阻特性，与表面污染或涂层有关，单位为Ω，反映表面泄漏电流，受表面污染、湿度、

氧化层等影响，与体相性质无关。若材料均匀且表面无缺陷（如高纯度硅片），可通过几何参数估算两者关系，即假设电流均匀分布，表面电阻率可近似为 $\rho_s \approx \rho_v \cdot t$，$t$ 为试样厚度。高体积电阻率（$\geq 10^{12}\ \Omega \cdot cm$ 量级）是保障电池系统 400-800 V 工作电压下防止漏电流和电芯间短路的必要条件，在新版本《电动汽车用动力蓄电池安全要求》中明确指出，在各种破坏性试验后电池包或系统应满足存在交流电流时，绝缘电阻不小于 500MΩ。作为应用于动力电池的电芯间热防护材料，应符合强制性国家标准的要求。经过验证试验和近似换算计算，本标准通过规定最低安全电阻指标 1000MΩ·m 来保证整体电阻率符合要求。

3.6.7 导热性能

导热性能的测试方法有很多，常用的方法按照测试样品的环境条件分为稳态法和非稳态法。一般来说，稳态法是指待测试样处在一个不随时间变化的温度场内，根据傅里叶定律可以测得其导热系数。稳态法的优点是可以直接获得导热系数，适合较宽温度区域的测量,缺点是测试时间较长(必须达到稳态)，测试系统的绝热条件苛刻(要求系统尽可能低的热损失),常常用于低导热系数的测量。稳态法主要包括热流计法、防护热板法、福勃圆棒法、热电法等。在本标准中采用了热流计法和防护热板法两类，其中热流计法适合导热系数较小的固体材料、纤维材料和多孔材料，温度较低时采用热流计法测试结果更精确。防护热板法适用于温度范围更大，量程更广的场合，一般来说适合 100℃以上温度测试结果更为精确。

在隔热片的测试过程中，标准编制组发现由于气凝胶隔热片的封装膜材或边框难以承受高温环境，在高于 300℃时会融化并粘附在设备热板上影响试验结果，导致试样的导热系数曲线拟合失真。经过比对试验发现，在高温段时主要的热阻贡献材料为气凝胶芯材。所以标准编制组确定低温度区间测试隔热片整体的热学参数，高温度区间测试隔热片芯材的热学参数。另外，考虑到整体测试时属于复合制品，且我国稳态法导热测试国家标准 GB/T 10295 对试样形态具有明确要求，在符合均质材料时才能将传热学性能称为导热系数。所以本标准的指标要求中，低温度段采用热阻指标，高温度段采用导热系数指标。

对于热阻指标来说，热量阻隔效果越好的材料热阻越大，本标准的判定指标是不低于热阻最小值要求。此最小值的得出主要依据验证试验的测试结果，按照热阻值和厚度等效计算出“导热系数”后，是可以与高温段的导热系数拟合曲线对应的，也就是说在高温段达到较好热防护效果的产品一定会具有较高的常温热阻值。另外为了方便判定指标和不同产品比对，将在某一厚度下测额定热阻值经过乘法比例计算，得到等效厚度 1m 材料的热阻值。

对导热系数指标来说，主要影响因素是气凝胶芯材种类，不同的芯材耐温极限和相同温度

导热系数值有系统系的差别。经过对各种分类产品的大量验证试验结果并根据其他相关标准的协同性，确定测试高温段温度点为100℃、200℃、300℃、500℃、800℃。起点温度点的选取主要是由防护热板法设备下限得到的，经过不同方法和设备之间的比较，保持较高测试精度和重复性的最小测试温度为 100℃。200℃测试点主要是对于预氧丝气凝胶分类，经过试验发现预氧丝气凝胶在300℃以上会发生影响试验结果的形变，由于厚度变薄和尺寸缩小使得到的导热系数数据不可靠，因此对于预氧丝气凝胶仅测试100℃、200℃导热系数。中温度点的测试选择在 300℃、500℃主要依据 GB/T 34336 气凝胶的国家标准要求里面设置的导热系数判定点，与相关产品国家标准协调一致。对于陶瓷纤维气凝胶来说，其耐温极限是目前主流气凝胶中最高的，标准编制组查询目前装机量超过70%的磷酸铁锂电池的热失控温度，发现极限高温测点约为800℃，另经检测验证使用水流量平板法测得的1000℃导热系数重复性差，精密度很难满足要求，所以极限高温点定为800℃，高温段均采用防护热板法测试。通过芯材分类确定不同的指标要求，可以满足供需双方的测试需求，也可以减少部分不必要的试验量。

3.6.8 热冲击防护性能

热冲击防护性能是表征气凝胶隔热片对背温面防护效果最直接的测试参数，也是对于电池热失控过程防护最接近的模拟试验。本标准采用的方法为目前电池组装厂、整车厂大多要求隔热片供应商做的热台法检测。原理是将均热板加热至规定温度后以一定的压强压到隔热片上，通过一定时间后冷面的温度来表示隔热片的隔热性能。

为了更好模拟使用效果，标准编制组曾计划以感应线圈加热或卤素石英灯加热的方式实现快速升温，以模拟电芯热失控场景，后经电池研发专家指导改为热台法测试。主要原因是热失控是不可控过程，哪怕用真电芯来测试时，不同的引发方式、不同批次电芯都会得到不同的测试结果，另外热失控过程中存在的熔融喷溅物也很难模拟，模拟测试与实际过程总是有差距的。设置统一方法的目的是侧重某一重要的方面如瞬时高温高压对隔热片进行测试，以反映其质量优劣，方法的研制重点在重复性和可靠性，通过规定测试条件和环境来保证不同时间、不同地点、不同人员来测试同一种类样品都可以得到较好的数据重复性。因此，标准编制组放弃模拟承压状态快速升温的方法，采用目前接受程度较高的热台法进行设备与试验过程完善改造。

本标准的预设指标要求是试验过程样品冷面温升应不超过200℃，试样厚度保留率不低于初始厚度80%。

关于冷面温升指标，是基于冷面温度指标做计算得到的，若直接使用冷面温度，则很难避免地域性、季节性环境温差导致实验起始温度不同带来的结果影响，通过测试开始前环境温度

的修正和冷板的温度稳态调节，能够一定程度避免由环境温度带来的系统性偏差。关于温升数值，了解到大部分车企的热管理系统热失控可控温度是200℃左右，标准要求要首先满足应用方安全指标。其次，根据收集的验证样品数据分析得到的基础值为200℃。

在热冲击防护性能的表征上，除温度外，还有厚度变化的要求。走访应用单位了解到，在隔热片受到高温高压作用时，会产生压缩，当压缩量达到隔热片厚度70%左右时会导致后续控温出现问题，保持高温高压环境下隔热片的厚度是评价其防护性能的比较重要的指标，但是考虑到厚度测试误差较大，高温试验过程使用人工设备测量具有误差和安全性问题，使用设备自身位移计量装置会引入设备本身形变和高温影响光学测试的变量。经考虑决定删去厚度表征结果，修改为评价试验结束后经过高温压缩的试样厚度与试验前初始厚度的比值作为试样厚度保留率表征试样的厚度变化。但经过验证试验发现部分产品经过高温高压试验后试样出现破损或断裂，影响厚度测试。综合考虑以上因素，决定删去对厚度的要求。

关于试验前后外观变化和完整性要求并没有添加到本标准的指标要求中，因为隔热片在承受500℃以上热失控温度环境时，属于一次性消耗产品，只要可以保证一段时间内其背面保护侧的温度正常即满足正常使用效果，不必纠结产品是否完整，所以在试验方法中要求报告相关现象以供产品应用单位参考，但不作为合规性指标进行判定。

3.6.9 质量吸湿率

质量吸湿率测试主要反映气凝胶芯材封装前和带封装膜整体隔热片在潮湿空气中吸收水蒸气的能力。若吸湿率过高则可能存在封装进电池后在电池运转过程中受到高温环境影响释放之前吸收的水蒸气的情况，影响汽车电池的电阻和耐久性能，存在安全隐患。经过测试发现，部分芯材和带封装膜整体隔热片均有不同程度的吸湿现象，最大的吸湿率达到 4.0%以上，且经过数据分析发现较大吸湿率的样品种类无规律，即在不同分类的气凝胶中均有存在，排除某一产品分类集中出现，可以认为吸湿率差是个体工艺和原料问题，鉴于吸湿率对于使用来说确实有一定影响作用，所以本项目将作为必测参数。

指标要求参照GB/T 34336气凝胶产品标准要求，根据验证试验显示绝大多数样品满足此指标，少量不满足指标的数值较大，可以预见在实际使用过程中会存在问题，可以将其判定为不合格产品。

3.6.10 禁限用物质

本标准引用 GB/T 30512 汽车禁限用物质标准进行测试，指标要求满足 GB/T 30512 中对各禁限用物质的要求，不做加严或放松。经过验证试验发现GB/T 30512中提到的禁限用物质

种类的测试存在检出情况，检出量均在要求范围内，说明汽车禁限用物质国家标准的指标对气凝胶隔热片产品来说也是适用的，并且由于验证试验过程确实检出了部分禁限用物质，此项目的检测是有必要的。

3.6.11 抗火焰冲击性能

抗火焰冲击性能测试对应的是生产和应用企业常用的喷火枪灼烧试验，本标准对试验过程参数做了明确要求和指标要求。本标准的指标要求如下：有阻燃性的要求时，应满足 5 分钟内隔热片未发生火焰击穿。

在验证试验前标准编制组经过方法论证试验后对此性能的判据进行大范围罗列筛选，并制定较为严格的判据如下：应满足 5 分钟内隔热片冷面中心点温度上升不得高于 260℃，封装材料正面烧蚀区的等效直径不超过 50.0mm。试样芯材中心点不得出现熔融、滴落和穿透现象，灼烧过程中不得出现刺鼻的浓烟。其中，判定 5min 时火焰灼烧效果的时间依据来源自老版本 GB/T 38031 中提到的 5min 内不失火、不爆炸要求。此外受限于喷火枪的材料耐温效果，连续操作超过 5min 可能出现喷火口损坏影响操作安全；搜集真实电芯热失控过程温度曲线，发现着火过程温度最高峰一般出现在热失控过程前 5min。鉴于以上原因，标准编制组选定 5min 灼烧时间进行判定。失效判定分为 3 个部分，包括温度、烧蚀区域、灼烧现象。背火面温度是衡量防护效果的最直观参数，经过验证试验和同款材料的实际使用情况比对，发现冷面升温最低值在 240℃左右，本标准的指标要求确定在稍高于下限值要求，保证使用时安全效果。烧蚀区域面积主要针对表面膜材，因为表面膜材通常难以承受高温火焰，会发生烧蚀现象，通过测试可容纳烧蚀区域最小圆的直径来表征膜材料的火焰燃烧效果。灼烧现象主要针对芯材，保证火焰灼烧过程中芯材不会发生灼烧穿透，也不会由于燃烧产生剧烈浓烟。

但是经过扩大范围的验证试验发现原定指标不适用。对于温升来说，以1000℃以上高温持续加热隔热片的工况比实际热失控工况中灼烧情况更严苛，所以以背面温升为合规性判据属于强制加严要求，对产品多元化产生不利影响。此外在验证过程中，背火面温度受到材料种类、厚度、封装膜等产品本身性质因素影响，因此对于背火面温度的测试是较难确定指标的，若强行设置温度指标可能出现厚度较薄的产品实际可以通过车企的热失控测试却难以通过以本标准之前设置的背火面温度指标的要求。烧蚀区域的测试根据实际效果来看测试难度较大，主要由于部分产品灼烧区域火焰蔓延至金属夹持边框部位，导致边界阻隔效应而难以正常计算此指标，同时发现由于厚度因素影响，灼烧区域大的样品背火面温度可能比灼烧区域小的样品低，所以标准编制组经过考虑后决定取消这一判定依据。综合以上因素，验证人员一致认为将阻燃

指标设置为定性，即仅把规定时间内产品的完整性作为合规性判据，以达到满足使用要求的效果。定性分析仅依靠是否火焰击穿为唯一合规性判定依据，同时按照验证试验情况在标准文本中规定了火焰击穿的两种具体形式，即1)试样中心点发生穿孔性破坏时判定为发生火焰击穿。2)若存在试样背面温度快速升温至接近火焰温度，即使试样未发生破坏也判定试样发生火焰击穿。在报告中报告其他的灼烧现象，作为应用单位的参考，不进行结果合规性判定。

3.6.12 剥离强度

剥离强度测试主要针对封装后的产品在表面有胶或使用状态时要进行粘合的产品。通过对胶和封装膜表面或胶与不锈钢、铝片等金属表面的粘合剥离强度的测试，表征其结合强度。剥离强度的数据指标来源是根据目前最常见的表面自带胶的隔热片产品进行不锈钢、铝片等金属表面的粘合剥离强度的测试得到的数据结果确定的。因此，在对封装膜材表面的粘结特性有要求时，应满足180° 剥离强度不低于25N/25mm。

3.7 关于试验方法的说明

本标准中的引用的标准试验方法均采用已颁布实施的国家标准，并根据气凝胶隔热片的特性细化了试验条件和操作程序。对于未有国家标准或现有标准不适用的试验方法，如热台法测试抗热冲击性能、压缩性能和尺寸密度等，参照相关标准或普遍采用的测试手段制订了试验方法，以规范性附录的形式给出，构成本标准的测试方法要求。以下为本标准涉及试验项目方法选择和参数设置的说明。

3.7.1 状态调节

状态调节参数来源于 GB/T 34336《纳米孔气凝胶绝热制品》。经过验证试验发现部分产品的吸湿率较高，说明在运输和储存过程中若存在高湿天气则会使试样湿度过大影响试验结果。为了保证测试结果一致性，标准编制组认为需要对隔热片进行状态调节。经过试验，在 GB/T 34336 规定的调节温湿度，即标准实验室环境下自然放置 24h 可以满足没有直接浸水或受潮的产品干燥需求。另外增加试样状态描述即没有特别说明，隔热片不应拆掉封装膜和边框采用经过封装的整体进行测试，与标准的测试范围对应。

3.7.2 外观

参照 GB/T 34336《纳米孔气凝胶绝热制品》的目测法，同时根据试样尺寸减小方法中对目测距离的要求。因外观测试要求仅需要定性分析，无测试数据要求，所以不额外规定光照强度、测试台平整度等测试环境因素。

3.7.3 尺寸和密度

根据气凝胶隔热片的产品特性制定了试验方法以规范性附录 A 的形式给出。

测试仪器选择主要考虑实际应用尺寸和精度需求。测厚设备采用 GB/T 328.4 中规定的带有一定压力的测厚仪，因为同沥青防水卷材一样，隔热片在使用时往往是压缩状态，经过多方调研压力在 20 千帕左右，因此选择此种标准测厚仪，测试的厚度为本标准定义的封装厚度。测试长度和宽度使用游标卡尺和钢直尺，在尺寸满足游标卡尺量程时，优先选用游标卡尺测量，超过游标卡尺量程时选用钢直尺测量，以尽可能增加测试精度。称量质量采用电子天平，经验证试验分析隔热片的质量在几克至几十克的量级，质量称量精度一般情况下不低于总质量的 1%，使用精度 0.01g 的电子天平满足测试需求。

关于测试方法，一般来说使用整体隔热片作试样进行测试，未封装的气凝胶芯材也适用。

长宽的指标要求是长度宽度允许偏差，因此只针对封装样品，反映模切工艺。测点位置选取边缘中线和距边缘 10mm 与中线的平行线，即测试 3 组长度和宽度，结果取每块试样 3 组值的平均值，每个样品需要测试 3 块试样。测点位置如图 3 所示。

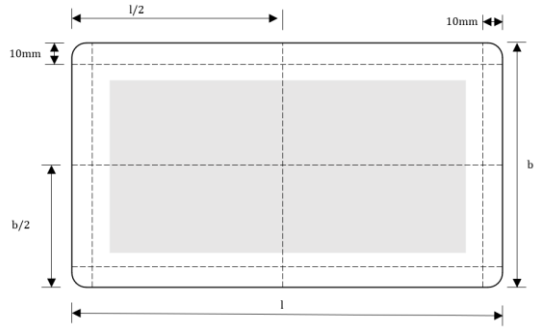


图 3 长度宽度测量位置

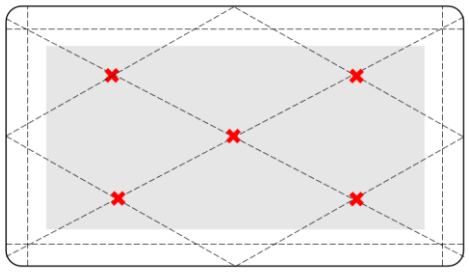


图 4 厚度测量位置

关于厚度测试，因为隔热片封装膜边缘较薄和外圈可能的边框影响，通过测点选取位置进行边缘规避，尽可能测试中心部位的芯材和膜材叠放厚度。因为标准编制组考虑到边框这一特殊封装方式与覆膜封装在受力、受热方面的区别，将试样按照有无边框进行区分。对于无边框的样品测试 3 块试样对角线交点及各边中点连线与对角线的交点，每块试样共测试 5 个位置，测点示意图如图 4 所示。对于有边框的试样，首先测试整体试样四边中心的厚度，记为边框厚度，之后去除边框按照无边框测试位置进行测试，记为去框厚度。考虑到在实际使用过程中，边框主要作为结构件是其在电芯间的主要受力部位，试样的厚度由边框厚度决定，故标准编制组在方法中规定有边框的试样测试需报告边框和去边框两种厚度。

对角线差试验是描述成品规则性的测试，测试方法参考 GB/T 37608 真空绝热板。因真空绝热板产品为绝热芯材覆隔气膜制成与隔热片结构相似，且用途都为绝热插板，二者对受热面的矩形规则性都有一定要求，所以标准编制组参考真空绝热板国家标准中尺寸附录中对角线差

的方法设计方法。本标准测试时要求采用游标卡尺或钢直尺两种量具之一，一方面避免游标卡尺量程不足，另一方面避免小尺寸样品钢直尺误差太大。

密度的测试针对封装样品和芯材。对于芯材，需保留原始厚度将试样裁切至不小于 100mm 的矩形试样块，同时要求避开边缘 100mm 取样品内部，避免由于芯材成卷运输挤压导致边缘厚度与内部厚度不一致。经过验证试验，发现成卷样品的宽度方向中心部位试样往往薄于边缘位置，对于厚度较厚的产品来说更为明显，考虑到厚度超过 5mm 的产品在气凝胶隔热片中占比较少，芯材成卷的规格型号难以统一，遂不在文本中明确取样部位，仅以避开边缘 100mm 取样作为取样要求。对于封装制品，仅规定带有边框的试样计算时代入边框厚度计算，以表征在实际使用过程中的体积。

3.7.4 垂直燃烧

本标准引用由国际通用 UL94 方法转化的国家标准 GB/T 2408《塑料燃烧性能的测定 水平法和垂直法》的方法。由验证试验得到结论，气凝胶芯材大部分可以通过 V0 级要求，燃烧情况是火焰完全无法引燃芯材，部分未通过产品燃烧情况为火焰续燃超过标准要求。封装产品燃烧的主要对象是膜材和边框，标准编制组对拆解的边框做 GB/T 8924 规定的氧指数测试，发现收集材料的氧指数普遍在 26~28，说明在正常空气条件下有一定概率会引燃持续燃烧。所以针对覆膜样品和芯材来说，都直接按照 GB/T 2408 规定的取样方式进行取样，对于带有边框的试样，在将芯材膜材测试的同时，还要求边框材料单独测试垂直燃烧性能，两者均符合要求时，才可判定试样整体符合要求。

3.7.5 压缩性能

本标准参考 GB/T 13480《建筑用绝热制品 压缩性能的测定》的方法设计适用于气凝胶隔热片的压缩方法。相比于建筑用绝热材料，气凝胶隔热片具有厚度薄、尺寸小、存在复合结构等特点，所以需要从试验方法到试验参数上进行特别规定。

