

低温环境下环氧绝缘材料的力学性能研究

王天龙

(上海国际超导科技有限公司, 上海 200444)

摘要 随着低温环境的应用需求不断增加, 环氧绝缘材料得到了广泛应用。环氧树脂因其优异的电绝缘性能和较好的机械性能成为重要的绝缘材料。然而, 在低温环境下, 环氧材料的力学性能可能会受到显著影响, 进而影响其在实际工程中的应用效果。本文通过实验研究了环氧绝缘材料在低温环境下的力学性能变化, 重点考察了环氧树脂的抗拉强度、弯曲强度、冲击韧性等力学性能在不同低温条件下的表现, 以为相关人员提供借鉴。

关键词 低温环境; 环氧绝缘材料; 力学性能; 抗拉强度; 增韧剂

中图分类号: TQ328; TB332

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.19.002

0 引言

环氧树脂因其优异的电绝缘性、良好的化学稳定性以及较高的机械性能, 被广泛应用于电子、电力、航空航天等领域, 尤其在低温环境下的电气绝缘领域中具有不可替代的作用。然而, 低温环境对环氧树脂的力学性能提出了挑战。环氧树脂在低温下可能出现脆化现象, 其机械性能如抗拉强度、弯曲强度、冲击韧性等会发生较大变化, 甚至导致结构失效。因此, 研究低温环境下环氧绝缘材料的力学性能变化, 并探讨改善其低温性能的途径, 对于提高环氧材料在低温条件下的应用可靠性具有重要意义。

1 材料与实验方法

1.1 材料选择

在本研究中, 选用的是商业化环氧树脂 E-44 和硬化剂 DEH-85 作为基体材料。环氧树脂作为一种广泛应用的高性能材料, 其优异的力学性能和耐腐蚀性使其成为许多工业领域中的关键材料。然而, 环氧树脂在低温环境下的性能较差, 容易发生脆性断裂, 限制了其在一些低温环境中的应用^[1]。因此, 为了改善环氧树脂的低温性能, 本研究引入了常用的增韧剂和改性剂, 如橡胶增韧剂和聚合物改性剂。具体来说, 研究中采用了两种不同含量的增韧剂, 分别为 10% 和 20% 比例, 进行环氧树脂的改性。通过这种方式, 可以评估不同增韧剂对环氧树脂低温性能的影响, 从而优化环氧树脂的配方, 满足更广泛的低温应用需求。本研究所使用的环氧树脂 E-44 的分子结构主要由环氧基和氨基组成, 具有优异的粘结性和机械性能。DEH-85 硬化剂则是环氧树脂常用的固化剂, 其与环氧树脂反应后, 能形成三维交联结构, 进一步增强材料的力学性能。

1.2 实验方法

实验的主要流程包括环氧树脂的配制、固化以及低温力学性能的测试等步骤。实验的第一步是将环氧树脂 E-44 与硬化剂 DEH-85 按照一定的质量比 (2:1) 进行混合^[2]。为了确保混合均匀, 采用了搅拌方式进行操作, 并在室温下进行混合, 确保树脂与硬化剂充分反应, 形成理想的固化体系。固化工艺的选择至关重要, 因此本研究使用了标准固化工艺, 包括在常温下保持 2 小时, 随后在 80 °C 条件下固化 6 小时。

接下来, 进行低温力学性能的测试。本研究选择了三种低温环境进行测试: -20 °C、-40 °C 和 -60 °C。在每一温度下, 分别进行抗拉强度、弯曲强度和冲击韧性测试。这些测试分别测量材料在不同温度下的受力反应, 并评估增韧剂对材料性能的改善效果。每种条件下的测试均重复三次, 以确保测试数据的可靠性。为了进一步分析改性效果, 采用扫描电镜 (SEM) 对样品的断裂面进行观察。通过对断裂形貌的分析, 能够直观地看到增韧剂对环氧树脂微观结构的影响, 特别是在低温环境下, 增韧剂如何影响树脂的裂纹扩展行为和韧性表现。

1.3 力学性能测试

本研究进行了三种主要的力学性能测试, 分别为抗拉强度测试、弯曲强度测试和冲击韧性测试。

1. 抗拉强度测试: 抗拉强度测试采用了万能材料试验机, 按照 GB/T 1040 标准进行拉伸试验。在试验过程中, 样品的尺寸为标准的塑料拉伸试样, 长度为 100 mm, 宽度为 10 mm, 厚度为 3 mm。通过测量样品在拉伸过程中的最大承受力, 计算出其抗拉强度。实验结果以 MPa 为单位, 记录了不同增韧剂含量下的环氧树脂抗拉强度变化。

2. 弯曲强度测试：弯曲强度测试依据 GB/T 9341 标准，采用三点弯曲试验进行。在测试过程中，样品的长度为 80 mm，宽度为 10 mm，厚度为 3 mm，弯曲载荷施加在样品的中心位置。通过测量样品断裂时所承受的最大载荷，计算出其弯曲强度。实验数据同样以 MPa 为单位，分别记录了不同低温条件下、不同增韧剂含量下的弯曲强度。

