

深冷柔性绝热材料长期服役性能及老化行为研究

高永涛 唐时海 高正伟 金有刚 吴彦

河北金威新型建筑材料有限公司，河北省廊坊市，065900；

摘要：深冷柔性绝热材料在航空航天、液化气体存储、低温试验设备等方面有着重要的用途，具有优良的低温隔热特性和优良的柔韧性，是低温制冷的核心材料。随着使用年限的增加，其长周期使役特性及时效特性已成为决定其工作稳定与可靠度的重要指标。针对深冷柔性绝热材料在高压、湿度等环境下的性能演变规律，研究其在高压、湿度等环境下的失效机理。在此基础上，揭示复合材料在服役条件下的服役性能，为其在工程中的实际使用奠定基础。研究发现，深冷柔性绝热材料与材料结构、工作环境及老化机理有密切关系，提高其长效稳定性是其大规模推广应用的重要前提。

关键词：深冷；柔性绝热材料；长期服役；老化行为；性能退化

DOI：10.69979/3041-0673.24.11.024

引言

深冷柔性绝热材料在航空航天、LNG储运、低温试验等极端低温条件下有着重要的应用。该类材料在长时间运行过程中，会受到温度变化、机械应力、湿度等多种因素的共同作用，严重制约了其在服役过程中的应用。在节能与安全需求不断提升的背景下，开展深冷柔性绝热材料的服役特性与失效机理研究具有重大意义。时效是在服役期间，受外界条件影响，使其理化性能逐渐劣变的一个过程。研究低温服役条件下材料的时效特性，为材料选择、优化设计以及维修保养等方面的研究奠定基础，从而提升装备的可靠性与经济性。为此，深入研究深冷柔性绝缘材料的长时间使役特性和寿命演化规律，对于提升其使用寿命具有重要意义，并可为我国低温技术的深入发展奠定基础。

1 深冷柔性绝热材料的老化行为研究

1.1 老化机理与影响因素

1.1.1 材料的化学老化机理

化学时效是在长时间的作用下，由物质发生化学反应而发生的物理性能退化。深冷柔性绝缘体的化学失效是由分子链断裂、交联或氧化分解等过程引起的。在低温、高压及气体等条件下，易引发分子链断裂或交联，从而降低了材料的柔韧性和机械强度。例如，聚氨酯、聚乙烯等材料在低温条件下会由于热氧或紫外线的作用而导致材料的大分子链断裂或交联，进而降低材料的力学、导热及尺寸稳定性。由于化学时效作用，其柔韧性逐步降低，导致其脆性增加，并易于产生开裂等缺陷。为此，低温下的柔性绝热材料在长期服役过程中，需要

充分发挥其化学稳定作用，保证其在长期服役过程中不会因为化学作用引起的性能衰减。

1.1.2 物理老化与微观结构演变

深冷柔性绝缘体的物理时效是指其内部的孔隙变化、表面变形、硬化或塑性变形等组织演化。研究表明，在一定条件下，材料的内部组织，特别是在不同的条件下，会出现不同程度的损伤。在较低温度条件下，由于温度、压力等因素，其孔道结构会出现坍塌、挤压等现象，从而提高了导热系数，降低了隔热性能。

1.1.3 环境条件与老化速率的关系

深冷柔性绝热材料在低温环境下的失效行为往往受到温度、湿度、压力等多种环境因子的共同作用。在较低温度条件下，尽管其反应速度有所下降，但其物性（例如脆度）也会随之改变，进而加快其物理失效进程。另外，在不同的环境条件下，水分对材料性能的影响尤为明显，特别是一些含有水分的泡沫材料、复合材料等。在湿度较大的条件下，由于湿度的存在，会引起材料的溶胀或冻结，从而对其结构与性质产生不利的影响。

2 不同环境条件下的老化行为

2.1 低温环境下的老化表现

低温热应力条件下，软硬绝缘体的时效失效主要体现在机械性能退化与隔热性能退化两个方面。在较低的环境中，很多高分子等软物质在较低的环境中会出现较大的脆化现象，特别是在较低的环境中长期工作时，更有可能出现开裂、破坏现象；分子链流动性降低，使其塑性降低。另外，在低温条件下，材料的热膨胀系数也会随之改变，在大的温差下，会出现由温度梯度造成的