对试样的要求说明如下。本标准规定在样品具有封装边框时，测试时应去除边框。去除边框的做法是通过调研应用过带框产品的车企咨询隔热片工况使用情况，了解到气凝胶隔热片受压情况主要出现在电池使用寿命末期或热失控阶段电芯外壳变形时，这个时期电芯会形成中部凸起直接接触隔热片，边框的结构支撑作用基本失效，所以对于有边框的样品来说压缩性能测试需去除边框。由于大多数封装工艺会用一定预压力或真空封装的方式，在切开试样时会导致试样状态发生改变，所以本标准要求芯材尽可能按照下游封装工艺封装后测试，在文中用“宜”推荐性条款说明，给芯材生产企业提供参考性意见。对于尺寸较大的试样，相同的压强需要更

大的压力，给电子万能试验机带来更大的负荷，且大量程的强力机往往在低压力段的载荷精度较差，影响试验精度，所以本标准规定最佳测试尺寸为(200×200)mm，试样尺寸小于(200×200)mm 时取试样原始尺寸试验，若试样某边尺寸大于 200 mm，则不破坏原始封装状态将整体试样的中间 200mm 长的部分置于压板下进行试验，尽量避免对试样切割产生试样状态变化。

关于初始厚度测试，测试前按照附录 A 的规定测试厚度，主要目的有两个。一是由于隔热片单层厚度较薄，试验进程较快，极易出现强力机过载的情况，所以通过测试初始厚度，将试样叠层至至少 5mm 厚作为试样，并报告叠层层数。二是做为封装厚度，与强力机提供 20 千帕压力时的位移做关联计算，以求得压缩曲线中的各特征点的厚度。

关于压缩弹性模量测试，压缩起点选择与封装厚度测试一致的 20 千帕，由于气凝胶隔热片硬度较大还存在卷曲严重的芯材测试，所以经标准编制组研究增加备注若试样表面无法与压板完全重合，可适当增加压力直至试样与压板间无肉眼可见的间隙，避免试样无法压至平整导致试验起点有误影响试验结果的情况出现。压缩速率定为 1.0mm/min（±20%以内）恒定速率，是经过验证试验控制整个压缩过程在 1min 以内，以模拟实际应用过程中快速受压的情况，同时给出速率误差范围，增加标准的实用性。在本标准中弹性模量的定义是连续压缩试样直至试样形变量大于 10%。按 5%形变时载荷 F1 及此时位移量 X1、10%形变时载荷 F2 及此时位移量 X2、试样初始截面积 A、压缩起点时试样厚度 d，计算相应的压缩弹性模量。若试样存在明显的弹性段，取弹性段进行计算。经过验证试验，发现绝大多数隔热片制品的压缩曲线为类指数型，不存在明显弹性段，如图 5 所示，所以经标准编制组研究，将形变量 5%至 10%的区间作为弹性段，通过计算得到压缩弹性模量以反映材料硬度。同时也补充具有明显弹性段的产品要以弹性段计算，增加标准的严谨性。

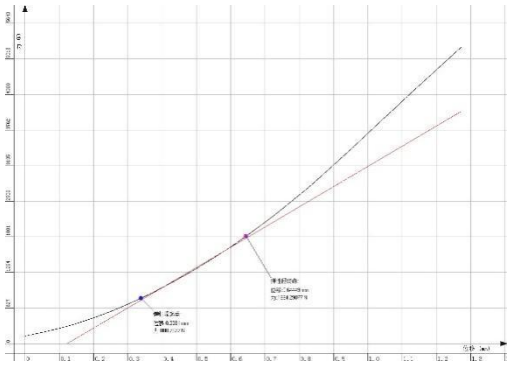


图 5 隔热片压缩弹性模量验证试验数据图

规定载荷的压缩曲线试验与压缩弹性模量试验的主要区别是压缩弹性模量以试样厚度变化为试验参数，压缩曲线试验以受压力为试验参数。为了保证压缩曲线的完整性，本方法的压

缩起点要求是平整样品从压板离试样的规定距离开始，对于弧形试样从完全压平开始。关于压缩终点问题，标准编制组经过咨询相关电池热管理系统设计专家了解到动力电池在发生热失控时电芯内部压力增大，达到 0.9MPa 左右时会打开卸压阀，通过喷射内部电解液和气体达到降温效果。所以一般情况下，气凝胶隔热片的最大承受压力不会超过 1.0MPa。经过讨论将 1.0MPa 作为试验终点，同时指出若试验过程试样发生屈服，即载荷-位移曲线上出现下降或波动时，记录屈服点信息。整个压缩过程需记录特征值点，包括刚刚接触时的零载厚度、20 千帕载荷的封装厚度、0.9MPa 时的开阀厚度和可能在 1.0MPa 载荷前出现的损坏厚度。各厚度的计算以试验开始前用测厚仪测得的厚度为基础，通过强力机的位移读数做加减计算得到。因存在有弧度的产品需要预压，所以增加备注对于需要预压的弧形样品，零载厚度通过游标卡尺直接测得。

3.7.6 尺寸稳定性

尺寸稳定性试验参考 GB/T 8811《硬质泡沫塑料 尺寸稳定性试验方法》，因样品尺寸和试验条件具有较大差别，所以参考 GB/T 17794《柔性泡沫橡塑绝热制品》耐温性能测试的方法撰写方式，在正文中对相应条款进行直接规定。

为了模拟实际的封装承压状态，本标准方法要求将试样夹在两块表面光滑平整的金属平板中心位置，平板面尺寸至少超过试样边缘 10mm，通过增加配重、螺丝旋紧或使用台虎钳等方式给试样提供 20kPa 压强。标准编制组的验证试验是通过安装有环境箱的电子万能试验机和钢板螺丝旋紧方式完成的，考虑到强力机用环境箱测试成本高，液氮冷却具有一定危险性，本标准未规定具体测试方法，仅要求提供规定的温度和压力即可，给标准应用者较为宽松的实现空间。测试温度取动力电池在正常工作时的温度上限和下限分别测试对应环境的尺寸变化率。

3.7.7 绝缘性能

绝缘性能测试均引用现行国家标准。

击穿电压引用 GB/T 1695《硫化橡胶 工频击穿电压强度和耐电压的测试方法》中的板状测试方法。标准编制组通过比较 GB/T 1408.1《绝缘材料 电气强度试验方法 第 1 部分：工频下试验》和引用标准的差别，认为硫化橡胶材料也为绝缘材料且具有板状测试的试验方法，可以适用于隔热片。同时 GB/T 1408.1 标准为原理类方法标准，操作步骤和原理复杂，GB/T 1695 标准为实用类方法标准，操作简单，板状材料击穿电压的测试原理都是先连续增压后逐级增压的方式。遂引用便于操作的国家标准作为测试方法。针对气凝胶的产品特性设计适合气凝胶隔热片的参数，规定起始电压值为 1kV，60s 逐级升压，每级升压值为 0.1kV，简化试验过程，可以从逐级加压开始实验。此外，还规定了适合隔热片试验的试样尺寸和实验环境条件，保证

测试重复性和可靠性。根据验证试验情况，增加试验要求，若试样使用状态为未封装，则在测试前应用标准要求的变压器油完全浸润后测试，测试结果应进行精密度判定。

体积电阻率引用GB/T 31838.2《固体绝缘材料 介电和电阻特性 第2部分：电阻特性(DC方法) 体积电阻和体积电阻率》是GB/T 1410《固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法》替代版本，此方法适用于固体绝缘材料的电气性能测试，确保材料在电气应用中的可靠性。与击穿电压类似，体积电阻率测试试验同样针对气凝胶隔热片产品给出合适的测试参数。通过验证试验发现气凝胶隔热片芯材的电阻较大，完成封装后电阻会进一步增加，因此试验条件采用1000V电压。由于可能存在隔热片材料受高电压极化导致导电能力增强电阻下降情况，所以有必要规定统一的测试读数时间，经过验证试验发现在40s左右数据基本稳定，为了保证测试精度，选择极化60s时的电阻值作为测试结果。测试的环境条件作为可能影响电阻结果的因素，通过规定标准的测试环境来减少因温湿度环境条件带来的系统误差。材料的电阻性能除了本身的影响外，厚度也是影响因素之一，因为不同厚度的产品其表面层结构占整体结构的比例不同，本标准要求使用单层试样试验，排除多个表面层引入带来的影响，同时还要求报告封装厚度，方便计算结果并为不同厚度的产品提供数值比较的可能性。

3.7.8 导热系数

导热系数测试引用现行国家标准。

热阻测试引用 GB/T 10295《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 热流计法》，由于隔热片厚度较薄，标准编制组规定测试时需保留原始封装材料，可叠加多层进行试验，按照单层试样热阻值进行报告并注明单层试样厚度。为了方便判定和不同产品间数据比对，标准文本规定应将测试得到的热阻值按照试样厚度换算成 1m 的标准尺寸后进行判定。

导热系数测试引用 GB/T 10294《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法》，由于上文指标说明处提到的膜材容易发生融化黏连问题，规定测试时仅测试芯材。

3.7.9 热冲击防护性能

热冲击防护性能测试目前国家标准尚未发布，本方法借鉴多家市场主流电池供应企业的招标要求中提到的方法和国家标准征求意见稿进行整合。同时对试样、设备、环境、人员操作等因素做详细的规定以避免由上述因素导致的误差。

试样为单层封装试样，芯材同样适用，但是对于有边框的样品来说，鉴于与压缩性能同样的原因，需去除边框进行测试。为了减少测试的边缘效应，本文件对试样的尺寸做了明确的规定，即测试需提供尺寸和压板尺寸一致、封装状态与实际使用一致的标准试样。

在试样要求的注释中给出对于边框的要求，注释规定“试样制备应保留原始封装外覆层；若有边框，宜去除，若去除边框可能对测试结果产生影响，可保留边框测试并在报告中注明；若有其他特殊要求，试样状态可由供需双方商定。”此注释确定了封装材料的保留要求。对于边框，参考生产企业的意见，如某些真空封装或预压封装的产品单纯去除边框可能影响试验结果，此时应提供无边框相同封装状态的标准样品试验。为了方法的普适性，依旧放开试样状态要求，以适应将来可能出现的新工艺产品或气凝胶隔热片制品的抽检送检需求。

试验装置原理是模拟电芯间热扩散防护工况，以恒定温度的加热板作为热失控单电芯模拟物放热源，在其他各面做热防的条件下向有隔热片保护的冷板传热，在达到平衡后根据冷面的最高温升评价隔热片对于单电芯热失控情况的防护效果。加热模块达到规定温度后，将测温模块安装在加压装置上，通过加压装置带动测温模块和试样向加热模块移动，试样接触加热模块的热板后关闭加热器进行规定时间加压，之后卸压至较低接触压力，自然降温至测试结束。通过测温模块记录的最高温升表征隔热片热防护效果。

关于试验设备参数确定。标准编制组调研市场上现有设备情况并与 3 家设备生产厂家进行讨论，在保证试验效果的条件下尽可能选用常见规格的配件，来确定设备各部件的具体参数要求。加热装置为硅碳棒加热，咨询设备厂家规定面积上的硅碳棒加热功率，硅碳棒排布密度随加热板的尺寸确定是固定的，因此额定加热功率是有上限的，设定设备的升温速率时要考虑设备加热板尺寸和加热元件额定升温速率，经过实际验证确定设备额定加热功率为 10℃每分钟是容易长时间稳定达到的。

加热板的制作是采用埋入式热带偶测量热板的温度。为了保证加热板导热系数是可控的，本标准规定了热板的材质为极限耐温 900℃的 GH 4169 铁镍合金，为避免边缘效应，加热板中央区域为加热有效区。热板尺寸设计参考天津大学任则明毕设论文喷丸金属力学性能模拟分析中对 GH 4169 铁镍合金的性能参数分析，从数据表格中可以得到（20、100、200、300、400、500、600、700）℃时此种金属材料的热导率 k（$10^{-3}W.m^{-1}.℃^{-1}$）分别为（13.4、14.7、15.9、17.8、18.3、19.6、21.2、22.8）温度越高导热能力越强，就为控制均匀温升提供基础条件；另一方面比热容 C（$J.Kg^{-1}.℃^{-1}$）分别为（427、450、473、481.1、493.9、514.8、539、573.4），以本实验测试温度 600℃比热容约为 540J/（kg • ℃）计算，测试温降以合格线 200℃和试验开始前室温 22℃计算，代入 GH 4169 铁镍合金密度 8.19–8.24 g/cm^3，代入 150Ah 单电芯释放热量约 1000kJ，可得若接近单电芯的放热量，金属压板的厚度值应为 25mm，考虑到实际工况下电芯散热状态与试验设备的热防护均使得电芯/加热板在相对封闭的环境中放热，所以热板的厚度

定为 25mm，不做热损修正。经过与设备厂家讨论热板厚度，此设计是合理可行的。

热电偶的排布方式在标准文本中做详细的规定，包括具体测点排布和距离测试面的位置。通过在金属板上开表面槽，埋入热电偶后用焊料填平的方式保证测试热面的平整度。加热板的热电偶布置方式如图 6 所示。热电偶向一边开槽以简化设备线路，热电偶测点呈品字形位于有效区域中间部位，测试温度一致性较高。另外规定了加热板的外侧保护壳结构，保证加热板的散热一致性。加热板应使用合适的保护壳进行防护以保证加热板除测试面外均有热防护层保护。加热板与保护壳间宜填充适当的隔热防护材料，保护壳边缘宽度宜不小于 100mm，示意图如图 7 所示。

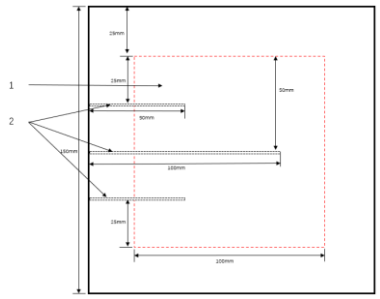


图6 加热板热电偶位置示意图

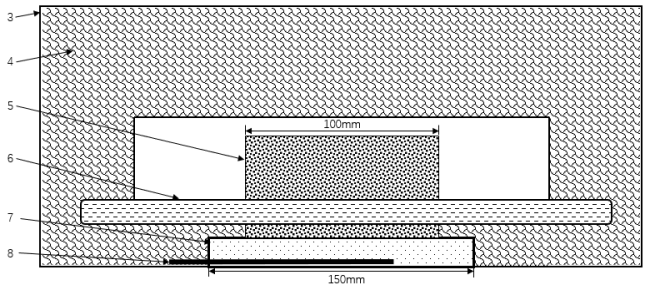


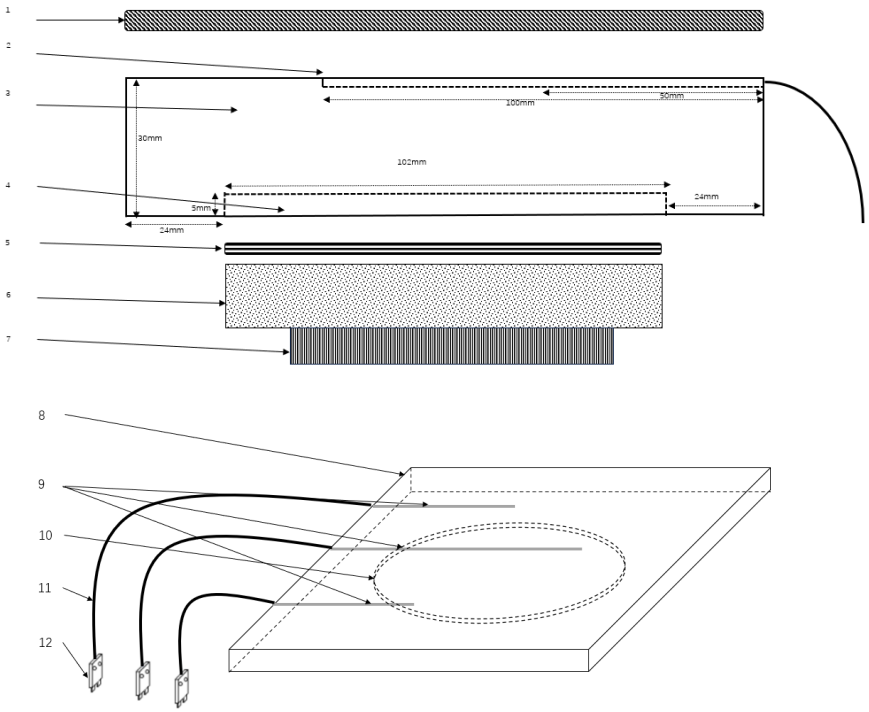
图7 加热板热防护示意图

图中：1-有效加热区域　2-热电偶表面槽位置　3.外保护壳　4.隔热防护材料（平均温度500℃的导热系数不大于0.15W/m·K）　5-固定硅碳棒的热交换媒介　6-硅碳棒　7-加热板　8-热面测温热电偶

冷面由加压装置和冷板组成，加压装置为常见的小型伺服电动机，配备直径 100mm 的金属圆形加载台。冷板为可以卡在圆形加载台上的碳化硅材质板材组成。之所以没有选择原有的铝板、钢板、硅酸钙板主要考虑到首先以上材料比热容与电芯差别大，散热效果导致冷面温度与实际情况具有较大差别；其次是耐久性问题，铝板和钢板在高温工况下表面易氧化，影响接触面光洁度和平整度，硅酸钙板受热冷却过程易吸湿；最后是效率问题，原有设备通常配备一块冷板，等待冷板降温通常需要数小时，测试效率低。采用可拆卸碳化硅下冷板的意义在于:1.碳化硅陶瓷冷板比热容在（800±50）J/(kg·K)，与电芯 800 J/(kg·K)接近，模拟散热效果更好。2.材料强度高耐久性好，受长期热震抗疲劳强度高，而且表面不会发生氧化或吸湿受潮。3.价格低，一块板的定制价格在 1000~2000 元左右，可以大规模制作作为耗材使用。4.试验效率高，通过不断更换冷板，可以在加热板达到温度后立即进行试验，减少由于热板反复升温的电能消耗，加快试验效率。5.耐久性好，碳化硅压板可以在试验完成后用常温水流进行水冷降温，多次试验后压板表面仍然光滑无破损。

为了防止热电偶凸起使隔热片表面受压影响试验结果，标准编制组设计冷板结构，通过表

面开槽的方式固定热电偶位置。冷板的结构示意图如图 8 所示。通过验证试验确定碳化硅压板的耐用性和可行性后，标准编制组将热电偶固定在碳化硅冷板上组成测温模块，通过改进热电偶与设备的连接方式为插口插拔的方式，减少每次更换压板的操作过程。



图中：1-试样　2-冷面测温热电偶　3-碳化硅陶瓷冷面压板　4-冷面压板与金属压盘的卡口　5-云母片　6-试验机金属压盘　7-试验机压力载荷传感器　8-碳化硅陶瓷冷面压板　9-冷面测温热电偶　10-冷面压板与金属压盘的卡口　11-热电偶连接线　12热电偶插头

图 8 碳化硅冷面压板结构示意图

针对环境要求，在测试过程中存在热板保温升温过程和达到设定温度厚度的平衡过程，所以需要与外部较冷的实验室恒温环境进行一定隔离，此外在隔热片与热板临近接触时，受到高温作用隔热片会产生大量刺鼻气体，需要通风排出。测试受到环境影响较大，所以在测试过程中最好在具有一定密封性的测试空间，还需要在距离设备规定距离上安装环境温度计进行监控环境温度，以此来避免环境因素的影响。考虑到上述因素，本方法采用标准通风橱完全覆盖设备，在需要通风时打开通风橱电机，排出热空气和隔热片受热产生的烟气形成内外压力差，在设备底部吸入通风橱外低温空气，降低设备周围环境温度，保证测试前初始温度一致性。同时在测试前通过环境温度计测试仪器周围环境温度，并参与冷面温升计算。

