

特种电缆在极端环境下的可靠性分析

周春和

江苏华能电缆股份有限公司，江苏 高邮 225699

摘 要： 特殊电缆在极端环境中的可靠性分析对其在航空航天、深海探测等关键领域的应用至关重要。本文首先介绍了极端环境对特殊电缆性能的威胁及其重要性。接着，分析了不同极端环境（高温、低温、高辐射、腐蚀性等）对特殊电缆性能的影响机理，探讨了电缆材料、结构与失效模式之间的关系。随后，通过统计分析和物理模型，建立了特殊电缆在极端环境下的可靠性评估方法。针对提升电缆可靠性的技术需求，提出了先进材料开发、强化结构设计和智能监控技术的发展方向。最后，总结了当前技术局限性，并展望了未来研究的潜力。本文旨在为特殊电缆的可靠性设计与应用提供理论参考与技术指导。

关 键 词： 特殊电缆；极端环境；可靠性分析；失效机理；先进材料；智能监控

Reliability Analysis of Special Cables in Extreme Environments

Zhou Chunhe

Jiangsu Huaneng Cable Co., LTD. Gaoyou, Jiangsu 225699

Abstract： The reliability analysis of special cables in extreme environments is critical to their applications in crucial fields such as aerospace and deep-sea exploration. This paper first highlights the threats posed by extreme environments to the performance of special cables and emphasizes their importance. Subsequently, it examines the mechanisms by which various extreme conditions (high temperature, low temperature, high radiation, corrosion, etc.) impact cable performance, exploring the relationships between cable materials, structures, and failure modes. Reliability evaluation methods under extreme environments are established through statistical analysis and physical modeling. To address the need for greater cable reliability, the paper proposes advancements in material development, enhanced structural design, and intelligent monitoring technologies. Finally, the current limitations are summarized, and future research directions are outlined. This paper aims to provide theoretical references and technical guidance for the reliability design and application of special cables.

Keywords： special cables; extreme environments; reliability analysis; failure mechanisms; advanced materials; intelligent monitoring

引言

随着现代工业技术的快速发展，电缆作为输电和信号传输的关键载体，在多种苛刻环境下发挥着不可或缺的作用。这些环境包括航空航天的极度高低温、高速铁路的强机械振动、海洋工程中的高湿度腐蚀环境以及核电站等场景的强辐射暴露。传统电缆在上述极端环境下容易受到材料劣化、机械损坏或电气性能失效的影响，从而导致安全隐患或系统故障。因此，为适应这些特殊场景需求，特种电缆成为一种针对环境特殊需求而设计的关键技术产品。特种电缆不仅在材料选择上更注重耐候性、耐辐射性或耐腐蚀性，还需通过优化结构和制造工艺来保障其在恶劣条件下的长时间可靠运行^[1]。

一、极端环境对特种电缆的作用机理

特种电缆作为在极端环境下运行的关键元件，其性能和可靠性直接受到外部环境的影响。极端环境包括高温、低温、高湿度、腐蚀性气体、强辐射以及机械应力和振动等因素，这些环境条件会以各种方式影响电缆材料的性能和寿命。以下分别探讨这些环境因素的具体作用机理。

（一）高温环境对电缆的影响

高温环境是一种常见的极端工况，对电缆的绝缘层、导体和

护套材料都可能产生显著影响：

- 热老化：高温会加速电缆材料中聚合物的分子链裂解，导致绝缘层和护套的机械性能下降，如脆化现象。这被称为热氧化老化过程，尤其在持续高温环境下更为显著。
- 介电性能下降：绝缘材料在高温环境下的介电常数和击穿电压会降低，影响电缆的电气性能，增加故障风险。
- 热塑性变形：对于热塑性材料制成的护套，高温可能导致其软化或融化，影响结构稳定性和机械强度。
- 金属导体的热膨胀：高温会引起导体的热膨胀，特别是

作者简介：周春和（1974.06—），男，汉族，江苏扬州高邮市人，大专，工程师，研究方向：特种电缆研发，身份证号：321022197406190816 邮箱：245749086@qq.com

铝和铜导体的线性膨胀系数较高，这可能导致接触点松动或电阻变化。

（二）低温环境对电缆的影响

低温环境同样对特种电缆具有挑战性，尤其是在极地或高海拔地区，其影响体现在以下几个方面：

1. 绝缘和护套材料的低温脆化：在低温环境下，聚合物材料可能失去柔韧性，表现出脆化特性。裂纹容易在机械载荷或应力集中区域产生，影响电缆的机械性能。
2. 导体电阻变化：低温会降低导体的电阻，这对传输效率可能是一个积极的影响，但对系统的热管理需加以注意。
3. 动态性能的下降：低温环境会限制电缆的弯曲半径和灵活性，电缆的动态适应性显著降低，不适合频繁操作或运动场景。

（三）高湿与腐蚀性环境的影响

高湿度和腐蚀性气体环境对特种电缆影响复杂多样，主要表现在：

1. 绝缘性能的降低：水分侵入电缆后会极大降低绝缘电阻，尤其在长时间暴露的情况下，可能导致绝缘失效。
2. 电化学腐蚀：腐蚀性气体（如氯气、硫化氢）与湿度结合会加速金属部件的腐蚀，例如屏蔽层或导体的氧化过程，缩短电缆寿命。
3. 霉菌生长：在高湿环境中，某些聚合物材料可能成为霉菌生长的温床，进一步削弱材料的结构性能。
4. 外护套的渗透与劣化：高湿环境会增加护套材料的吸水性，使得电缆材料内部的水分迁移加剧，从而损害绝缘层。