应力集中，进而加速老化。如泡沫、气凝胶等具有多孔特性的材料，在较低的温度条件下，孔道会受到挤压或坍塌，进而降低隔热效果。

2.2 湿度与气压变化对材料老化的影响

温、压等因素对深冷柔性绝热材料的服役性能具有重要的影响。湿度是造成很多物质性能退化的重要原因，特别是在水性高分子或发泡材料中，由于湿气的存在，会加快其老化进程。当环境潮湿时，该物质会吸收水分，从而引起其内部的结构损伤或导热系数的增加；湿气的挥发会引起物料的开裂或脆性。空气压力的改变，尤其是在压力较大时，会使材料的显微组织遭受挤压，从而使其孔隙度下降；其内部发生坍塌，对其隔热特性产生不利影响。然而，在较高的压力下，其理化性能也会随之变化，如引发分子链交联、破坏等。其中，湿、压等环境条件下的服役寿命是一个非常复杂的过程，其长期稳定及失效机理往往是一个有待深入研究的问题。

2.3 温度循环与应力作用下的老化特征

在深冷绝热材料的寿命周期中，温度的周期性变化和机械应力的影响显得尤为重要。这种温度的频繁波动使得材料遭受热胀冷缩的连续冲击，从而引发热疲劳现象。特别是当材料内部含有泡沫或气凝胶等结构体，温度的循环作用可能会放大孔隙结构的变形或破裂，进而逐步削弱材料的隔热效果。同时，由温度变化产生的热应力和施加在材料上的机械应力相结合，会进一步损害材料的力学特性。长期暴露于周期性的应力或温度变动之下，材料可能会出现应力裂纹和疲劳损坏，从而导致其力学和隔热性能的双重衰退。鉴于此，深入探究深冷环境下材料在温度循环与应力作用下的退化特性是材料研究领域的关键课题，特别是在考虑材料长期使用的情况下。

3 典型材料的老化试验与分析

3.1 常见深冷柔性绝热材料的老化实验设计

探究深冷型柔性绝热材料随时间推移的性能衰退现象，科研人员往往开展多样化的老化测试，以模拟材料在实际应用中可能遭遇的多种环境挑战。这些测试方案涵盖了温度极端变化、湿度调节以及力学负荷等方面。具体来说，通过高低温交替测试，可以评估材料因温度波动而产生的热疲劳及物理性质退化，进而观察温度波动对材料力学和热传导性能的具体影响。湿度变化测试旨在揭示材料在潮湿环境中的退化过程，特别是水分入侵及其引起的体积膨胀对材料性能的潜在影响。而力学负荷测试则旨在重现材料在长期服役过程中所承受的

应力状态，以评价其在循环载荷下的耐久性。这些综合性的测试手段有助于全方位地揭示材料在不同外界条件下的退化规律，为科研工作提供了有利的数据基础。

3.2 老化测试结果与分析

通过对材料在老化测试前后的物理特性进行详细对比，如机械强度、热传导效率以及尺寸变化等参数，我们可以量化材料的老化水平。举例来说，材料在经历极端温度循环之后，其热传导性能可能会提高，而机械强度则可能降低，这反映出材料内部结构的退变以及热防护性能的降低。在湿度较大的环境测试中，材料可能会遭受膨胀或表面裂缝，这表明水分的侵入加快了材料的化学和物理退化过程。对这些测试数据的深入分析，能够清晰地揭示材料在长期使用过程中的性能退化情况，从而为材料的改进和使用提供科学参考。

4 提高深冷柔性绝热材料耐久性的措施与改进方向

4.1 材料改性与优化设计

4.1.1 新型材料的研发与改性

新型材料的研发和改性是提高深冷柔性绝热材料耐久性的核心方向之一。由于人们对绝热材料的要求越来越高，常规绝热材料已经难以适应当今社会对绝热材料的需要，开发出兼具优异耐久与优异综合效能的隔热绝热材料就变得十分必要。在低热导率、高力学、低温等条件下，以及在恶劣条件下长时间维持其结构稳定与功能不劣化的需求下，开发出一种新的柔性绝热材料。如将聚氨酯、硅橡胶等聚合物与陶瓷或金属材料进行组合，可提高材料的压缩强度及耐低温冲击能力。在此基础上，通过引入交联技术、表面修饰以及添加特定的元素等手段，提高聚合物的抗高温、抗氧化和抗湿度等性能。本文的研究与开发，不但可以改善低温环境下的隔热性能，而且还可以增强其在恶劣环境中的服役性能，为航空航天、液态天然气存储等领域的进一步发展奠定基础。

4.1.2 复合材料与纳米材料的应用

复合材料和纳米材料的结合是深冷柔性绝热材料发展的新趋势。复合材料是指将多种基体进行复合，使其功能优势互补，既能保证其在较低温度下的隔热效果，又能提高其使用寿命及机械性能。将玻璃纤维、碳纤维、芳纶等增强体与高分子基体复合，形成高强耐低温的复合材料，既可改善材料的耐冲击、耐高压，又可改善其耐老化能力。此外，通过添加纳米粒子来调控其微观结构，提高其热稳定性及耐腐蚀性能，具有十分重要的意