关于其他影响因素的规定。设备部件方面规定了热电偶的要求，所规定精度和型号均为市场常见种类，满足测试需求。同时对设备的使用和保养提出规定，主要针对的是压板光洁度，

清理可能存在的加热板氧化和压板上之前测试样品残留物；压板平行度，经过校正和调节压力机金属压盘避免由于反复替换冷板导致上下压板不平行；因为测试过程采用定加热时间，加热时间内设备释放的热量是经过严格计算的，所以加热棒的功率达不到标准要求时要求尽快替换，防止出现设备加热功率不足的问题。

试验过程综合常见泛用方法的试验参数，同时针对不好操作的步骤、没有出处的参数、没有规定的影响因素进行补充要求，根据大量的验证试验数据进行方法设计。

首先测试环境（22±5）℃，相对湿度（50±10）%来源是新版GB/T 38031规定，在实际测试过程中发现设备热板附近环境温度由于在试验前密闭导致通风橱内温度略高于实验室温度，设定实验室温度为22℃时，通风橱内温度一般在30℃左右，但考虑到空气的比热容较大，这种温度的空气环境对试验结果的影响可以忽略，因此仅对实验室整体环境做温湿度要求、对压板的温度做温度稳态调节要求，并规定在试验开始前进行换气降温以保证每次开始试验前温度和室温控制温度基本一致。冷面压板调节温度为（22±5）℃主要参考依据为经过一轮测试后，环境温度基本难以控制在实验室恒定的22℃，提高冷板调节温度上下限可以与测试温度环境基准值匹配。冷板调节时间30min是经过验证试验后，将冷板水冷降温后置于（22±5）℃ 10min左右空冷可以调节温度至使用要求，为了保证测试结果的准确性，适当延长压板稳定冷却时间，可以通过更换经过调节的不同冷板测温模块进行快速试验。

热板加热时做热板保温要求，在冷面金属压盘上放置厚度不低于100mm，长宽为（200×200）mm的柔性硅酸铝保温棉毡，此操作步骤是考虑到热板加热过程热量散失一部分被设备周围冷空气吸收，另一部分可能通过热辐射和热对流影响金属压盘的温度，从而间接影响冷板传热效率，做金属压盘热防护有助于切断热板向金属压盘的热量传递。

加热板的规定测试温度本文件中规定未做要求时按照600℃进行，了解到目前大多数电池和整车企业采用的热扩散测试温度主要为675℃和500℃，其他测试温度受各家电池工况区别较大，所以本文件的测试条件规定其他温度可以由供需双方商定，测试温度选择依据目前主流测试温度的中间值附近。另一方面受到设备加热功率的限制，热板在没有全面热防护加热时，维持650℃左右比较容易实现，温度再提高可能出现热板温度难以恒温的情况。此外，若增加测试温度会导致设备恒温时间延长从而引起设备周围空气进一步升温，增加测试结果的误差。

加热板升温后继续保温至温度稳定1min开始测试，为了单电芯热失控模拟的传热条件，在控制热板蓄热量和热防护后，对冷板也做绝热需求，下表面加云母材料切断与金属压盘的热桥。将冷板放置好后以规定速率使试样压缩至规定载荷，在试样接触加热板的瞬间关闭加热器，仅

以加热板本身的热量进行传热温升测试。在维持一定恒压压缩后卸压至较低值并让试样继续自然降温，模拟单电芯在卸压阀启动后的隔热片工作环境。经过验证发现温度拐点在试样接触热面后30~40min左右出现。通过大量的验证试验，标准编制组发现不论样品的种类和厚度，冷热面温差平衡温度在130℃附近，将所有试验的平衡温度值与130℃温差时的经验性判据温度值做差，差值的平均值不超过1℃，低于热电偶的精度值。所以认为在冷面和热面温度差为130℃左右时达到散热平衡，即冷面温度出现拐点。

关于报告，本标准要求将采集温度绘制成温度-时间曲线。冷面测温板热电偶记录的温度-时间曲线若出现峰值，则峰值温度与测试室温的差值为冷面最高温升；若一直呈上升趋势，未见明显峰值，试验终止时温度与测试室温的差值为冷面最高温升。应报告测试采用的载荷和设定测试温度、3块试样冷面最高温升单值与平均值，精确至1℃、温度-时间曲线、测试环境室温、试样初始厚度、试验结束稳定厚度和试样试验前后状态照片。从以上参数的报告可以给应用方提供最全面的热冲击防护性能评价数据。标准编制组在充分考虑设备条件后决定不采用位移变化来表征厚度，因为设备自身受热受压也产生轻微位移，询问过设备厂家此问题，即使可以通过规定设备“硬度”，用修正的方式避免设备变形的影响，但是会大幅增加设备成本，也会由于设备使用老化产生误差，若采用红外厚度测量，在高温条件下，设备周围温度较高，会对光学测试产生很大影响，因此综合考虑以上因素，标准编制组决定不引入厚度参数对材料热冲击防护性能进行表征。

3.7.10 质量吸湿率

引用国家标准GB/T 5480，鉴于验证试验中发现隔热片芯材和封装材料均有吸湿情况，本方法要求需要经封装使用的芯材应采用封装后的整体进行测试，以保证到达用户手中的产品吸湿性能满足需要。

3.7.11 禁限用物质

禁限用物质方法引用汽车禁限用物质的国家标准GB/T 30512。

3.7.12 耐老化性能

动力电池在正常服役期间基本不会拆开更换内部的隔热材料，所以用于动力电池的隔热材料使用寿命需要与动力电池寿命保持一致。在电池正常运转过程中，电芯产生热量和热管理系统散热的共同作用下，正常运转中可能出现的最高温度在70℃左右，虽然短期内隔热片可以承受这种温度，但是受到长期热应力反复作用会使材料产生热疲劳，降低其强度和保温效果。为了满足隔热片耐老化性能的实验室加速模拟，本标准计划采用两种老化试验来进行测试，包括

目前被广泛采用的双85老化，即温度（85±2）℃、相对湿度（85±5）%长期恒温恒湿老化，另一种是根据汽车电池运行情况模拟的冷热循环老化，即高温段和低温段交替循环。

关于老化温湿度的确定说明。冷热冲击老化是根据隔热片在正常使用状态下会有-40℃至70℃左右的工作温度。通过设置冷热冲击试验，模拟在北方冬季这种比较严苛的环境中动力电池间歇性工作时，冷热交替的环境作用下防火隔热材料的性能衰减。由于设备功率和负荷原因，标准编制组经实际验证，确定升温降温过程时间为30min较为合适，不会因为快速升降温对高低温湿热试验箱产生损坏。每次循环为24h包括低温段8h、高温段15h以及升降温区间合计1h，基本符合高强度使用情形。双85湿热老化是根据85℃接近塑料件的热稳定极限，引申为电池的正常工作温度极限；湿度85%接近空气最大饱和度边缘但不存在水蒸气结露。是可以控制实验重复性条件下最为严苛的电池材料测试湿热环境。经过设备温度湿度计量，标准编制组认为需要对温湿度引入偏差使试验条件更容易达到。相对湿度偏差范围为±5%,满足设备正常运转过程中湿度波动范围，且在最高湿度点也不产生结露现象。温度偏差为2℃，考虑到老化时间较长，设备长期运转的功率保持比较困难，所以较设备计量精度1℃做外延，降低温度控制要求。

关于老化时间的说明。标准编制组对一种气凝胶材料做过长达3个月的老化试验，并通过做拉伸试验的方式对老化效果评价，发现在10天以内性能下降速度缓慢，10天至40天性能下降最快，是性能损失的主要阶段，40天后性能下降趋于平稳。因此我们认为常用的湿热试验1000h的时间设计是合理的，本标准也将双85湿热老化时间定为1000小时。冷热循环老化单次循环时间为24h，经过数据论证和为了更好计数老化天数，标准编制组将冷热循环次数定为30次。

关于老化性能表征的说明。老化试验结果是否合格通过同一种样品老化前后的性能保留率来表征。本标准选择的参数是试样热阻、表面电阻率和热冲击防护性能。选择参数的依据是要覆盖材料的传热参数、绝缘性能参数和最直观的热冲击防护性能，这样老化表征参数更为全面，且能够反映材料的真生使用效果。另外由于老化试验是要测试老化前后的试样性能，所以最好选择非破坏性试验，老化前后采用同一块试样，例如传热性能选择热阻是因为测试热阻的试样为封装材料贴近使用状态且测试温度为25℃不会对试样结构性能产生影响，经过老化后再次使用同一块试样会减少试样不均匀带来的误差。

3.7.13 抗火焰冲击性能

经过标准编制组调研了解，发现目前隔热片生产企业为了直观展示产品性能，往往会选择火焰喷射灼烧的做法，但是由于可燃气体种类、喷嘴流量、喷嘴距离试样距离等因素，试验结

果不具备可比性，不同试验参数的比较会产生较大的误导性。本标准将可能影响试验结果的因素固化并增加燃烧效果判据，将方法以规范性附录的形式给出。

标准编制组在进行验证试验过程中，发现手持式气瓶进行测试具有一定危险性且灼烧位置不够固定，通过气瓶提供火焰也会有气瓶压力下降导致火焰温度不足的情况，综合以上问题，标准编制组决定以固定式预混燃料气和氧气的加热方式进行测试。

测试夹具装置为两片中空的金属夹具夹持试样并在竖直方向固定，火焰发生器为丁烷-氧气预混燃烧发生器，喷嘴为口径1.2mm耐高温铜制直喷孔，混合室为文丘里结构，内置铜网防回火。气体控制系统采用双阀调节混合气体比例来微调火焰温度，混合气体压强为0.15MPa。火焰发生器喷嘴可以通过火焰发生器底部的机械结构进行水平转向，使喷嘴火焰达到要求后转向试样中心位置，喷嘴距离试样中心位置为（90±5）mm，保证火焰灼烧温度和气体冲击力是一致的。同时火焰发生器固定在可旋转底座上，通过先将火焰喷嘴远离试样端点火并通过调节燃气流速控制火焰温度，这里可以通过热电偶、红外测温仪或测量火焰长度的方式确定大致温度达到1200℃左右。火焰稳定后，将喷嘴通过旋转对准试样中心，喷嘴距离试样表面的距离为规定值，保持灼烧5min后停止试验。

试验结果的说明。失效判定主要针对芯材是否发生火焰击穿，在实际使用过程中气凝胶隔热片作用效果为阻隔热量和火焰，在承受高温的同时也会有压力作用，因此在较大压力火焰冲击下保证结构完整性成为隔热片的最基本要求，作为火焰灼烧试验的判定。通过验证试验编制组发现在发生火焰击穿时，背火面的热电偶温度会极速上升至 1000℃左右后达到电偶耐温极限后损坏失效，在某些表面看上去完整的试验样品上也会出现背火面温度极速上升的情况，因此将此种情况也规定为火焰击穿。此试验的结果判定包括结构层面上的完整性和功能层面的完整性。此外除去火焰击穿外，还要求在报告中记录是否有肉眼可见的形变、颜色变化，芯材中心点是否出现熔融、滴落的试验现象，供应用方参考设计使用，不参与结果判定。

3.7.14 剥离强度

引用标准GB/T 2792胶粘带剥离强度的180°剥离试验方法，作为表面带胶的封装隔热片产品胶粘性测试的一个方法，可以从侧面衡量隔热片在电池包内的胶与电芯和隔热片接触面上的界面抗剪切水平。因电池工艺和胶粘工艺分类较广，试验方法除了引用国标检测方法外，还额外规定了剥离试验的参数可由供需双方商定，提高标准的可操作性。

3.7.15 检验规则

标准的检验规则是根据气凝胶隔热片的生产批量和产品性能测试需求制定的，要包括适用生产企业检验的出厂检验规则、适用第三方检测机构或政府机关抽检的型式检验规则、样品组批规则、样品抽样原则以及判定规则。

出厂检验试验除压缩、绝缘和热冲击防护性能外均为非破坏试验，三项破坏实验是隔热片产品关键的使用性能，出厂检验要求把部分简单试验与关键试验结合，以最低的要求给生产企业流水线检测降低要求。

型式检验是针对标准全项的检测，型式检验的项目按照封装和芯材两大类，之后又特别规定封装产品按照标准第四章分类要求以芯材种类分类。在不同分类对应所有标准试验项目中，按照通过验证试验数据得到的试验关键性将试验项目分为必做、选做和不做，在标准正文中就不再设置选做试验，把实验项目的选择权放到型式检验中，简化了标准项目选择步骤，使检验检测更加清晰明了。

组批和抽样按照一般的生产企业单批出货量进行估计得到。判定规则中，针对气凝胶高定制化特性，考虑到在标准实施过程中会有大量非标参数试验进行，因此除去要求完全按照本标准试验的项目指标符合标准指标要求外，额外增加了非标试验指标符合供需双方要求，这两部分是产品的合格判据。

四 验证试验报告

在标准制定的启动会上参会专家及代表根据现阶段产品的使用工况、产品能达到的性能、引领行业发展的角度，确定了 12 项验证试验，分别是垂直燃烧、压缩性能、尺寸稳定性、击穿电压、体积电阻率、25℃热阻、高温导热系数、热冲击防护性能、吸湿率、禁限用物质、湿热老化、抗火焰冲击性能。

验证试验开始前共收集到 8 家企业生产的 19 种样品。其中芯材中有玻纤芯材 4 种、预氧丝芯材 3 种、陶纤芯材 5 种、其他类芯材 1 种，封装产品中玻纤基 2 种、预氧丝基 3 种、陶纤基 1 种。具有生产企业和产品种类的广泛代表性。

4.1 关于垂直燃烧试验产品性能指标的验证

标准编制组对所有收集的产品进行垂直燃烧试验。部分具有代表性的燃烧过程和燃烧前后试样状态如图 9、10、11、12 所示：

对芯材来说，所有验证样品均未发生蔓延到夹具现象和滴落物引燃脱脂棉现象，仅部分验证样品出现引燃后续燃时间超过标准要求情况。陶瓷纤维气凝胶芯材均未发现被引燃，试样底部被火焰灼烧部位有颜色变化；预氧丝气凝胶芯材均未被引燃，但如图 9．a）所示，试样均存

在程度不一的厚度截面弯曲和长度方向收缩现象，是由试样局部受热产生热应力集中使试样产生不均匀收缩引起，弯曲较为严重时会使火焰偏离试样测点位置，有些试验甚至会灼烧试样表面，试验前后状态如图 11 所示，除试样变形外无明显灼烧痕迹；玻纤气凝胶制品部分试样出现被引燃情况，如图 9．b）所示，在火焰接触试样后，引火源火焰内部试样表面明显有新的火焰出现，说明玻纤制品已被引燃，移开火源后，续燃时间一般均会超过 10s，且部分样品会出现火焰蔓延情况，某组较为典型的玻纤制品燃烧情况如图 10 所示，可以看出所有试样均出现火焰蔓延情况，由于试样不均匀性，蔓延长度会有差别。此外，玻纤制品灼烧后部分试样出现开裂情况，如图 9．c）所示，此种情况可能出现由于试样底部开裂使火焰熄灭的情况。根据燃烧性能 GB/T 2408 中点 V0 级指标要求，每根试样的有焰燃烧时间≤10s、五根试样有焰燃烧时间总和≤50s、每根试样第二次施焰后有焰燃烧时间加无焰燃烧时间≤30s、不存在蔓延到夹具现象和滴落物引燃脱脂棉现象，确定部分产品芯材不满足垂直燃烧要求，因此，本标准要求不论产品是否封装垂直燃烧试验项目为必做试验，以保证隔热片产品本身具有一定阻燃特性，防止在工况条件下成为可燃物增大火势。

对封装样品来说，验证样品中大部分试样是可以被引燃的，受膜材料中阻燃成分含量影响，燃烧的剧烈程度不同，如图 9．d）、9．e）所示，两种试样一种仅在底部被小部分引燃，移开火源后快速熄灭，另一种火焰火势较猛，以较快速度燃烧指夹具。因此在垂直燃烧判据中，可能存在续燃时间和燃烧蔓延程度不合格两种情况，如图 12 所示，三种试样分别为燃烧蔓延程度不合格、续燃时间不合格和符合 V0 级判据。从验证试验发现，在有封装膜保护的情况下，芯材基本未有明显的被引燃痕迹，因此对于封装样品来说，膜材料的燃烧热性决定产品是否满足 V0 级判据。

9．a）　9．b）　9．c）　9．d）　9．e）

图 9 垂直燃烧引燃过程

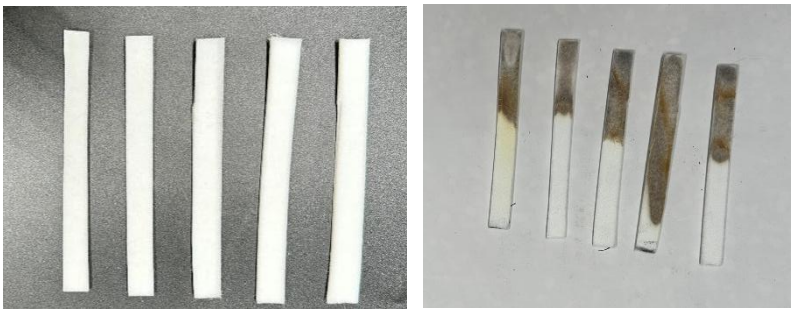


图 10 被引燃玻纤芯材试验前后照片

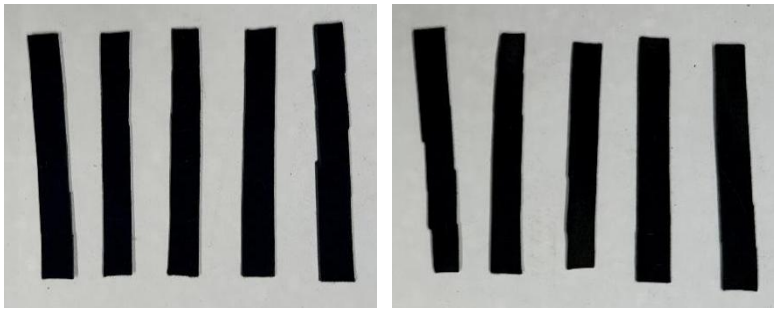


图 11 预氧丝芯材试验前后照片

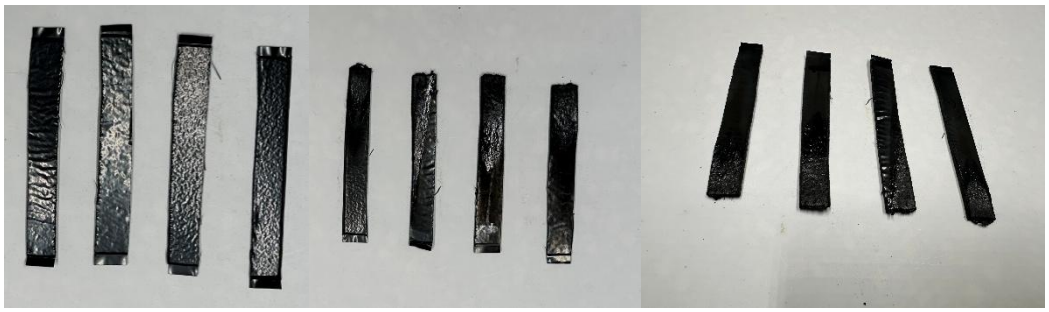


图 12 3种不同的封装试样试验后照片

综合芯材和封装样品的验证试验，每组试样平均燃烧长度和平均续燃时间汇总图如图13所示。分析数据和试样状态可以总结得到，芯材测试13组，有1组玻纤制品所有试样均不符合V0级判据，另一组玻纤制品有1根不符合续燃时间判据，经过增加测试组数发现其续燃属于偶然情况，可能由于试样表面污染导致。封装样品测试6种，3组试样通过V0级判据，2组试样不符合燃烧蔓延程度判据，1组试样不符合续燃时间判据。