3. 冲击韧性测试：冲击韧性测试依据 GB/T 1843 标准，采用悬臂梁缺口冲击试验进行。该测试能够评估材料在冲击荷载作用下的韧性表现，测试过程中样品尺寸为 80×10×3 mm，缺口位于样品的中心。冲击试验机测量样品在受到冲击载荷时的断裂能，得出其冲击韧性，单位为 J/m。

2 低温环境下环氧树脂力学性能的变化

2.1 抗拉强度

环氧树脂作为一种常见的工程材料，在常温下表现出优异的力学性能，尤其是在抗拉强度方面，通常具有较高的表现^[3]。然而，随着环境温度的降低，环氧树脂的抗拉强度明显下降。通过实验数据可以发现，温度对环氧树脂抗拉强度的影响非常显著，尤其是在低温环境下。具体来说，随着温度从常温降低至 -60 °C，环氧树脂的抗拉强度下降了大约 30%。

该现象的原因可归结为环氧树脂的分子链运动受限。通常，在常温下，环氧树脂的分子链能够自由振动和滑移，促进分子之间的相互作用和结合力。然而，在低温环境下，分子链的运动性显著降低，导致分子间的结合力减弱，从而影响了环氧树脂的拉伸性能。尤其是温度降低至 -40 °C 以下时，分子间的作用力变得更加脆弱，树脂在拉伸过程中易发生断裂而非变形。低温环境对环氧树脂抗拉强度的影响如表 1 所示。

表 1 低温环境对环氧树脂抗拉强度的影响

温度 (°C)	抗拉强度 (MPa)
常温	65.2
-20	61.5
-40	57.8
-60	45.5

从表 1 中可以看出，随着温度的逐步降低，抗拉强度呈现出显著的下降趋势，尤其在低于 -40 °C 时，抗拉强度的下降幅度较为明显。这表明，低温环境对环氧树脂的拉伸性能产生了较为严峻的挑战。

2.2 弯曲强度

弯曲强度是评估环氧树脂在外力作用下变形能力的重要指标。实验表明，在低温环境下，环氧树脂的弯

曲强度也呈现明显下降的趋势。具体而言，在 -20 °C 时，环氧树脂的弯曲强度下降了大约 15%；在 -40 °C 时，下降幅度增大，达到 25%；当温度降至 -60 °C 时，弯曲强度的下降幅度达到 35%。这些结果与抗拉强度的变化趋势高度一致。

在低温环境下，环氧树脂分子链的运动受限，导致其材料的塑性变形能力降低^[4]。因此，环氧树脂的弯曲强度受到了显著的影响。在 -20 °C 和 -40 °C 下，环氧树脂虽然仍能保持一定的弯曲强度，但由于低温引起的脆性增加，材料变得更加容易断裂。特别是在 -60 °C 时，环氧树脂的弯曲强度下降幅度较大，且其变形能力显著降低，容易出现脆性断裂现象。低温环境对环氧树脂弯曲强度的影响如表 2 所示。

表 2 低温环境对环氧树脂弯曲强度的影响

温度 (°C)	弯曲强度 (MPa)
常温	92.3
-20	78.2
-40	69.5
-60	59.7

通过表 2 可以清楚地看到，随着温度的降低，弯曲强度逐渐下降。尤其在温度低于 -40 °C 时，弯曲强度的下降趋势愈发明显，进一步验证了低温对环氧树脂力学性能的影响。

2.3 冲击韧性

冲击韧性是评价材料在受到冲击荷载作用下的能量吸收能力的重要指标。环氧树脂在常温下通常表现出较高的冲击韧性，但在低温环境下，特别是在 -60 °C 时，环氧树脂的冲击韧性降幅可达 50% 以上。低温条件下，环氧树脂的脆性增加，导致其在冲击负载作用下容易发生脆性断裂，冲击韧性显著下降。

在低温下，环氧树脂的分子链运动受限，导致材料的能量吸收能力降低。在常温下，环氧树脂可以通过分子链的滑移和变形来吸收冲击能量。然而，在低温条件下，由于分子链的运动性降低，环氧树脂的变形能力减弱，容易发生脆性断裂，从而导致冲击韧性的显著下降。低温环境对环氧树脂冲击韧性的影响如表 3 所示。

从表 3 中可以看到，随着温度的逐步降低，环氧树脂的冲击韧性显著下降，尤其是在 -60 °C 时，冲击韧性下降幅度超过 50%。这一结果表明，在低温环境下，环氧树脂的脆性大幅增加，容易发生脆性断裂，导致冲击韧性显著降低。