义。纳米粒子（纳米 SiO₂、纳米碳管等）可以在改善导热性能的前提下，增大比表面积，增大负载和接触面积。加强了材质的硬度。同时，利用纳米材料可以提高其自愈合能力，使其在发生微裂缝时可以通过分子之间的作用进行自愈合，达到提高其使用年限的目的。新型复合材料和纳米材料的有机融合促进了高性能和长寿命绝热材料的发展。

4.1.3 添加剂对性能提升的作用

适当添加助剂是提高低温软绝缘体性能的关键。在基体材料中加入适当的助剂，可以大幅度提高材料的热学、机械和化学性质。常用的助剂有增强剂、阻燃剂、抗氧化剂、防光剂、增塑剂等等。通过加入膨胀珍珠岩、滑石粉等无机填充物来改善其硬度及压缩强度，进而提升其在低温下的热稳定性能。而添加了阻燃剂，可以在一定程度上增强防火性能，并能阻止火焰在燃烧时的传热。

4.2 提高长期稳定性技术措施

4.2.1 防护涂层与表面处理

防护涂层与表面处理是改善深冷柔性绝热材料使用寿命的重要手段。其表面与外部环境直接接触，受到温度、湿度和氧化的影响；由于紫外光的作用是多方面的，所以对其进行表面处理或对其进行保护，可大大提高其耐老化、耐腐蚀性能。比如，在材料表面涂布含氟、硅烷等物质，可以有效地阻隔湿气、气体的渗入，延缓其老化进程。此外，保护涂层还能为材料提供一层物理上的保护，防止外界的恶劣环境对材料的腐蚀。在低温条件下，材料极易发生冻融损伤，而防护涂层能有效降低热循环及水分对材料表层结构的损伤，提高其耐候性能。另外，通过等离子体、激光表面改性等表面处理手段，调控材料的表面微结构，提高其耐磨、耐紫外、耐腐蚀等性能。采用上述保护涂料及表面处理工艺，可大幅提高深冷柔性绝热材料的服役寿命，并在长时间服役期间维持其性能稳定。

4.2.2 多层结构与复合设计

多层结构与复合设计是提升深冷柔性绝热材料服役性能的重要手段。将各种性能等级的材料按照一定的次序进行组合，可以最大限度地发挥各自的优点，降低其在服役期间的劣化速率。在多层次结构的设计中，通常采用软材料和刚性材料、保温材料和结构材料等相互交错叠加，构成多层次的复合结构。比如，外层采用耐磨防紫外线的材质，中间层采用优良的绝热材料，内层

采用柔软的或抗冻的材质。因此，本文提出一种新型复合材料，既可增强其力学性能，又可有效抵抗外界因素对其的侵蚀，减缓其老化过程。另外，复合材料的复合设计还可以优化材料间的界面作用，全面提升材料的综合性能。多层次结构和复合材料的组合设计大大提高了深冷柔性绝热材料的服役性能，在航空航天、深海勘探、冷链物流等领域具有重要的应用价值。

5 结束语

深入开展深冷柔性绝热材料的服役特性及时效特性研究，对提升柔性绝热材料的可靠性与适应性具有重要的理论与实际意义。本项目拟通过对极端低温环境下材料的失效行为进行系统的研究，掌握其在服役过程中的服役寿命与性能衰退规律，并据此提出有针对性的改善方案。在今后的研究中，将会伴随着新的高性能材料的研究与开发，以及先进的检测手段的发展，使其在服役过程中的长寿命、耐老化性能得到进一步提高。通过强化极端环境下材料的长期监控与评价，并辅以先进的智能维修技术，可有效延长深冷柔性绝热材料的使用寿命，确保其长效安全、高效运行。

参考文献

- [1] 张峰;李华.深冷柔性绝热材料的热性能及老化特性研究[J].低温工程,2023(5):45-50.
- [2] 王涛;刘伟.深冷环境下柔性绝热材料的热稳定性与老化行为分析[J].材料科学与工程,2022(3):123-128.
- [3] 陈鹏;孙丽.基于老化机制的深冷绝热材料性能退化模型[J].化工新型材料,2021(8):76-81.
- [4] 李华;高峰.数字化技术在井筒维修中的应用及效果分析[J].石油与天然气,2022(6):67-69.
- [5] 周建国;张俊.深冷柔性绝热材料的长期稳定性与抗老化性能评估[J].低温技术,2021(10):98-102.
- [6] 赵军;许彬.深冷柔性绝热材料在航天领域的应用与研究进展[J].航天材料学报,2022(4):55-60.
- [7] 刘洋;朱军.深冷柔性绝热材料的微观结构与老化行为分析[J].高分子材料科学与工程,2021(2):83-88.

作者简介：高永涛，男，1974年5月出生，毕业院校：河北水利电力学院，所学专业：建筑工程，职称级别：工程师。