通过验证试验可以说明芯材的阻燃效果比膜材更强，封装试样是否可燃与芯材无明显关系，膜材料为气凝胶隔热片燃烧性能的主要贡献结构，但由于芯材不能完全排除其具有可燃性的可能，因此将垂直燃烧试验作为所有类型气凝胶隔热片制品的必做项目。封装样品的燃烧情况取决于表面膜材性质，且相较于芯材不合格概率更高。为了保证气凝胶隔热片产品的使用性能，

测试垂直燃烧性能是有必要的，鉴于验证试验情况和目前V0级分级判定的指标接受程度较高，不对隔热片燃烧性能等级做加严要求，按照GB/T 2408中规定的V0级要求进行判定。

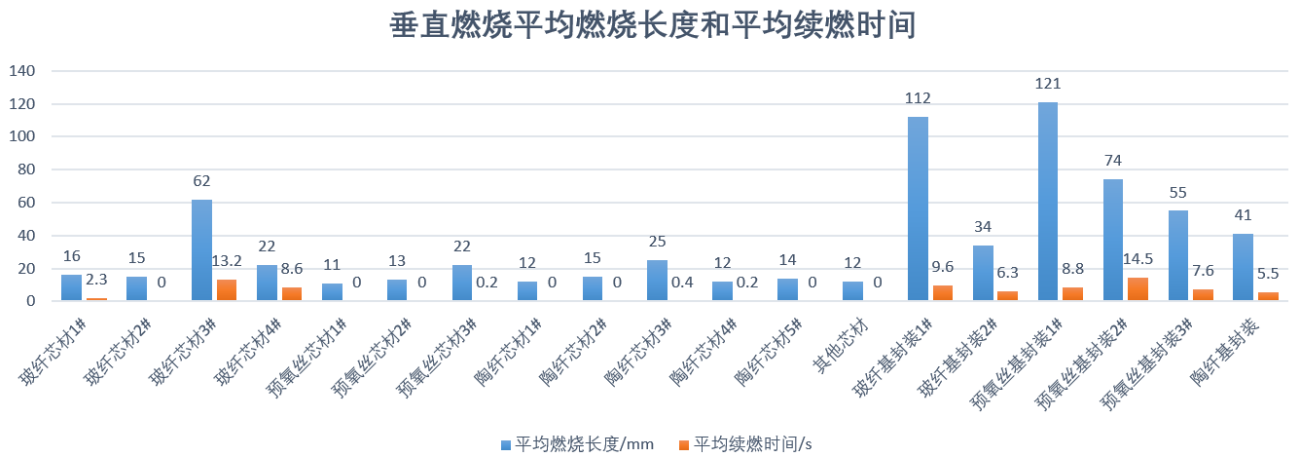


图 13 垂直燃烧每组试样平均燃烧长度和平均续燃时间汇总图

4.2 压缩性能

4.2.1 压缩弹性模量

压缩弹性模量试验进行预实验时发现隔热片厚度太薄，不利于测试加压过程位移并且可能存在强力机超载情况，所以标准编制组将验证试验调整为厚度通过叠加至少 5mm 并报告叠加层数。经过预实验不同尺寸的试样，发现面积越大的试样需要压力越大，对设备要求过高，因此本方法的验证试验后续均采用尺寸为（100×100）mm 进行测试。对玻纤、陶纤和预氧丝三种芯材的试样分别测试 6 组，每组中封装后的试样在编号后增加封装备注进行区分。其压缩弹性模量测试数据如下：

表 1 压缩弹性模量测试数据

编号	面积/cm2	试验厚度/mm	试样层数	F（5%形变时载荷）/N	F（10%形变时载荷）/N	模量/kPa	是否取弹性段
玻纤 1 封装	100*100	6.25	6	203.40	1322.31	2644.62	否
玻纤 2	100*100	6.18	6	199.42	901.21	1802.42	否
玻纤 3	100*100	7.90	6	200.89	2534.27	2540.70	否
玻纤 4	100*100	6.15	2	235.90	1218.4	1364.87	是
玻纤 5 封装	100*100	7.33	6	201.6	1277.18	2554.36	否
玻纤 6	100*100	9.57	7	200.83	751.08	1502.16	否

预氧丝 1 封装	100*100	9.49	3	426.92	974.42	1781.74	是
预氧丝 2 封装	100*100	9.99	3	439.16	1260.25	1724.64	是
预氧丝 3	100*100	10.30	3	198.71	358.07	716.14	否
预氧丝 4	100*100	9.80	3	435.51	1047.95	1792.31	是
预氧丝 5 封装	100*100	9.96	3	540.31	1599.61	2989.14	是
预氧丝 6	100*100	9.65	3	201.35	1108.78	1192.83	是
陶纤 1	100*100	6.62	3	198.52	790.51	1581.02	否
陶纤 2 封装	100*100	8.55	3	489.23	1179.03	3262.36	是
陶纤 3	100*100	6.78	4	200.44	240.89	481.78	是
陶纤 4	100*100	9.05	2	339.23	1108.84	2291.10	是
陶纤 5	100*100	10.01	6	199.99	279.87	559.74	否
陶纤 6	100*100	6.22	3	198.97	750.25	1500.50	否

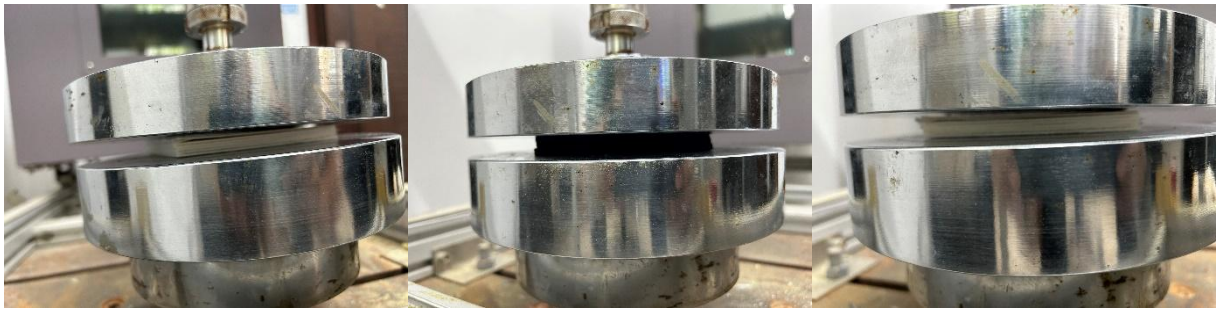


图 14 三种芯材的隔热片压缩弹性模量试验过程

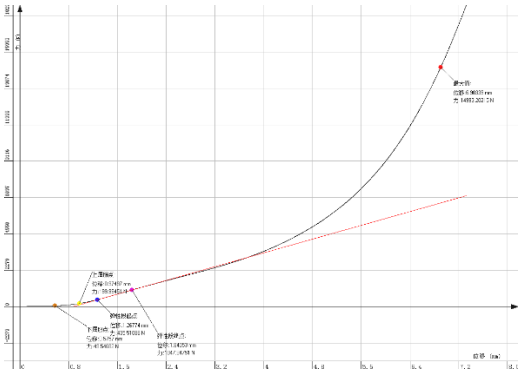


图 15 有明显弹性段加载曲线

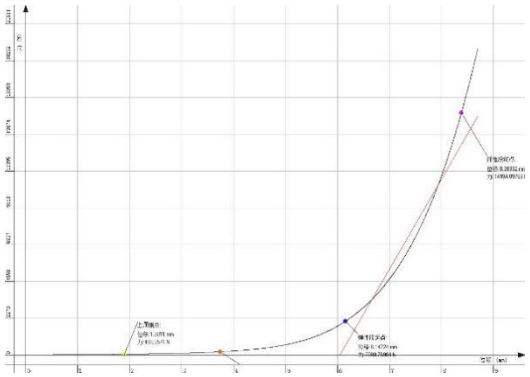


图 16 无明显弹性段加载曲线

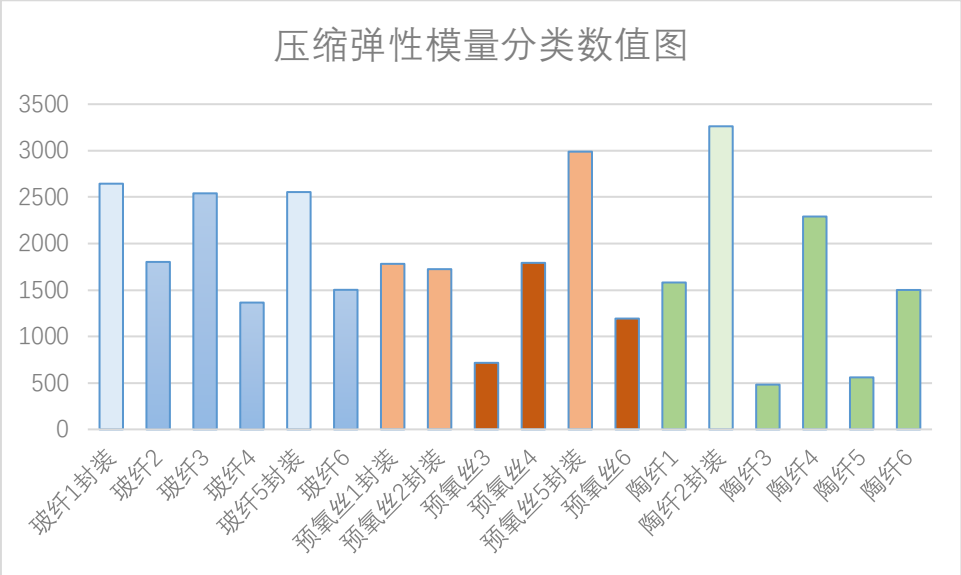


图 17 压缩弹性模量分类数值直观图

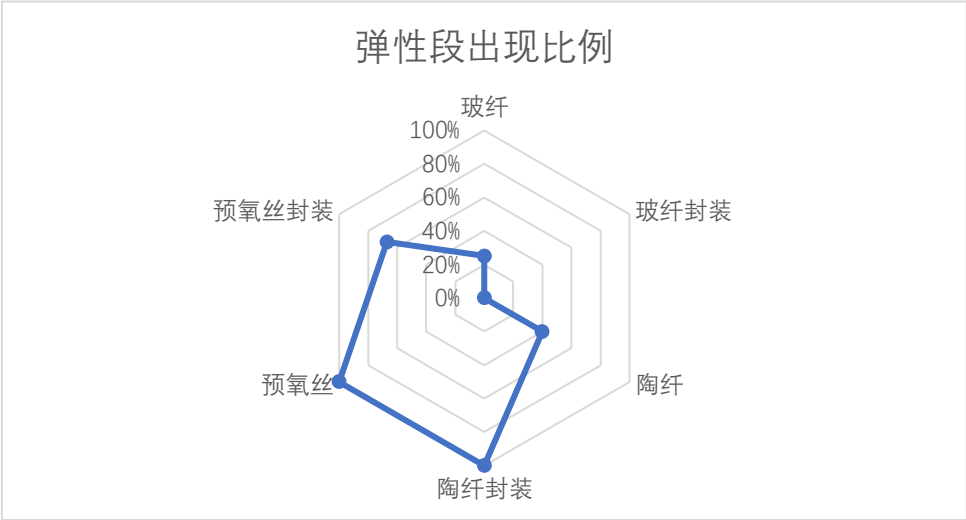


图 18 压缩过程出现弹性段的比例图

将表 1 数据按照产品种类和是否封装以压缩弹性模量值做分类数值直观图，如图 17 所示，其中玻纤产品以蓝色系柱状图表示、预氧丝产品以橙色系柱状图表示、陶纤产品以绿色系柱状图表示，为了区分其中的封装后的产品，以同色系较浅颜色表示。从图中可以明显看出，不同种类芯材产品的压缩弹性模量值有一定差别，整体表现为玻纤制品压缩弹性模量较高，预氧丝制品压缩弹性模量较低，陶纤制品压缩弹性模量不同生产企业间数值跨度较大，部分产品在长期存放吸湿后硬度下降较为明显，所以陶纤制品存在部分较低数值的试样组。封装后的产品压缩模量普遍较高。

在验证试验过程中受每组试样的工艺和成分影响，会出现类似图 15 所示的有明显弹性段的加载曲线，这种类型的模量结果采用弹性段进行计算；类似图 16 所示的没有明显弹性段的

加载曲线，这种类型的模量结果采用规定的位移变化量区间的两点进行计算。将验证试验中出现弹性段的实验组数和此分类所有试验组数做比，绘制成弹性段出现比例图，可以看出预氧丝制品和封装产品出现弹性段的比例较高，因封装产品的数量较少，其他得到的结论不具备参考性价值，也不能将产品分类作为使用何种计算方法的判据。接下来以 3 种芯材的大类为基础分析验证结果和数据指标选取情况。

在 6 组玻纤制品验证试验中有 5 组试样试验过程未见明显弹性段，采用规定位移区间的计算方式。存在 1 组具有明显弹性段样品，以其弹性段计算压缩弹性模量。经过标准编制组考虑，决定以无明显弹性段产品为玻纤制品的代表样品，其最低压缩弹性模量为 1.5MPa 以上，基本符合玻纤制品的压缩弹性模量描述需求。

在 6 组预氧丝制品验证试验中 5 组试样出现弹性段且数值均超过 1.0MPa，不存在弹性段的产品仅有一组且其数值未达到 1.0MPa，是否为封装样品对于预氧丝气凝胶来说对压缩弹性模量仅有数值上的影响，对产品是否存在弹性段无明显影响。因此预氧丝制品的指标数值可以定为 1.0MPa 以上是可以接受的。

陶纤制品验证试验中有无弹性段的验证试验数量均等，其中除去验证样陶纤 3 外，具有弹性段的样品压缩弹性模量大一些，但 6 组数据中存在两组数据较低的值，经过手指按压确实发现这两种样品的硬度较低，可能在实际应用时与硅胶边框结合，通过边框的支撑作用维持压缩厚度。陶纤制品的弹性模量指标值较难确定。

综合以上分析，鉴于压缩弹性模量试验的设置初衷是给应用企业提供试样硬度参考，给供需双方材料性能检测提供方法，所以经过标准编制组和各生产应用单位讨论确定，将此性能的指标按照数据下限确定，不做严格的合格判定，而是作为必做试验项目给应用单位提供选择产品的数据支撑。标准编制组在设计性能指标时不会按照芯材种类进行区分，决定采用较低的指标值保证产品不会因为此项参数出现不合格项，把参数指标确定为 0.5MPa，以筛选具有明显压缩问题的产品。

4.2.2 规定载荷压缩曲线

规定载荷压缩曲线测试试样尺寸厚度与压缩弹性模量保持一致，测试获得的曲线及数据如下所示，所有验证样品均呈现类指数型曲线，没有结构破坏的标志性屈服点。曲线经过遍历来抓取特征点较为简单，测试同一种样品重复性较好。同样因测试项目为应用方必需且需要具体数据参考，与动力电池设计和工艺有关，与生产产品没有直接合规性关系，因此，本测试项目要求提供压缩曲线和特征点，合格性判定是是否出现屈服，即压缩过程产品是否发生结构性破

坏。

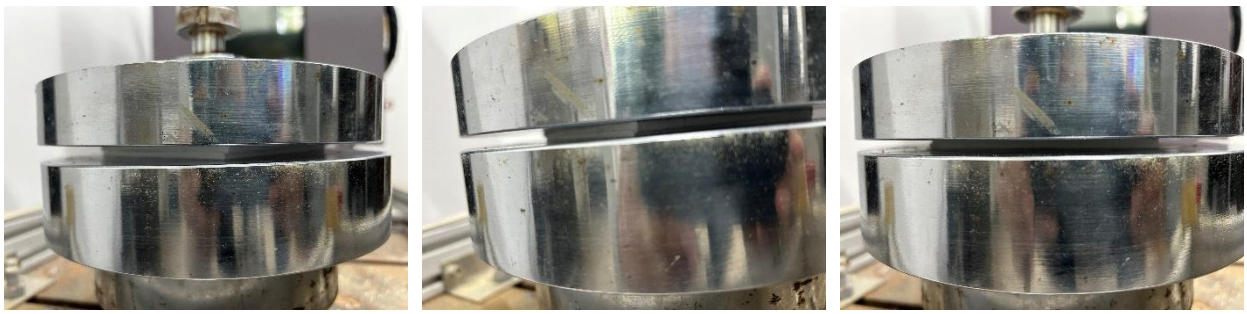


图 19 隔热片规定载荷压缩曲线试验过程

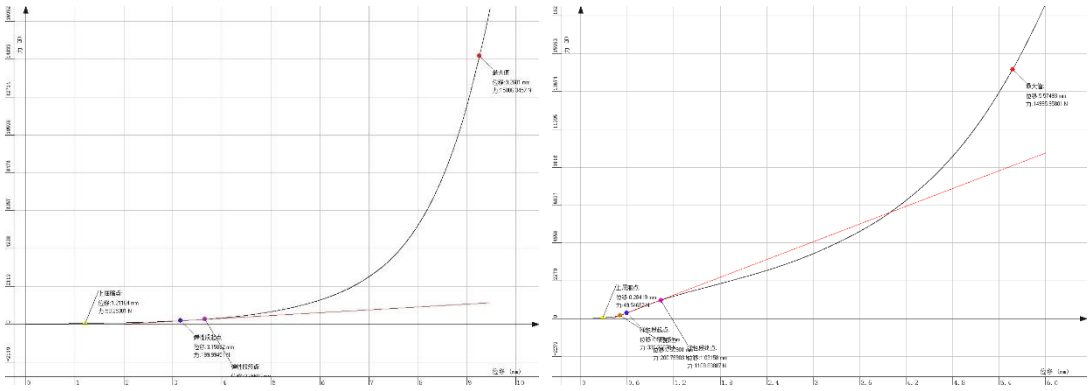


图 20 陶纤产品代表性压缩曲线

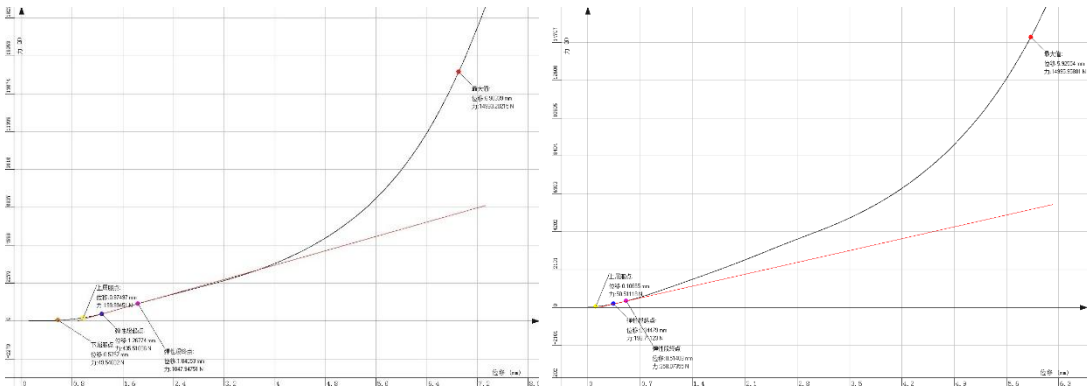


图 21 预氧丝产品代表性压缩曲线

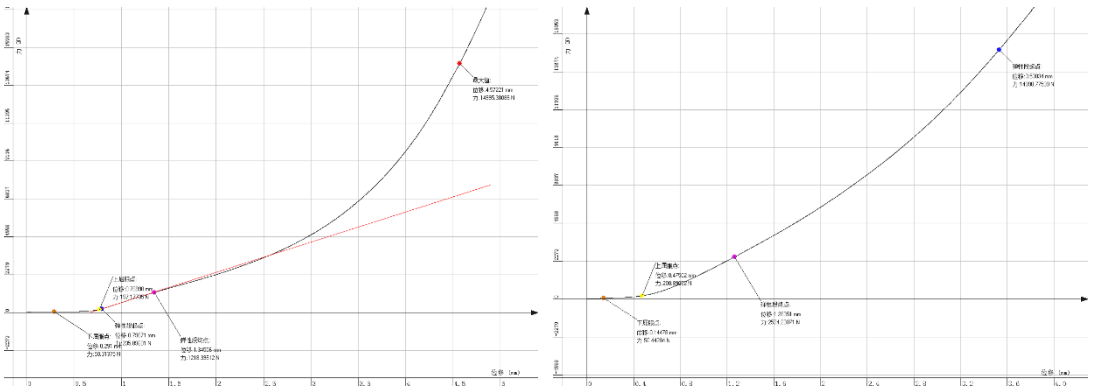


图 22 玻纤产品代表性压缩曲线

表 2 规定载荷压缩曲线测试数据

编号	厚度	层数	零载厚度	封装厚度	开阀厚度	损坏厚度
玻纤-1	9.74	7	10.02	9.74	3.98	/
玻纤-2	6.24	6	6.40	6.24	3.70	/
玻纤-3	7.30	6	7.58	7.30	4.83	/
玻纤-4	6.32	6	6.50	6.32	2.98	/
玻纤-5	7.90	6	8.20	7.90	4.40	/
陶纤-1	6.22	3	6.46	6.22	3.26	/
陶纤-2	8.63	3	8.86	8.63	3.80	/
陶纤-3	7.53	4	10.12	7.53	1.66	/
陶纤-4	9.05	2	9.28	9.05	3.76	/
陶纤-5	10.01	6	11.96	10.01	1.96	/
预氧丝-1	9.65	3	9.98	9.65	3.38	/
预氧丝-2	9.93	3	10.15	9.93	4.02	/
预氧丝-3	10.30	3	10.53	10.30	4.48	/
预氧丝-4	9.80	3	10.19	9.80	3.47	/
预氧丝-5	9.96	3	10.16	9.96	4.05	/