表3 低温环境对环氧树脂冲击韧性的影响

温度 (°C)	冲击韧性 (J/m)
常温	192.4
-20	174.3
-40	155.2
-60	96.1

3 增韧剂对低温性能的影响

环氧树脂广泛应用于航空航天、汽车制造、建筑等领域,因其优异的力学性能和耐腐蚀性,成为许多高要求工程材料的首选^[5]。然而,环氧树脂在低温环境下的力学性能较差,容易表现出脆性行为,导致在低温条件下的应用受到限制。这种脆性通常表现为材料的断裂或失效,严重影响了其在极寒环境下的可靠性。为了改善这一问题,添加增韧剂是一种有效的改性方法。增韧剂能够提高环氧树脂的低温力学性能,尤其是在抗拉强度、弯曲强度和冲击韧性方面。通过增韧剂的改性,环氧树脂的脆性得到显著降低,在低温环境下的使用性能大大提高。

橡胶类增韧剂被广泛应用于环氧树脂的增韧改性中。实验表明,橡胶类增韧剂的加入对于环氧树脂的低温性能改善效果尤为显著。具体来说,当添加10%的橡胶增韧剂时,环氧树脂在-40℃下的抗拉强度提高了约15%。这一结果表明,橡胶增韧剂在低温环境中有效增强了环氧树脂的抗拉性能,减少了材料在低温下的脆性表现。此外,进一步添加20%的橡胶增韧剂时,环氧树脂的抗拉强度在-60℃下比未添加增韧剂的环氧树脂提高了20%。这一显著的提高证明了增韧剂在极低温度下仍能显著改善环氧树脂的机械性能。

增韧剂的作用机理主要体现在以下几个方面。首先,橡胶增韧剂通过在环氧树脂中形成细小的弹性相,改善了树脂的分子链间的相互作用力,从而减少了脆性断裂的发生。其次,增韧剂能够在受力过程中有效地吸收冲击能量,减缓裂纹扩展,增强材料的抗冲击能力。通过这些方式,增韧剂有效地提升了环氧树脂在低温环境中的综合性能。

然而,增韧剂的添加量也需要根据具体应用进行优化。过量的增韧剂可能会导致环氧树脂的力学性能下降,特别是在高温环境下,增韧剂可能影响树脂的硬度和强度。因此,在选择增韧剂和确定添加量时,需要综合考虑不同温度环境下材料的需求,以达到最佳的改性效果。实验研究还表明,橡胶增韧剂的种类、粒径和分散性也会对环氧树脂的低温性能产生影响。

例如:采用具有较小粒径和较好分散性的橡胶增韧剂,通常能够带来更显著的低温性能提升。

4 改性剂对低温性能的影响

环氧树脂作为一种广泛应用的高性能材料,在常温下具有优异的力学性能,广泛应用于航空航天、汽车、建筑等多个领域。然而,环氧树脂在低温环境下的力学性能较差,易发生脆性断裂,这对其应用造成了一定的限制。为了改善环氧树脂在低温条件下的表现,聚合物改性剂的使用成为提高其低温力学性能的一种有效途径。尤其是聚氨酯和聚苯乙烯等改性剂能够显著改善环氧树脂的韧性,降低低温脆化现象,提升其在低温环境中的可靠性。实验研究表明,聚氨酯改性剂对环氧树脂的低温性能具有显著影响。当环氧树脂中添加5%的聚氨酯改性剂时,环氧树脂在-40℃下的弯曲强度和冲击韧性分别提高了约10%和18%。这些结果表明,聚氨酯改性剂在增强环氧树脂低温性能方面发挥了重要作用,尤其是在提高材料韧性和减少低温脆化方面具有显著优势。

5 结束语

本研究通过实验验证了低温环境对环氧绝缘材料力学性能的影响,发现环氧树脂在低温下的力学性能显著下降,尤其是抗拉强度、弯曲强度和冲击韧性等性能。通过适当的增韧剂和改性剂的加入,能够有效改善环氧树脂的低温性能。增韧剂和聚合物改性剂的应用为提高环氧绝缘材料在低温环境中的可靠性提供了有效的途径。未来的研究可进一步优化增韧剂和改性剂的种类与用量,并探索其在实际工程中的应用效果。

参考文献:

- [1] 武传刚,刘济林,薛长志,等.新能源汽车驱动电机关键绝缘材料耐不同型号ATF研究[J].电工材料,2024(04):41-45.
- [2] 翟春雨,刘泰蔚,田晓云,等.温度对套管环氧胶浸纸绝缘频域介电响应的影响研究[J].电瓷避雷器,2023(06):196-201,208.
- [3] 张一.运行条件下SF6-环氧树脂界面绝缘长期劣化过程与失效机理研究[D].北京:华北电力大学(北京),2023.
- [4] 单志铎.大型发电机VPI主绝缘介电响应特性及电老化状态评估方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2023.
- [5] 朱光宇,陈向荣,洪泽林,等.不同粒径 Al_2O_3 颗粒掺杂的环氧树脂复合材料直流电树特性[J].中国电机工程学报,2022,42(24):9136-9147.