规定载荷压缩曲线测试数据表格分析，经由 1.0MPa 最大压力压缩的全过程曲线进行数值遍历，找到压强为规定值的各特征点的位移，并通过以测厚仪测试的封装厚度为基准进行计算，得到各特征点的厚度值。此时表格中的数据代表在气凝胶隔热片某一工作压力条件下的厚度，可以供应用单位进行数据分析。将三种特征点厚度绘制成图，如图 23 所示：

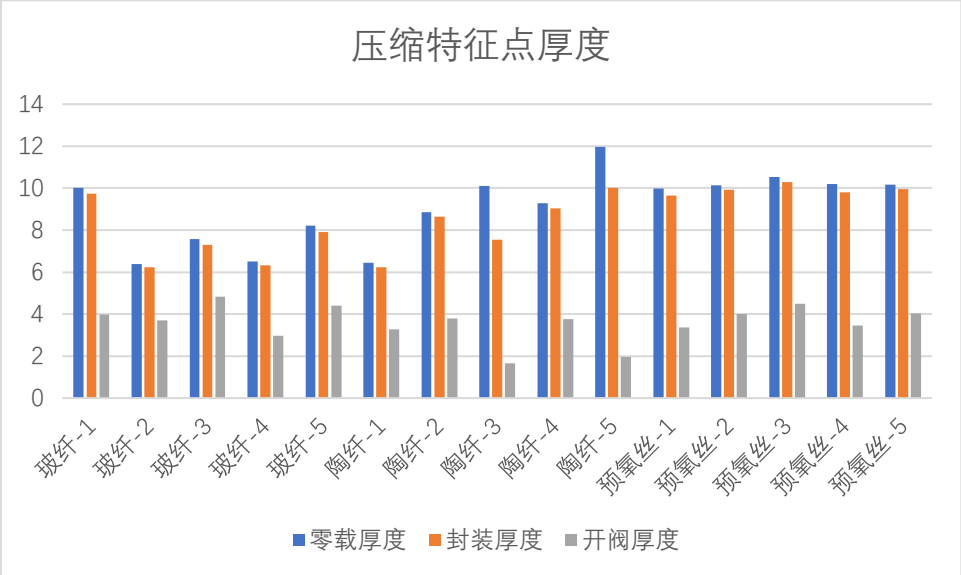


图 23 规定载荷压缩曲线特征点厚度

从图 23 中，可以较为明确地看出除部分压缩弹性模量较差的样品外，均呈现零载厚度与封装厚度差别较小的趋势，可以说明封装厚度可以作为描述产品厚度的特征数值。开阀厚度值普遍不足封装厚度 50%，说明在压力达到 0.9MPa 时，试样的厚度保留率基本低于 50%。与热冲击防护性能产生的热压缩过程进行类比，因为试样在达到规定压力时的压缩比例较大，所以通过测试试验过程中的最大压缩率是很难对产品进行合理表征，同时鉴于热台设备位移测试精确度问题，继而放弃以高温压缩量作为结果判据，以高温高压试验前后试样的厚度保留率作为产品热冲击防护性能的参数，反映产品受热冲击后的回复能力和受热冲击结构破坏度。

在规定载荷压缩曲线测试过程中，发现继续增大压力会导致部分试样破损，出现屈服点，在实际使用过程中就表现为在承压达到某一值时隔热片产品碎裂或结构坍塌，失去保护效果。鉴于本实验主要目的是提供全过程曲线和特征值点，因此不考虑超过规定载荷的屈服点，判定指标定为在规定载荷范围内是否出现屈服，满足实际使用时达到开阀压力前气凝胶隔热片不发生由受压导致的结构性破坏，目前所有验证样品均符合要求，是一个数据参考型的宽松指标要求的试验项目，给生产应用企业更多产品灵活性的同时提供一个统一比较性能的方法手段。

4.3 尺寸稳定性

标准编制组采用强力机和高低温环境箱的组合进行验证试验，并与金属板螺丝夹紧方式测得的数据进行比较后，发现相同产品的尺寸变化率两种测试方法接近，强力机和高低温环境箱的组合进行验证试验虽然控制厚度、温度等参数更精确，但是占用试验设备时间长试验效率低，无法同时进行多组试验，所以编制组在标准方法中仅规定受力和温度，不对如何实现做详细规定，方便各标准应用单位根据自身实际情况选用方法。

通过两片光滑金属板将试样夹住，并通过测厚仪测量试样封装厚度来确定试样的压缩量，再通过金属板四角的紧固螺丝，在塞尺的矫正下将试样压缩至规定厚度，之后将整体装置置于-40℃冰箱和 70℃电热鼓风干燥箱中进行试验，测试实验前后试样尺寸变化，试验过程部分图片如下：

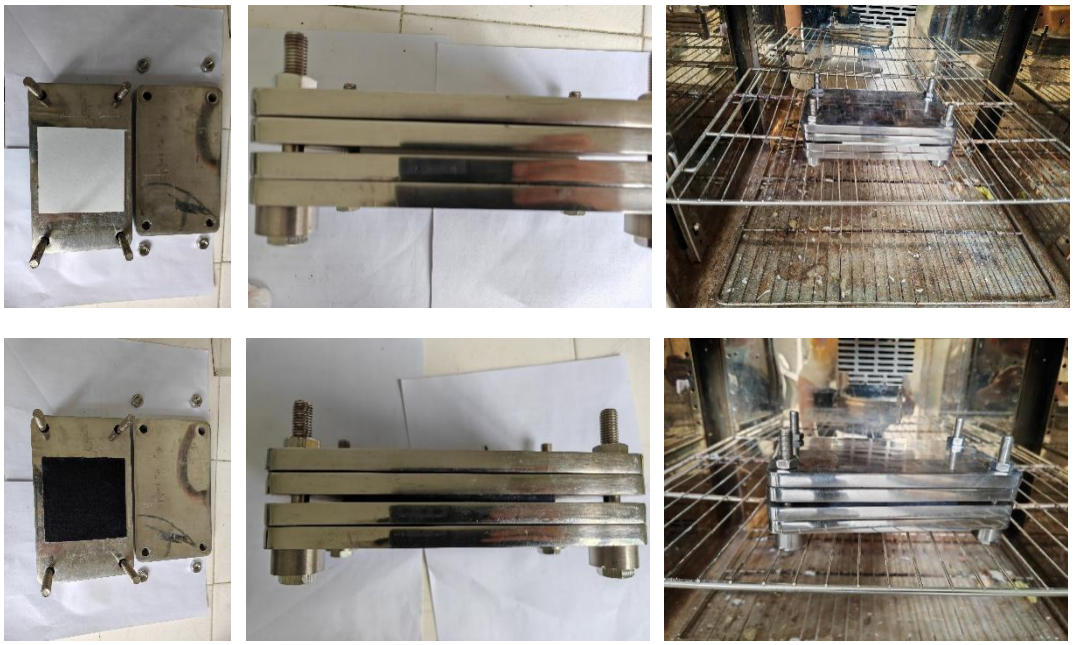


图 24 金属夹板螺丝紧固尺寸稳定性试验过程

尺寸稳定性-40℃试验结果如下：

表 3 尺寸稳定性-40℃试验结果

编号	密度	尺寸稳定性-40℃		
		长度变化率%	宽度变化率%	厚度变化量/mm
预氧丝-1	180	0.00	0.00	0.03
预氧丝-2	194	0.00	0.00	0.04
玻纤-1	292	0.00	0.00	0.01
玻纤-2	258	0.00	0.00	0.02
玻纤-3	280	0.00	0.00	-0.01
陶纤-1	412	0.00	0.00	0.02
陶纤-2	311	0.00	0.00	0.05
陶纤-3	188	0.00	0.00	0.09

陶纤-4	293	0.00	0.00	0.05

经验证试验数据分析，所有验证样品在-40℃环境中经过一段时间保温长度和宽度几乎没有发生变化，厚度方向出现不同程度的收缩情况，并且与试样芯材种类具有相关性。经分析玻纤芯材的低温尺寸稳定性最好，出现负值的主要原因为测试误差。预氧丝和陶纤芯材厚度变化量相对玻纤更大，标准编制组分析其中影响因素，发现同一种芯材的产品密度越大厚度变化量越小。密度是材料硬度的一个影响因素，将试样压缩性能与厚度变化量进行对应，发现硬度越小的产品低温厚度变化率越大，这可能与测试时采用压板进行压缩的操作有关。因此，测试时带有一定压力进行相应温度处理的方式与直接将样品暴露在温度环境中的方式相比，可以更好模拟隔热片的作业工况，数据更具参考性。

尺寸稳定性 70℃数据如下：

表 4 尺寸稳定性 70℃试验结果

编号	**密度**	**尺寸稳定性 70℃**		
		长度变化率%	**宽度变化率%**	**厚度变化量/mm**
预氧丝-1	180	1.50	1.00	0.38
预氧丝-2	194	0.80	0.70	0.08
玻纤-1	292	0.02	0.00	0.06
玻纤-2	258	0.00	0.00	0.00
玻纤-3	280	0.01	0.00	0.02
陶纤-1	412	0.00	0.00	0.05
陶纤-2	311	0.00	0.02	0.07
陶纤-3	188	0.00	0.00	0.04
陶纤-4	293	0.00	0.01	0.04

经验证试验数据分析，除预氧丝芯材试样外，玻纤和陶纤芯材试样长度宽度均未发生明显变化，两组预氧丝芯材试样的数据差别较大。在厚度变化量方面，基本所有试样均出现厚度变化，变化量集中在 0.04~0.08mm，也有一组长宽变化率较大的预氧丝试样厚度变化量为 0.38mm，远超过其他产品种类。产品受热反映并无明显的规律性，仅可从单体试样的结果来进行判定。

综合冷热尺寸稳定性验证试验数据确定参数指标，因经过冷热处理试样的长度和宽度变化量不明显，因此根据应用方提出的供货需求，将长度和宽度的指标定为变化率不超过 1%。厚

度方向的变化量较为明显，根据标准编制组讨论，确定厚度变化量不超过 0.10mm。经验证数据指标判定分析，认为 70℃预氧丝-1 数据偏大，不符合验证试样的整体水平，应不考虑将其作为指标的参考数据。

4.4 击穿电压

击穿电压引用 GB/T 1695《硫化橡胶 工频击穿电压强度和耐电压的测试方法》中的板状测试方法。试样尺寸为 100*100mm，采用击穿电压值为 35 千伏的变压器油为试验介质，试验方法为先从 0 开始连续升压直至试样被电压击穿，然后按照连续升压测得的电压值选择合适的参数进行逐级升压，逐级升压的升压速率按照 GB/T 1695 标准文本中表 4 的要求进行，每级停留时间为 1min。标准编制组对老化前后的玻纤、陶纤制品和封装后的玻纤、陶纤、预氧丝制品进行了击穿电压试验，测试结果如下表所示：

表 5 击穿电压试验结果

编号	厚度 mm	连续加压击穿值 kV	逐级加压击穿值 kV	击穿电压结果 kV/mm
玻纤-老化前	1.10	1.67	3.78、3.51、3.84、8.45、5.35	3.75
陶纤-老化前	3.38	11.50	16.65、16.71、19.12	5.17
玻纤-老化后	1.06	1.75	4.43、4.53、7.76、5.43、5.23	4.63
陶纤-老化后	3.40	14.62	14.11、14.09、13.67	4.10
玻纤-封装	2.40	8.46	10.79、10.82、10.84	4.51
陶纤-封装	2.20	6.46	11.02、10.96、11.10	5.01
预氧丝-封装	2.30	10.18	11.92、12.01、11.87	5.19

考虑到击穿电压会出现闪络电火花，可能存在引燃试样和变压器油的可能，且测试设备使用工况会有几十千伏高压电流，若失火可能造成严重影响。因此在喷火灼烧试验后出现表面燃烧的预氧丝制品和垂直燃烧中被引燃的玻纤制品不进行芯材的击穿电压试验。

所有测试样品的试验组包含 3~5 块试样，每块试样测试击穿电压前使用测厚仪测试厚度。为了方便计算和表示，标准编制组将每组所有试样的厚度取平均值后，在本文表格中见厚度一栏。同时按照每块试样的测试结果与厚度的比例进行换算，得到平均试验厚度的击穿电压值，见表格中逐级加压击穿值一栏。连续加压击穿值仅作为实验的参考数据不参与计算，因此每组

仅测试一次，数据见表格中连续加压击穿值一栏。因为厚度对击穿电压值的影响很大，所以要衡量单位厚度的击穿电压，通过逐级测试所得结果的平均值除以试样的平均厚度得到每 1mm 试样的击穿电压进行比较和合规性判定。

在封装制品的验证中，相同厚度的产品击穿电压值基本一致，说明以同一种封装材料封装的试样，击穿电压与芯材关系不大，主要受封装膜导电能力的影响。从数据来看，封装制品击穿电压单值分布比芯材均匀得多，说明击穿电压试验采用封装产品测试的可靠性和重复性较高。封装制品的击穿电压要普遍大于芯材的击穿电压。

在验证试验中，如图 25.a）所示，即使电极的测试面积较大，但是击穿点基本上为直径约为 1mm 左右处于电极范围内的点，易产生误差。气凝胶隔热片芯材由于具有多孔结构，容易出现某处较大的孔隙正好处于击穿电压电极测点情况，导致数据偏离较大。例如在老化前玻纤测试中，具有一组较大值，经试验后观察测点微观形貌发现是较为致密的部位，但是除去电极测点部位外此试样大多数区域是有孔隙的，因此数据较低的值是普遍结果，较大值应在计算时舍去。鉴于芯材测试的数据不均匀性，需要对测试结果引入精密度计算。对比玻纤和厚度较厚的陶纤制品的数据，发现厚度较厚的产品击穿电压值较高，所以在比较时应该引入厚度进行比例计算。如图 25.b）所示，在测试过程中发现部分玻纤制品被变压器油浸润的效果较差，可能导致实验结果偏差，因此标准文本中增加试样处理要求在实验前将试样放入变压器油中浸润后再进行测试，保证试样测试时处于浸润完全的状态。测试未经封装的制品时，由于气凝胶的多粉体、多纤维的特性，变压器油中会分散大量细微气凝胶粉和玻纤颗粒，导致变压器油变浑浊且基础击穿电压值可能发生变化如图 25.c）所示，如果想保证试验过程的一致性需要在实验过程多次更换变压器油，会给实验增加不必要的成本。

25.a）

25.b）

25.c）

图 25 击穿电压误差分析情况

综合多方面考虑，编制组认为若产品的应用状态为未封装试样，应测试芯材的击穿电压，测试前应将试样放入变压器油中充分浸润至没有气泡才能开始测试，同时测试结果要满足精确

度要求，不满足时需要增加测试组数。封装试样应按照标准要求测试击穿电压，并按照厚度换算成单位厚度的击穿电压值参与判定。根据验证试验结果，编制组认为击穿电压的指标应为4kV/mm。

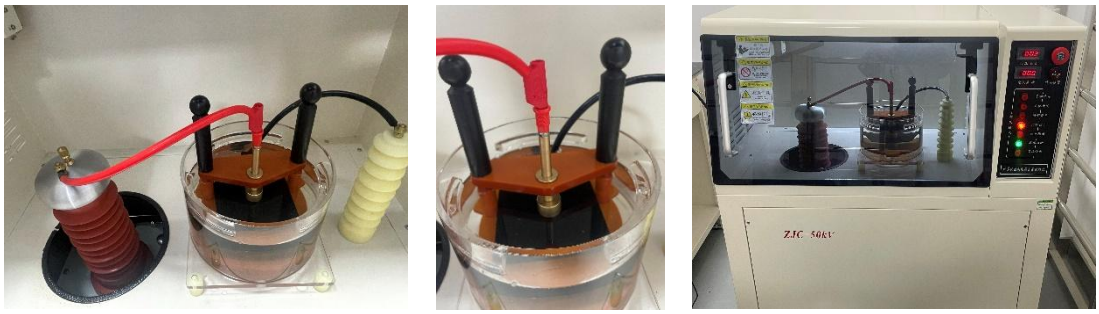


图 26 击穿电压验证试验过程

图 27 击穿电压验证试验封装试样

为验证湿热老化和封装试样对产品的影响，标准编制组对同一种芯材的产品做双 85 湿热老化和封装处理，分别测试其老化前后和封装后的击穿电压值。击穿电压采取先连续加压得到粗略的数值后再在低于以上参考值的电压为起点进行逐级加压试验，以 3 次试验的平均值作为击穿电压最终结果。发现老化后的击穿电压值变化不明显，有些试样和封装样品存在老化后击穿电压值升高的情况，因此不将击穿电压作为老化前后的试验参数。

4.5 体积电阻率

按照 GB/T 31838.2《固体绝缘材料 介电和电阻特性 第 2 部分：电阻特性(DC 方法) 体积电阻和体积电阻率》的测试方法，试样采用长宽为 100mm 厚度为原始厚度的试样，测试电压值为 1000V，极化 60s 后读取示数。测试电极的尺寸为 21.7cm^2。以下为测试试样、测试设备和测试过程图片。

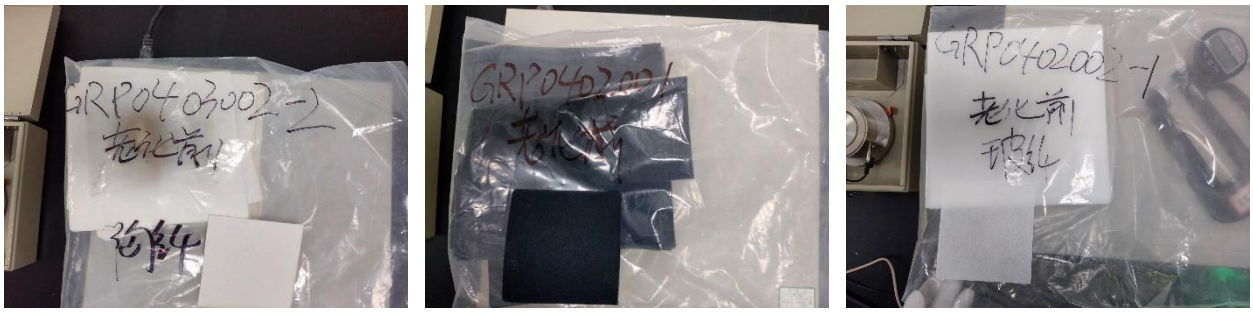


图 28 体积电阻率验证试验试样

图 28 体积电阻率验证试验试验设备及过程

体积电阻率所得验证数据如下表所示：

表 6 体积电阻率试验结果

验证样编号	厚度 mm	体积电阻值 MΩ	体积电阻率 MΩ·m
预氧丝 1	3.3	1676	1102
预氧丝 2 老化前	3.2	263700	178822
预氧丝 2 老化后	3.1	688.1	482
玻纤 1 老化前	1.1	310500	612532
玻纤 1 老化后	1.1	68190	134520
玻纤 2 老化前	1.3	187400	312814
玻纤 2 老化后	1.3	8556	14282
玻纤 3 老化前	1.5	102600	148428
玻纤 3 老化后	1.5	456.7	661
陶纤 1 老化前	2	22960	24912
陶纤 1 老化后	2	7634	8283
陶纤 2 老化前	2.9	588300	440211

陶纤 2 老化后	2.9	197700	147934
陶纤 3 老化前	4.5	11890	5734
陶纤 3 老化后	4.5	8862	4273

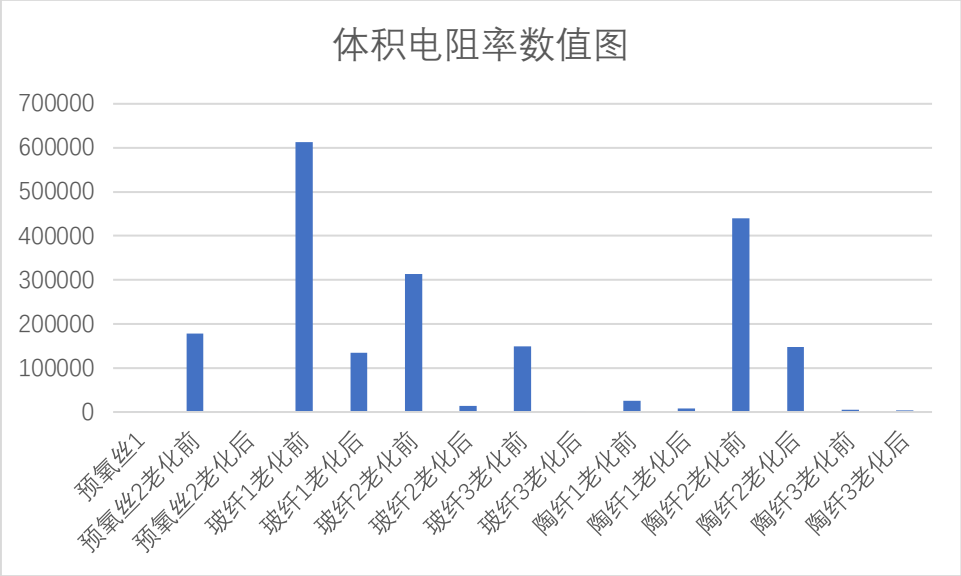


图 29 体积电阻率验证试验数据

按照表 6 中的数据绘制体积电阻率数据图，可以看到所有芯材产品均存在老化前体积电阻率大于老化后体积电阻率的趋势，不同类型芯材和不同厂家生产的芯材之间体积电阻率的差别较大，不具备分类做指标要求的基础，因此参考标准 GB38031 中的电气安全性要求进行换算，得到安全表面电阻率的数值为 500MΩ，验证样品中存在部分样品数据接近此安全线，鉴于验证试验情况，在产品完成封装后电阻指标还会进一步提高，因此标准编制组认为应适当提高指标要求，将指标定为 1000MΩ·m 即 1×10^{10} Ω·m。

验证试验采用每组 3 次测试取平均值，发现部分数据差异性较大，就将同一种样品重复测试 5 次，试验结果分别为 4360、4434、6398、5687、4259，发现由于芯材属于多孔材料，所以存在不均匀情况，在测试 3 组值取平均时，要按照标准 GB/T 31838.2《固体绝缘材料 介电和电阻特性 第 2 部分：电阻特性(DC 方法) 体积电阻和体积电阻率》规定的方法计算精密度是否满足要求。

4.6 平均温度 25℃热阻

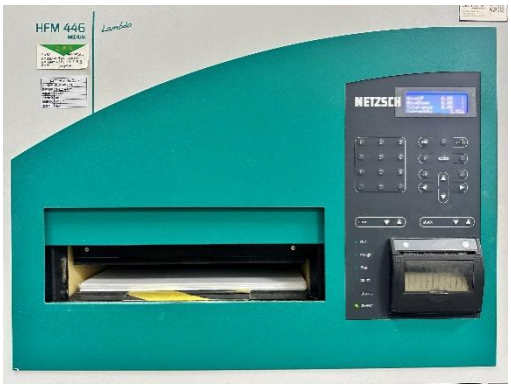
采用 GB/T 10295《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定热流计法》的方法测试热阻。如图 30 .a）所示，试样在测试区域内边缘热防护与试样间存在间隙，若试样尺寸不足以覆盖设备有效计量区域，则数据可靠性较差。为了保证稳态测试精确度，避免表面层的边界效应影响，测试使用隔热片整体进行并在试样边缘添加与试样等厚度的硅酸铝保温材料或与测试产品相同

材料填充设备试验区域以减少测试时产生的边缘热辐射同时将试样叠放使得测试总厚度为10mm 以上。如图 30 .b）所示，部分产品存在试样曲度较大导致与测试设备冷热面不完全贴合的情况，所以在测试过程中叠放试样的厚度测试采用设备自带的压板进行，使试样在测试的过程中保持 20kPa 的封装厚度测试压力。每组测试取连续 3 个平衡计量点，最终结果取 3 个单值的平均值。通过与试样厚度做除法计算试样的等效导热系数值，通过测试厚度和 1m 的比例关系做乘法计算 1m 等效热阻值。

热阻测试结果如下表所示：

表 6 热阻试验结果

编号	厚度 mm	热阻值 $m^2 \cdot K/W$	1m 等效热阻值 $m^2 \cdot K/W$	等效导热系数值 $W/(m \cdot K)$
预氧丝 1	12.02	0.601	50.0	0.020
预氧丝 2	12.34	0.494	40.0	0.025
预氧丝 3	12.26	0.557	45.5	0.022
预氧丝 4	13.10	0.624	47.6	0.021
预氧丝 5	12.12	0.577	47.6	0.021
预氧丝 6	12.34	0.617	50.0	0.020
陶纤 1	13.63	0.545	40.0	0.025
陶纤 2	10.34	0.470	45.5	0.022
陶纤 3	10.88	0.473	43.5	0.023
陶纤 4	12.13	0.505	41.7	0.024
陶纤 5	12.04	0.463	38.5	0.026
陶纤 6	13.32	0.605	45.5	0.022
玻纤 1	11.23	0.591	52.6	0.019
玻纤 2	13.10	0.728	55.6	0.018
玻纤 3	12.24	0.612	50.0	0.020
玻纤 4	11.12	0.585	52.6	0.019
玻纤 5	10.88	0.495	45.5	0.022
玻纤 6	10.62	0.559	52.6	0.019



30 .a）　　30 .b）

图 30 热阻验证试验过程图

因测试方法为成熟的国标稳态测试方法，试验结果重复性较好，数据稳定。确定每种芯材试样的数据可靠性后，标准编制组通过改变测试厚度的重复试验来验证对于气凝胶隔热片来说最佳的测试厚度。根据验证结果，不同测试厚度得到的数据结果并没有太大差距，仅与测试热流平衡时间有关，因此标准编制组不在标准中规定测试厚度要求，由测试人员根据所拥有的设备型号参数进行自行选择。

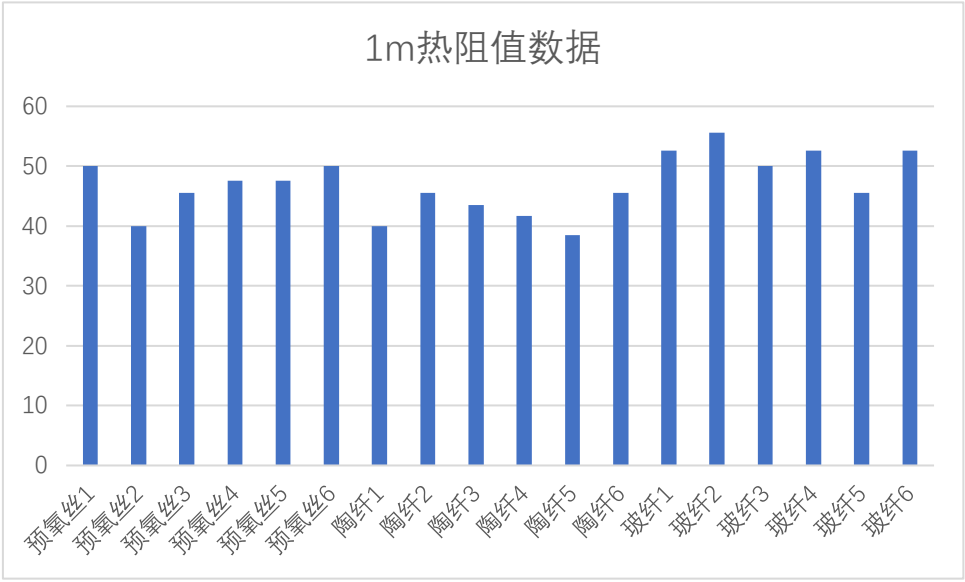


图 31 热阻验证试验 1m 换算热阻值数据图

根据验证结果，绘制热阻验证试验 1m 换算热阻值数据图，如图 31 所示，3 种芯材在 25℃常温环境下的 1m 等效热阻值较难区分，没有明显的材料分类数据值差距出现，因此经过考虑标准编制组决定采用统一的指标进行判定。因热阻测试在低温段是可以使用原始封装状态进行测试的，代表了产品在动力电池中的实际使用情况，所以热阻测试对于气凝胶隔热片是不可缺少的。另因为低温段的热阻值对于实际应用的贡献不大，所以标准编制组决定对此项指标从宽

判定。从验证数据来看，三种芯材产品的性能差别不大，以 1m 等效热阻 40m²·K/W 进行判定时，仅有一组产品是不合格的，另有其他产品的指标在合格线边缘。

4.7 高温高热系数

高温导热系数按照不同材料的耐温极限进行温度点划分：玻纤芯材测试 100℃、300℃、500℃；陶纤芯材测试 100℃、300℃、500℃、800℃；预氧丝芯材测试 100℃、200℃。测试结果如下：

图 32 高温导热试样、实验设备及试验过程组图

表 7 预氧丝芯材高温导热试验结果

测试条件		预氧丝-1	预氧丝-2	预氧丝-2
100℃	1#	0.024	0.021	0.023
	2#	0.023	0.020	0.023
	3#	0.024	0.021	0.022
	平均值	0.024	0.021	0.023
200℃	1#	0.030	0.024	0.021
	2#	0.029	0.024	0.020
	3#	0.028	0.024	0.024
	平均值	0.029	0.024	0.022

表 8 玻纤芯材高温导热试验结果

测试条件		玻纤-1	玻纤-2	玻纤-3	玻纤-4
100℃	1#	0.019	0.019	0.020	0.022
	2#	0.020	0.019	0.021	0.021
	3#	0.019	0.019	0.020	0.022
	平均值	0.019	0.019	0.020	0.022
300℃	1#	0.032	0.035	0038	0.036
	2#	0.033	0.036	0037	0.037
	3#	0.032	0.035	0038	0.036
	平均值	0.032	0.035	0038	0.036
500℃	1#	0.068	0.071	0.110	0.092
	2#	0.068	0.072	0.111	0.092
	3#	0.067	0.071	0.110	0.092
	平均值	0.068	0.071	0.110	0.092

表 9 陶纤芯材高温导热试验结果

测试条件		陶纤-1	陶纤-2	陶纤-3	陶纤-4
100℃	1#	0.023	0.030	0.025	0.022
	2#	0.022	0.031	0.026	0.022
	3#	0.023	0.030	0.025	0.021
	平均值	0.023	0.030	0.025	0.022
300℃	1#	0.023	0.035	0.045	0.036
	2#	0.024	0.036	0.046	0.035
	3#	0.024	0.036	0.045	0.036
	平均值	0.024	0.036	0.045	0.036
500℃	1#	0.034	0.062	0.092	0.056
	2#	0.033	0.063	0.091	0.057
	3#	0.034	0.062	0.092	0.056
	平均值	0.034	0.062	0.092	0.056
800℃	1#	0.096	0.092	0.135	0.108
	2#	0.096	0.092	0.135	0.108

	3#	0.096	0.092	0.135	0.108
	平均值	0.096	0.092	0.135	0.108

综合表格内容来看，预氧丝气凝胶在200℃以下测试时收缩情况不严重，仅3号试样厚度方向收缩，导致高温度点导热系数低于低温度点的情况出现。玻纤气凝胶测试结果与GB/T 34336标准中规定的10mm建筑用气凝胶导热系数分布情况类似，相同的样品不同取样位置数据较为稳定。陶纤气凝胶在100~500℃均可以保持较低的导热系数值，随着温度升高变化不大，在测试800℃时，导热系数值相对于前一设置温度点升温较大。导热系数的指标值确定参照应用企业招标要求、生产企业出厂要求以及验证试验结果。

预氧丝产品的指标确定为100℃（≤0.030）、200℃（≤0.035），主要考虑到部分产品的导热系数是温度越高导热系数可能越低，所以在100℃指标略微放宽，鉴于导热系数一般性规律为随温度升高而增大的变化趋势，200℃指标略大于100℃指标。

玻纤产品的指标确定为100℃（≤0.025）、300℃（≤0.036）、500℃（≤0.072），考虑到玻纤制品的测试数据与GB/T 34336中S级气凝胶的温度要求基本一致，所以直接采用GB/T 34336的分级要求。

陶纤产品的指标确定为100℃（≤0.025）、300℃（≤0.035）、500℃（≤0.050）、500℃（≤0.110），在100和300℃温度点，陶纤制品与玻纤制品的导热系数基本一致，在500℃时陶纤制品的导热系数比玻纤要好一些，所以在500℃指标处以陶纤制品的一般数值做指标要求，在800℃温度点主要参考验证试验数据，以绝大多数产品可以达到的指标作为合格线进行要求。

4.8 热冲击防护性能

为评估冷板材质对测试结果的干扰，采用除冷板材质外其余条件完全一致的对照实验。图33给出了金属冷板与碳化硅陶瓷冷板的温升曲线对比。金属冷板曲线前、后端斜率相近，中段斜率减小，推测系温度升高后试样与压板膨胀、接触热阻降低所致。碳化硅陶瓷冷板则呈升温速率逐渐降低的单调曲线，表明其导热系数随温度升高而增大；同时该材料热膨胀小，曲线无波动。计算425s时刻碳化硅曲线切线斜率与金属冷板前端斜率基本重合，而该时刻与动力电池相邻电芯热扩散阈值约400s接近，故在有效防护时段内碳化硅冷板的导热系数低于金属冷板。

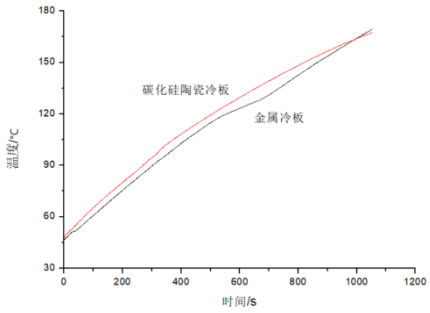


图 33 金属压板和碳化硅陶瓷压板连续升温曲线图

隔热片统一选用陶纤气凝胶，升温方式为持续加热，仅冷面压板材质不同情况下，试验结果绘制的温度时间曲线如下图所示。试验过程的升温趋势是基本一致的，结果温度差主要是由金属冷板和碳化硅的比热容差距导致的，碳化硅压板的比热容与电池电芯更为接近，传热效率低于金属压板，所以在模拟实际使用效果上，碳化硅压板是更加贴近的。此外标准编制组了解到部分车企反映隔热片供应商提供的测试数据偏小，经过调研得知，测试数据偏小的隔热片生产企业使用的冷板传热效果好，一般使用钢板或铝板，导致冷面热量散失远快于按照电芯模拟的实际情况，出现数据失真，所以本标准通过规定压板的材质厚度以及其热防护来保证冷热板传热可控，以统一不同设备的数据质量。

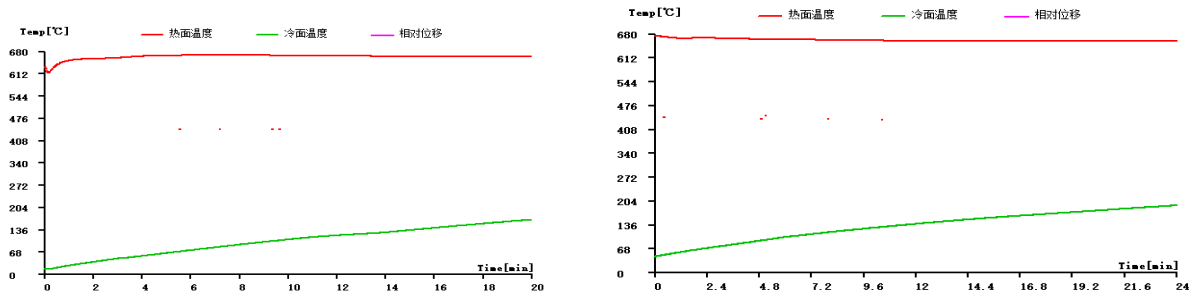


图 34 高温导热试样、实验设备及试验过程组图

在验证使用碳化硅压板数据可靠性后，还要验证碳化硅压板作为实验仪器设备的稳定性和可操作性，实验采用“热板以恒定升温速率持续加热 5min 后同时停止加热并卸压”的工况。对 3.0mm 厚度的玻纤、陶纤、预氧丝三种芯材进行测试，冷面最高温度及变异系数见表 10。可以看出每种芯材三组平行样无论是拐点出现时间还是对应冷热面温度均高度一致，变异系数均＜1%，表明本方法具有良好的稳定性。

表 10　3.0mm 气凝胶隔热片冷面最高温度值与变异系数

芯材种类	玻纤	陶纤	预氧丝
冷面最高温度单值（降温时间，降温时	（2273s，351.4℃，214.2℃）；（2312s，	（2336s，375.5℃，190.7℃）；（2345s，	（2429s，347.2℃，194.0℃）；（2406s，

热板温度，冷面最高温度）	349.6℃，213.9℃）；（2294s，350.4℃，216.2℃）。	373.8℃，190.1℃）；（2295s，381.5℃，192.7℃）。	345.4℃，192.7℃）；（2356s，346.8℃，193.8℃）。
变异系数	0.58%	0.71%	0.36%
注：变异系数计算公式$CV=\frac{\sigma}{\mu}\times 100\%$,式中$\sigma$为标准差，$\mu$为平均值。			

标准编制组采用设备固定热电偶后将热电偶的测温端使用耐高温胶带粘在预先在碳化硅压板上开好的热电偶槽中的固定方式，在测试结束后待冷面热电偶温度降低到 70~80℃左右时将碳化硅压板拆卸并使用直流水降温，碳化硅压板可以承受这种程度的冷热温差。为了研究冷板的抗热震能力的上限，在一次测试结束后，热电偶温度显示 260℃左右，使用坩埚钳直接将碳化硅压板置于直流水下，经过降温后观察碳化硅压板完好。在多次试验后使用游标卡尺测量压板尺寸与开始测试前没有变化，说明碳化硅材质的压板的耐高温能力较强，不会产生变形。与金属压板不同的是碳化硅不会发生氧化，哪怕是试样表面膜材粘到压板表面，经过水洗和简单的砂纸打磨后压板表面依旧光滑。标准编制组确定碳化硅压板不仅适用于热台冷板，还因其具有比金属更好的耐久性和抗热震性，将碳化硅压板和热电偶固定作为测温模块整体，采用热电偶与设备连线可拆的设计，大幅降低操作时间，增加实验的效率。

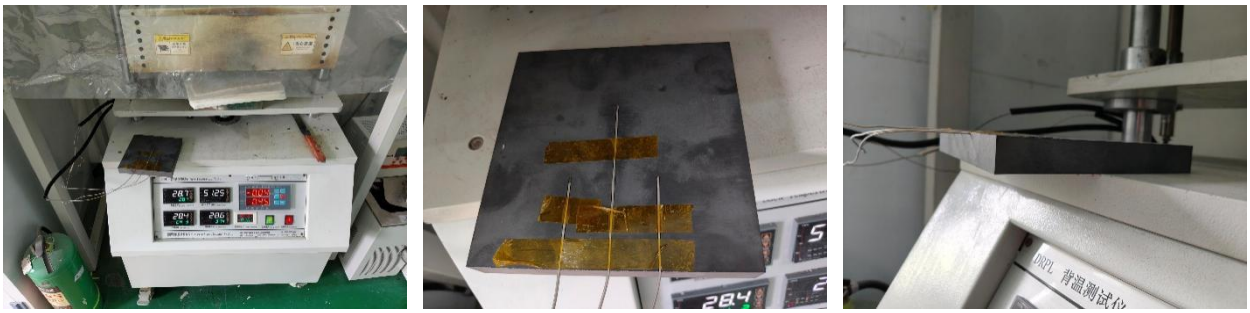


图 35 测试冷面加压测温模块示意图

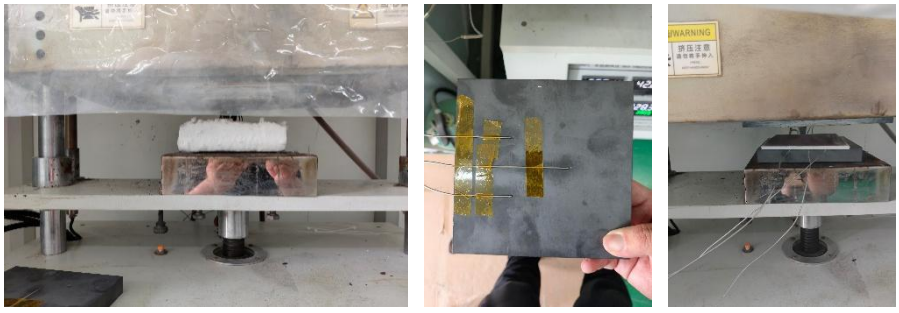
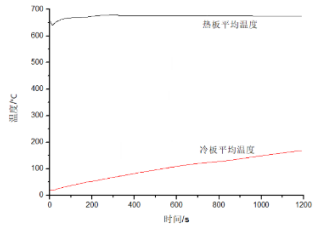
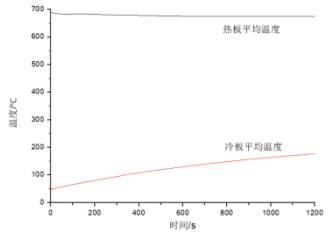
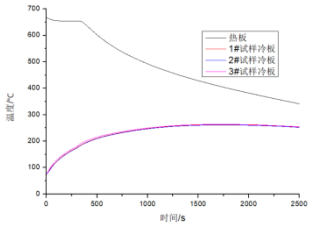
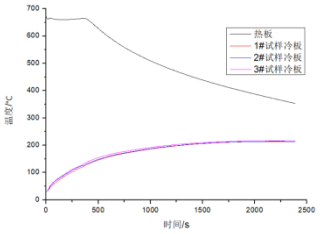
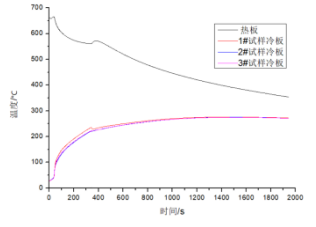
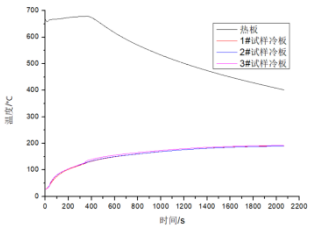
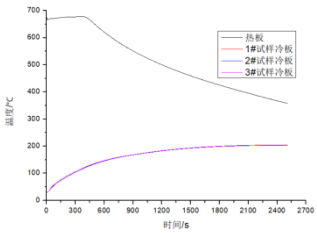
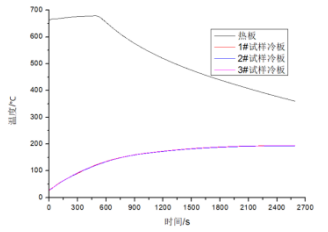


图 36 测试过程

为了更好地模拟电池热失控过程，编制组按照标准文本确定的方法进行验证试验，试验过程如图36所示。首先确保试验环境温度，测试过程实验室环境应保持（22±5）℃，相对湿度（50±10）%。之后将测温模块进行温度调节和设备周围环境换气调温，测温模块冷却后置于（22±5）℃恒温环境中调节不少于30min，启动排风系统换气，使通风橱内环境温度计读数T_0满足（22±5）℃。由于试验结果与试样厚度有很大关联性，记录试样原始尺寸，按照附录A的规定测量试样初始厚度h_1，并记录试样测试前状态以便比较实验前后试样状态。以厚度不低于50mm，长宽不低于200mm的柔性保温棉毡（宜采用平均温度500℃的导热系数不大于0.15W/m·K的硅酸铝材料）作为试验机金属压盘的热防护切断热板向金属压盘的热传递，关闭通风系统，启动加热器。加热板温度达到设定测试温度T（600℃）并稳定1min后，连接测温模块热电偶。恒温时间较少的原因是尽可能减少设备测试区域的环境温度，减少空气温度对设备热扩散的影响。去除金属压盘上柔性保温棉毡，将测温模块安装在金属压盘上并在卡口和金属圆盘之间垫放与金属压盘直径一致厚度为3mm的云母片以切断冷板和金属压盘的接触热桥，启动程序记录冷面和热面热电偶温度，此时测温模块三根热电偶平均温度记为初始温度T_s。启动试验机，将试样快速抬升至距离热板（5±2）mm处，再以50mm/min的速率继续抬升试样与热板接触，防止试样在热板烘烤下发生性状改变，尽可能快地移动试样到接近热板的区域后以恒定速率加压，保证测试结果重复性，减少受人为因素的影响。试样和热板接触后立即关闭加热器，连续加压直至试样产生（0.9±0.02）MPa测试压强P，在压力达到规定值后，以测试压强P恒压。恒压过程维持5min后，启动试验机以50mm/min的速率向下移动，卸压至试样承受（0.03±0.01）MPa压强，模拟动力电池电芯卸压阀开启状态。继续保持压力至测温模块温度下降或冷热面温差小于130℃。因试验曲线末端冷板温度平衡稳定，温度变化小，热电偶温度波动可能出现试验结束误判，因此一方面要求延长测试时间，通过拐点的出现判定试验结束；另一方面为了避免热电偶温度波动误判可能性并减少试验时间，增加效率，本方法根据验证试验情况设置试验结束温差判据。最后待装置冷却后取出试样，观察并记录试样状态。

与常规的全程加热的处理方式不同，加热规定时间后停止加热，以热板蓄热量进行加热看冷面温度拐点的方式对整体设备的传热性能要求极高，所以针对性地对冷热面压板尺寸材料、热板防护材料、设备外防护通风橱等做了详细的规定，以达到在不同地域、不同实验室、不同季节均有较好重复性的目的。在确定好试验过程和设备后，标准工作组对老化前后的试样进行比对试验，以下为试验结果。

表 11 热冲击防护性能试验结果

序号	实验温度时间曲线	实验参数及数据	序号	实验温度时间曲线	实验参数及数据
1		压板：金属下冷板 试样：陶纤气凝胶隔热片 方法：持续加热 20min 结果：冷面最高温度 169.5℃	2		压板：碳化硅陶瓷下冷板 试样：陶纤气凝胶隔热片 方法：持续加热 20min 结果：冷面最高温度 177.5℃
3		压板：碳化硅陶瓷下冷板 试样：1.3mm 玻纤隔热片 方法：加热 5min 看温降 结果：各组冷面最高温度时间及冷热面温度 （1759s，396.2℃，262.3℃）； （1748s，394.8℃，261.3℃）； （1769s，395.4℃，263.8℃）。	4		压板：碳化硅陶瓷下冷板 试样：3.0mm 玻纤隔热片 方法：加热 5min 看温降 结果：各组冷面最高温度时间及冷热面温度 （2273s，351.4℃，214.2℃）;（2312s，349.6℃，213.9℃）;（2294s，350.4℃，216.2℃）。
5		压板：碳化硅陶瓷下冷板 试样:3.0mm 软质陶纤隔热片 方法：加热 5min 看温降 结果：各组冷面最高温度时间及冷热面温度 （1532s，406.1℃，276.3℃）； （1520s，405.2℃，275.2℃）； （1512s，404.1℃，274.9℃）。	6		压板：碳化硅陶瓷下冷板 试样：3.0mm 硬质陶纤隔热片 方法：加热 5min 看温降 结果：各组冷面最高温度时间及冷热面温度 （2336s，375.5℃，190.7℃）;（2345s，373.8℃，190.1℃）;（2295s，381.5℃，192.7℃）。
7		压板：碳化硅陶瓷下冷板 试样： 3.0mm 预氧丝 方法：加热 5min 看温降 结果：各组冷面最高温度时间及冷热面温度 （2406s，342.5℃，204.2℃）； （2384s，341.5℃，203.0℃）； （2398s，342.3℃，204.0℃）。	8		压板：碳化硅陶瓷下冷板 试样： 3.0mm 预氧丝 方法：加热 5min 看温降 结果：各组冷面最高温度时间及冷热面温度 （2429s，347.2℃，194.0℃）;（2406s，345.4℃，192.7℃）;（2356s，346.8℃，193.8℃）。

可靠性方面。以实验 1、2 两组数据进行分析，在其他条件不变的情况下仅改变冷板种类，结果曲线基本一致，20min 时的热面温度差为 8℃，此温差主要是由于金属冷板传热效率较碳化硅冷板高的缘故。目前此类方法的冷面材料普遍使用传热效率远高于电芯的各种金属，导致测试结果与实际电芯触发热失控实验差别较大，所以在模拟效果上碳化硅陶瓷压板更为贴近实际工况。从后续试验的三组平行实验来看，3~8 组冷面最高温度值的变异系数分别为 0.48%、0.58%、0.27%、0.71%、0.32%、0.36%，均未超过 1%，说明采用本标准提供的方法具有较高的数据可靠性。

材料种类方面。第 4、6、8 三组数据通过测试厚度均为 3.0mm 的三种不同材质的气凝胶隔热片得到。能够明显看出，与预氧丝气凝胶制品明显不同，玻纤和陶纤气凝胶制品在刚刚接触热板时产生为期 100s 左右的快速温升，说明预氧丝气凝胶在热失控前期升温阶段迟滞温升的效果会优于其他两种类型产品。在进行卸压阶段时，仅陶纤气凝胶产品曲线上具有较为明显的变化，说明在机械性能上玻纤制品和预氧丝制品的抗压能力更强。从结果上看，陶纤和预氧丝气凝胶的冷面最高温度明显低于同厚度的玻纤制品，且玻纤制品的热板温度曲线下降幅度更大，说明其热板的散热量大于硅碳棒提供的热量，与之不同的是陶纤和预氧丝制品热板自接触试样后就开始升温，综合两点可以判断隔热能力强的产品具有更低的冷面最高温度。在比对三种类型样品实验前后状态变化，发现预氧丝制品尺寸变化最大；陶纤制品出现轻微粉化，易碎裂；玻纤制品除发生颜色变化外未见明显变化，说明玻纤制品的耐高温状态保留更好。

其他可能影响隔热片热冲击防护性能的因素分析。通过比较 3、4 两组数据，可以看出厚度越厚的同类气凝胶制品具有更好的冷面防护效果，达到冷面最高温度的时间延长，冷面最高温度低。通过比较 5、6 两组数据，其中 5、6 两组实验的制品均为陶瓷纤维气凝胶，第 5 组制品的压缩性能较差，可以看出压缩性能差的制品热冲击防护效果明显更差，经过测量实验过程中 5 组制品的最大变形量是 6 组的 1.4 倍，说明气凝胶隔热片抗热冲击需要具有一定压缩强度来保持受热冲击时的厚度。

关于实验过程方面。由于碳化硅冷板导热系数低，所以冷热板达到热平衡时间在 30 分钟左右，且接近平衡处的温度变化很小，温度拐点判断较为困难。为了得到经验性更简单的判断温度拐点方法，计算 6~8 组的冷面温度拐点的冷热面平均温差分别为 133.0℃、135.7℃、129.7℃、185.8℃、138.4℃、153.0℃，拟合拐点在 130℃或 150℃，说明气凝胶隔热片无论种类、厚度、机械性能、老化情况，都有比较接近的热平衡温度，这个平衡温度主要是由冷板和热板的传热性能决定的。标准编制组针对不同材料、不同厚度、不同压缩性能的几种材料追加部分试验，

并将试验温差值与 130℃、150℃经验判据温差结果进行比较，结果如表 12 所示，计算 130℃时冷面温度与冷面最高温度差比较各组的误差平均值为 0.7℃；若按 150℃计算，各组的误差平均值为 1.2℃。因此，可将“冷热面温差 130℃”对应的冷面温度作为实验经验最高冷面温度，以简化现场测试与评估。

表 12 试验结束判据分析表

序号	1	2	3	4	5	6	7
温降拐点冷热面温差/℃	135.7	185.8	153.0	127.0	147.8	129.7	204.1
130℃判定误差/℃	0.2	1.4	0.2	0.6	0.8	0.0	1.6
150℃判定误差/℃	1.6	0.9	0.4	1.9	0.4	2.1	1.2

标准编制组增加设定温度测试试验组后，通过实验数据来看，绝大多数的产品冷面最高温升即冷面曲线拐点温度不超过 230℃，这个温度与材料的厚度关系较大，但是作为动力电池用隔热片产品，无论厚薄达到动力电池安全要求是很有必要的，通过冷面最高温升与测试室温上限 27℃做差得到的温度值为 203℃，为保证安全需要进行加严要求，因此，本标准将热台冷面最高温升的指标确定为 200℃。

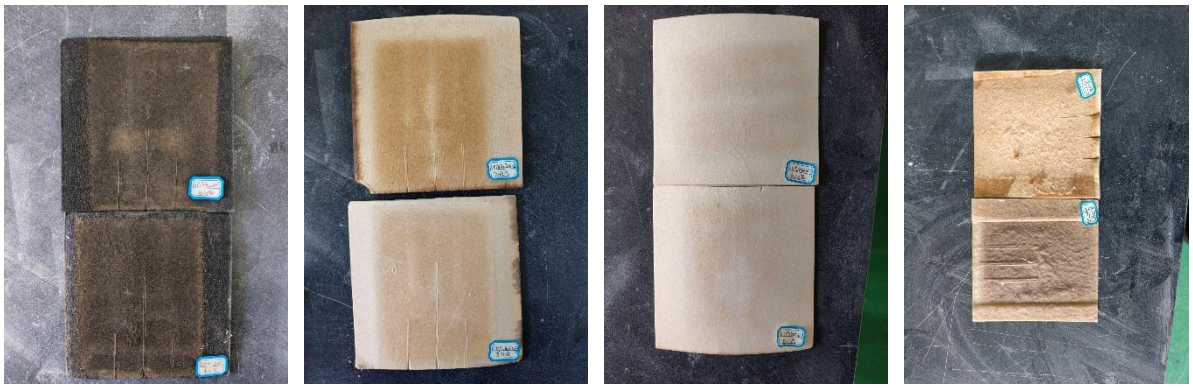


图 37 试验后试样照片

试验后的试样照片如上图所示，发现部分陶纤制品会变松散，在取出时易发生碎裂。还有一些产品在试验后会粘到冷热板表面，所以试样结构发生变化的情况下测试试样的厚度保留率

是没有必要的，因此编制组在充分考虑试样可能的试验状态后，将标准中关于厚度保留率的内容删掉。在此基础上增加实验前后样品状态记录的描述性要求，此要求作为试验报告的组成部分，不参与合格判定。

4.9 吸湿率

质量吸湿率的验证试验结果如下：

表 13 质量吸湿率试验结果

编号	密度	单值	质量吸湿率%
预氧丝-1	180	5.9、5.9、6.0	5.9
预氧丝-2	194	0.8、0.8、0.8	0.8
预氧丝-3	188	0.5、0.5、0.4	0.5
玻纤-1	292	0.6、0.7、0.6	0.6
玻纤-2	258	2.3、2.3、2.4	2.3
玻纤-3	280	0.9、0.8、0.9	0.9
陶纤-1	412	2.9、2.9、2.9	2.9
陶纤-2	311	0.8、0.8、1.0	0.9
陶纤-3	188	0.2、0.2、0.2	0.2

根据质量吸湿率的验证实验结果发现不同种类的产品均存在吸湿率较大的产品，且吸湿率较大产品的数据与同种类其他产品数据差别较大。经过咨询和资料查询，标准编制组认为质量吸湿率指标参照 GB/T 34336 的规定不超过 1%。因为本标准的标准化对象应用于动力电池，相比于 GB/T 34336 中标准化对象应用于工业或建筑，使用更为精细且使用环境更密闭，因此指标要求不能低于 GB/T 34336。考虑到继续加严指标会使绝大多数试样不合格，所以标准编制组认为将按照 GB/T 34336 的规定的指标不做更改。

4.10 禁限用物质

试样制备介绍：试样经陶瓷剪刀剪碎充分混合。

试液制备介绍：称取 0.2 g 预氧丝试样，精确至 0.0001 g，置于消解罐中，加入 8mL 硝酸，1mL~2mL 盐酸，盖好安全阀后将消解罐放入微波消解系统中，按仪器厂家推荐消解条件消解样品。冷却转移至容量瓶并定容至 50 mL，混匀，此为试液 A：使用滤液测试预氧丝样品中的铅、汞、镉。称取 0.2 g 气凝胶试样，精确至 0.0001g，置于消解罐中，加入 4 mL 硝酸，1mL~2 mL 盐酸 8mL 氢氟酸，盖好安全阀后将消解罐放入微波消解系统中，按仪器厂家推荐消解条件

消解样品。冷却后在石墨炉上将混合液加热至干，加入 15mL 水和 5mL 盐酸（1+1）在石墨炉上煮至盐分完全溶解。冷却转移至容量瓶并定容至 50mL，混匀，此为试液 B：用于测试气凝胶样品中的铅、汞、镉。称取 0.2 g 气凝胶试样，精确至 0.0001g，置于铂金坩埚中，加入 2mL 硝酸，10 mL 氢氟酸，2ml 高氯酸。置于低温电炉上赶至高氯酸白烟冒尽，取下冷却。加入 15mL 水和 5mL 盐酸（1+1）在石墨炉上煮至盐分完全溶解。冷却转移至容量瓶并定容至 50 mL，混匀，此为试液 B：用于测试气凝胶样品中的铅、镉。

试样和试液制备过程如图 38 所示

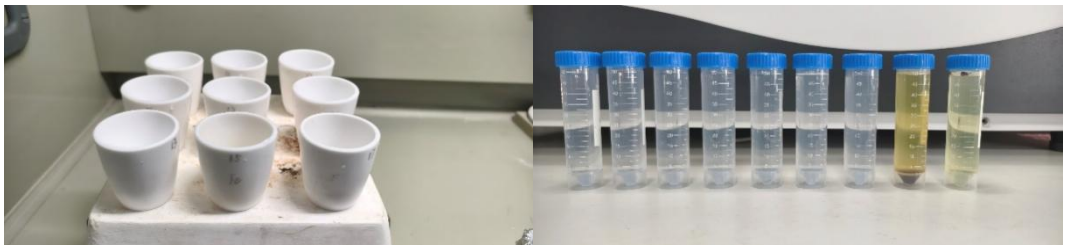


图 38 禁限用物质试验过程

标曲的配制：铅、汞、镉储备溶液：0.1mg/L 市售。铅、汞、镉混合标准溶液： 分别取 20.00 mL 铅、汞、镉标准储备溶液于 200 mL 容量瓶中，加入 20 mL 盐酸（1+1），稀释至标线，摇匀。 此溶液含铅、汞、镉各位 100 mg/mL。铅、汞、镉混合稀标准溶液：取 20.00 mL 铅、汞、镉混合标准溶液于 200 mL 容量瓶中，加入 20 mL 盐酸（1+1），稀释至标线，摇匀。 此溶液含铅、汞、镉各位 10 mg/mL。铅、汞、镉混合工作曲线系列溶液：于一组 100 mL 容量瓶中，分别加入 0.00 mL、 1.00 mL、2.50 mL、5.00 mL、10.00 mL 、25.00mL 铅、汞、镉混合稀标准溶液，加入 10mL 盐酸（1+1），稀释至标线，摇匀。移入塑料瓶中。 此系列溶液铅、汞、镉的浓度分别为 0.00 μg/mL、0.10 μg/mL、0. 25 μg/mL、 0.50 μg/mL、1.00 μg/mL、2.50 μg/mL。测试：电感耦合等离子体发射光谱仪预热同时，用高纯氩或高纯氮吹扫光路和检测器系统至稳定状态。稳定后，在波长各元素推荐波长处，先测定标准工作曲线用系列标准溶液中磷元素的光强度，绘制工作曲线，再测定空白和试液的光强度。试液中元素浓度应在工作曲线范围内，超过工作曲线最大浓度点时，应适当稀释。

计算：各元素氧化物的质量分数[ω(X)]，数值以%表示，按公式（1）计算：

$$\omega(X)=\frac{cV\times100}{m\times10^{6}}K=\frac{cV}{m\times10^{4}}K \qquad \text{……(1)}$$

式中:

c——减去空白试验后的试液中各的浓度，单位为微克每毫升（μg/mL）；

V——试液的体积，单位为毫升（mL）；

m——试料的质量，单位为克（g）。

K——单质到氧化物的换算稀释。

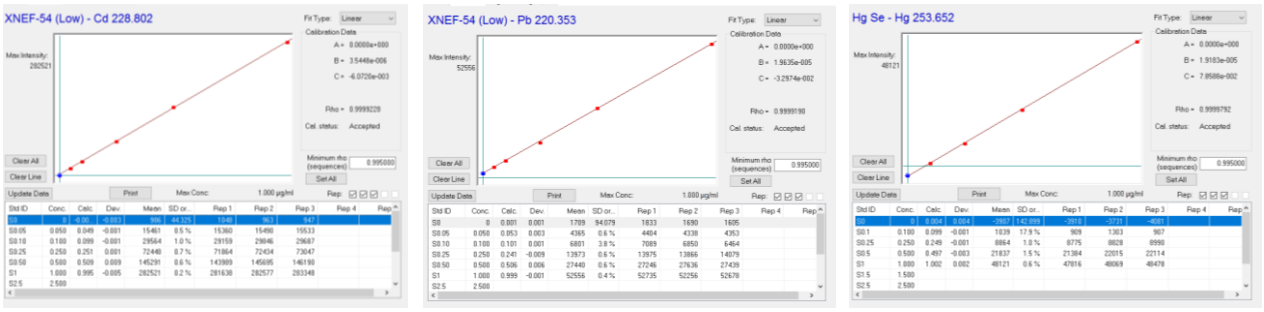


图 39 禁限用物质试验界面

表 14 禁限用物质数据表

编号	PbO	CdO	HgO
CRP0402022-2	0.0026%	ND	ND
GBR03270002	0.0002%	ND	ND
GRP0402002-1	0.0020%	ND	ND
GRP04030001-3	0.0002%	ND	ND
GRP04030002-1	0.0010%	0.00007%	ND
GRP03270001-2	0.0018%	ND	ND
GRP0402002-3	ND	ND	ND
GRP04020001	ND	ND	ND

本标准引用 GB/T 30512 汽车禁限用物质标准进行测试，指标要求满足 GB/T 30512 中对各禁限用物质的要求，不做加严或放松。经过验证试验发现 GB/T 30512 中提到的禁限用物质种类的测试存在检出情况，检出量均在要求范围内，说明收集验证样品均满足禁限用物质国标要求，但存在禁用物质检出情况，所以为了保证电池以及汽车整体满足仅限用物质要求，对于气凝胶隔热片来说此性能为必做项目，指标要求按照 GB/T 30512 中的规定进行。

4.11 湿热老化

鉴于湿热老化程度比冷热交替老化更为严苛，编制组对未经封装的试样进行为期 1000h 的温度 85℃，湿度 85%相对湿度的老化，老化结束后在标准实验室环境干燥调节 72h 以上，再进行热阻、电阻和热冲击防护性能实验，部分实验结果见上文。通过比较热冲击防护性能数据表格中 7、8 两组数据，其中 7 组样品是经过温度 85℃、相对湿度 85%处理 1000h 后进行试验

的，可以看出两组样品无论是冷面最高温度值和其出现时间还是整个过程的温度变化趋势变化不大，因此可以说明气凝胶隔热片的芯材受湿热老化影响不大，主要受湿热老化影响的是封装材料。

经过数据分析，发现此 3 项关键性能中体积电阻率老化效果比较明显，热阻老化效果不明显，热冲击性能测试受老化影响出现部分芯材产品性能更优的情况。编制组分析，老化试验过程受水蒸气和高温作用，试样结构中的孔隙分布更均匀，导致部分性能得到优化。鉴于此 3 项试验分别是热工、电性能和关键的背温防护性能，都是有必要进行测试的项目。其中热阻的数据变化小，受膜材封装影响小，指标以参数的保留率表示；电阻的数据变化大且芯材数据接近合格线较多，受膜材封装影响大，所以以老化后依然保持在合格线上为判定依据；热冲击防护性能冷面温升可能存在老化后更优的情况，受膜材老化影响小，因此也以保持在合格线上为判定依据。

4.12 抗火焰冲击性能

标准编制组在进行验证试验过程中，发现手持式气瓶进行测试具有一定危险性且灼烧位置不够固定，如图40和图41所示。通过气瓶提供火焰也会有气瓶压力下降导致火焰温度不足的情况。综合以上问题，标准编制组决定以固定式预混燃料气和氧气的加热方式进行测试。

图 40 预氧丝制品灼烧试验

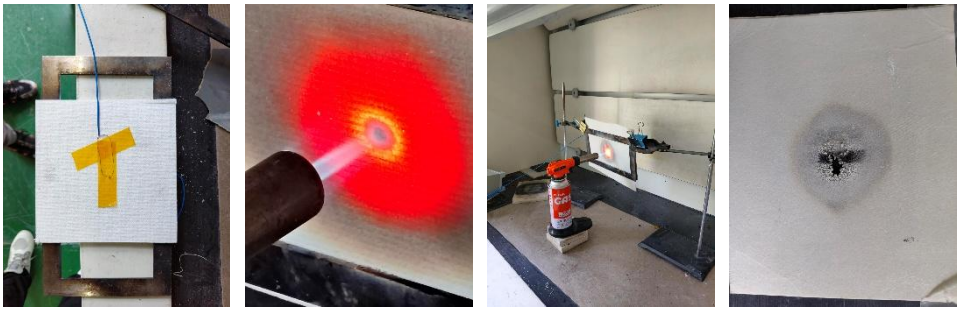


图 41 某玻纤制品火焰击穿试验

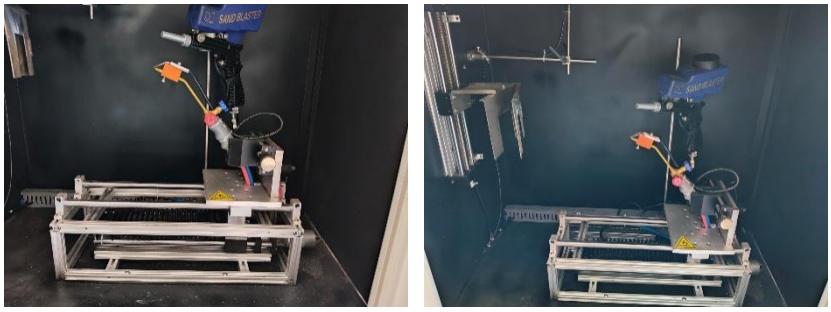


图42 预混燃烧发生器

试验装置如图42所示，测试夹具装置为两片中空的金属夹具夹持试样并在竖直方向固定，火焰发生器为丁烷-氧气预混燃烧发生器，喷嘴为口径1.2mm耐高温铜制直喷孔，混合室为文丘里结构，内置铜网防回火。气体控制系统采用双阀调节混合气体比例来微调火焰温度，混合气体压强为0.15MPa。火焰发生器喷嘴可以通过火焰发生器底部的机械结构进行水平转向，使喷嘴火焰达到要求后转向试样中心位置，喷嘴距离试样中心位置为（90±5）mm，保证火焰灼烧温度和气体冲击力是一致的。同时火焰发生器固定在可旋转底座上，通过先将火焰喷嘴远离试样端点火并通过调节燃气流速控制火焰温度，这里可以通过热电偶、红外测温仪或测量火焰长度的方式确定大致温度达到1200℃左右。火焰稳定后，将喷嘴通过旋转对准试样中心，喷嘴距离试样表面的距离为规定值，保持灼烧5min后停止试验。

根据实验结果曲线来看，失效判定主要针对芯材是否发生火焰击穿，在实际使用过程中气凝胶隔热片作用效果为阻隔热量和火焰，在承受高温的同时也会有压力作用，因此在较大压力火焰冲击下保证结构完整性成为隔热片的最基本要求。作为火焰灼烧试验的判定，通过验证试验编制组发现如图 43 所示，在发生火焰击穿时，背火面的热电偶温度会极速上升至 1000℃左右后达到电偶耐温极限后损坏失效，在某些表面看上去完整的试验样品上也会出现背火面温度极速上升的情况，因此将此种情况也规定为火焰击穿。此试验的结果判定包括结构层面上的完整性和功能层面的完整性。此外除去火焰击穿外，还要求在报告中记录是否有肉眼可见的形变、颜色变化，芯材中心点是否出现熔融、滴落的试验现象，供应用方参考不参与结果判定。关于背面温升数值参与结果合规性判定，标准编制组认为，一般试样在承受 1200℃以上 5min 比实际热失控情况火焰喷射情况更严苛，且背面温度测量在高于 1000℃后测量精度很难满足，易损坏热电偶，因此，本标准以价格便宜精度较低的热电偶线做触点方式简单判定背面温度升高范围，不给出具体值的要求，减少试验方法热电偶成本问题。

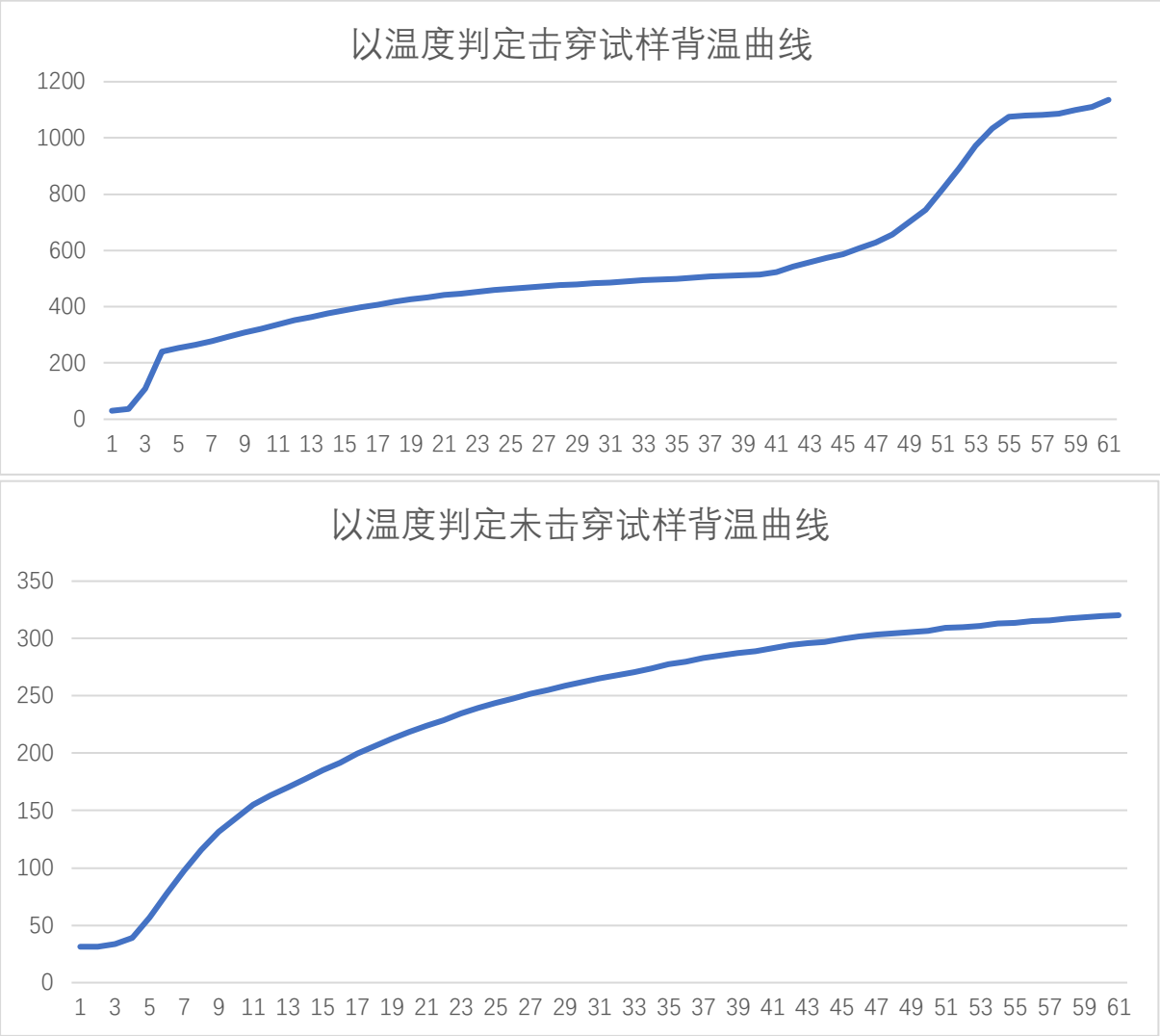


图43 背面温度升高典型代表曲线

五 标准中涉及专利的情况

本标准不涉及专利知识产权问题。

六 预期达到的社会效益等情况

经济效益

标准化将扩大产品市场规模与带动产业发展。标准的发布将规范新能源汽车动力电池用气凝胶隔热片的生产与应用，使相关企业在生产、销售等环节有章可循，有助于提升市场对达标产品的认可度和信任度，从而扩大气凝胶隔热片的市场规模。据预测，2025 年国内新能源领域气凝胶渗透率若达 30%，对应市场规模可达 26 亿元，且随着新能源汽车产业的持续发展和市场规模的扩大，气凝胶隔热片的市场需求将不断增长，进而带动上下游相关产业的协同发展，如原材料供应、生产制造设备、检测服务等产业，创造更多的经济附加值。

标准化促进技术创新与升级。标准的制定将激发企业及相关科研机构在气凝胶隔热片领域

的技术创新投入，推动研发更高性能、更低成本的气凝胶隔热材料和生产技术。这不仅有助于提升企业的核心竞争力，还能促进整个行业的技术进步，为产业的可持续发展提供技术支撑，开拓新的市场空间和经济增长点。

社会效益

有助于提升新能源汽车安全性能。该标准响应了工信部《电动汽车用动力蓄电池安全要求》中“不起火、不爆炸”的强制目标，通过对气凝胶隔热片的技术规范，确保其在新能源汽车动力电池中的有效应用，能够显著降低电池热失控引发的安全风险，提高新能源汽车的整体安全性能，为驾乘人员提供更可靠的保障，增强消费者对新能源汽车的信心，促进新能源汽车产业的健康发展。

规范市场秩序与促进公平竞争。统一的标准为市场监管提供了依据，有助于打击假冒伪劣产品，淘汰不符合标准的企业，规范市场秩序，营造公平竞争的市场环境。这将保护正规企业的合法权益，鼓励优质企业的发展壮大，推动整个行业的整合与升级，提高行业集中度和整体发展水平。

推动行业标准化与国际化进程。《新能源汽车动力电池用气凝胶隔热片》标准的发布，填补了新能源汽车电池防护材料领域的标准空白，为行业提供了一致的技术规范和准则。这不仅有利于国内新能源汽车产业的标准化发展，提高国内产品的质量和一致性，增强在国内市场的竞争力；而且有助于提升我国新能源汽车及相关零部件在国际市场上的影响力和话语权，推动我国新能源汽车产业的国际化进程，促进国内外贸易和合作。

生态效益

降低环境污染风险。该标准有助于减少因电池热失控引发的火灾、爆炸等事故，避免了电池燃烧产生的有毒有害气体和污染物的排放，降低了对大气环境、土壤和水体等的污染风险，保护生态环境和人类健康。

七 采用国际标准和国外先进标准情况，与国际、国外同类标准水平的对比情况，国内外关键指标对比分析或与测试的国外样品、样机的相关数据对比情况

引用标准：GB/T 191 包装储运图示标志、GB/T 1410 固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法、GB/T 1695 硫化橡胶 工频击穿电压强度和耐电压的测试方法、GB/T 2408 塑料 燃烧性能的测定 水平法和垂直法、GB/T 4132 绝热材料及相关术语 、GB/T 5480 矿物棉及其制品试验方法、GB/T 10294 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法 、GB/T 10295 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 热流计法 、GB/T 16400 绝热用硅酸铝棉及其制

品 、GB/T 17911 陶瓷纤维制品试验方法 、GB/T 30512 汽车禁用物质要求 、GB/T 34336 纳米孔气凝胶复合绝热制品。

参考标准:GB/T 1.1《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写规则》、GB/T 1.2《标准化工作导则 第二部分：标准中规范性技术要素内容的确定方法》、GB/T 38031《电动汽车用动力蓄电池安全要求》、GB/T 37608《真空绝热板》、GB/T 8924《纤维增强塑料燃烧性能试验方法 氧指数法》、GB/T 13480《建筑用绝热制品 压缩性能的测定》、GB/T 8811《硬质泡沫塑料 尺寸稳定性试验方法》、GB/T 17794《柔性泡沫橡塑绝热制品》、GB/T 1408.1《绝缘材料 电气强度试验方法 第 1 部分：工频下试验》、Q/DXPLD0016《动力电池系统气凝胶隔热片技术要求》、DB34/T 3377《电动汽车用动力锂离子电池单体 热失控测试方法》、GB/T 42729《锂离子电池和电池组安全使用指南》、UL-9540A、JIS C 8715-2、EU Battery Regulation 2023/1542、California Proposition 65、REACH 法规、ELV 指令、POPs 法规、2011/65/EU RoHS 指令、GB/T 36276《电力储能用锂离子电池》等。

同类标准比对情况：本标准通过研究国内外先进测试方法，总结归纳应用方指标要求，收集国内产品进行验证试验，试验方案设计与性能指标的确定都处于领先水平。

指标

关键指标与验证数据分析详见本文件第三章标准内容说明和第四章验证数据分析。

八 与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

与现行相关法律、法规、规章及相关标准协调一致。

九 重大分歧意见的处理经过和依据

暂无重大意见分歧。

十 标准性质的建议说明

本标准建议标准发布后为推荐性标准。

十一 贯彻标准的要求和措施建议

建议标准颁布后由团标发布机构与相关部门组织贯彻，建议本标准实施日期为2026年3月。

十二 废止现行相关标准的建议

无。

十三 其他应予说明的事项

无。