（四）强辐射环境对电缆的影响

在核工业和空间应用等场景中，特种电缆通常面临辐射环境的考验，这对电缆材料的化学结构和性能提出了特殊要求：

1. 辐射交联效应：高剂量辐射会引发聚合物材料的交联反应，表现为机械强度和热稳定性的增强。然而，过量辐射会导致材料脆化。
2. 介电性能变化：辐射可能导致绝缘材料中电荷累积，形成空间电荷效应，这对电缆的长期电气安全构成威胁。
3. 颜色和外观变化：一些聚合物材料暴露于辐射下会发生显著的着色或表面老化现象，这可能成为性能退化的早期指示信号。
4. 失重现象：辐射环境中，高分子材料可能出现小分子化化合物的挥发或分解，导致重量损失及结构变化。

二、特种电缆在极端环境下的可靠性分析

在极端环境下，特种电缆的可靠性分析是一项复杂而系统的工作，需要结合材料劣化机制、关键结构的失效模式以及科学的分析方法来进行全面评估。本部分将围绕材料的劣化机制、电缆的典型失效模式、常用的可靠性分析方法及性能评估指标展开探讨。

1. 电缆材料的劣化机制

特种电缆在极端环境中长期运行，其材料容易受到外界物

理和化学作用的影响而发生劣化。劣化机制主要包括以下几个方面：

●热氧老化：聚合物类绝缘材料（如交联聚乙烯、聚氯乙烯等）在高温和氧气的联合作用下，其分子链会发生断裂或交联，导致材料的机械强度和电气绝缘性能下降。热氧老化是导致电缆使用寿命缩短的重要原因。

●辐射老化：核电、航空航天等应用场景中，特种电缆需在强辐射环境下工作。电缆的聚合物材料在受到 γ 射线、电子束等辐射作用时，可能发生分子链断裂、交联、氧化等反应，从而造成材料性能恶化。

●水解作用：在高湿度或水下环境中，某些电缆材料（如酯类聚合物）可能发生水解反应，导致绝缘性能下降，伴随机械柔韧性减弱，尤其是在持续浸水环境中表现尤为显著。

●金属导体的氧化和退化：金属导体（如铜、铝等）长时间暴露于高温、高湿或腐蚀性气体（如氢气、硫化物）环境中，容易发生氧化或氢脆现象，导致机械强度下降和导电性降低。此外，高频震动可能引发金属疲劳问题，使导体材料逐渐丧失可靠性。

2. 电缆关键结构的失效模式

特种电缆的结构复杂，其关键部件在极端环境中容易出现以下失效模式：

●屏蔽层的失效：屏蔽层主要用于保护电磁兼容性和减少外界干扰。然而，在高温、高湿或机械应力反复作用下，屏蔽层的完整性可能受到破坏，如出现开裂或剥离，影响信号传输性能。

●电缆芯的退化：电缆芯不仅需要满足导电性能要求，还需承受一定的机械强度。在长时间高温、高压场作用下，电缆芯的表面可能出现裂纹或腐蚀现象，进而引发整体结构的机械损伤。

●护套的老化和破损：护套是电缆的重要保护层，其劣化直接影响电缆的机械和电气性能。在极端环境中，护套可能因热胀冷缩频繁、紫外线照射或化学腐蚀而失效，如发生变硬、开裂或脱落。

●接头和终端连接的可靠性问题：接头和终端作为电缆系统的薄弱环节，容易因温差变化、潮气侵入或不良安装工艺导致接触不良、局部电弧或击穿等问题。这类问题可能进一步扩展，导致整个电缆系统失效。

3. 可靠性分析方法

为了准确评估特种电缆在极端环境下的性能稳定性，可采用以下可靠性分析方法：

●加速老化试验：通过模拟电缆在实际应用中可能遭遇的极端环境条件（如高温、强辐射），并加速其老化过程。例如：

○热老化试验：将电缆样品置于高温炉中测试，观察其老化特性。

○辐射老化试验：利用 γ 射线或电子束设备分析电缆材料在强辐射下的性能变化。

●振动疲劳试验：针对电缆在震动频繁的工作场景，开展多频率、多幅值的振动实验，以评估其疲劳寿命。同时结合仿真技术，预测长时间振动作用下的劣化行为。

●综合环境试验：在实验室中，模拟多重极端环境（如高温-高湿-振动联合测试），观察电缆在复合应力环境中的可靠性特点。这种方法更加贴近实际运行中的复杂工况。

4. 性能评估指标

在可靠性分析中，需选取合适的性能评估指标，以便对电缆的工作能力和寿命进行量化评估。以下是主要的性能评估指标：

●电气性能：

○绝缘电阻：反映电缆绝缘材料的电气完整性，绝缘电阻降低会导致泄漏电流增加，影响系统安全。

○耐压强度：评估电缆在高电压作用下承受电气击穿的能力，是衡量电缆可靠性的重要参数。

●机械性能：

○拉伸强度：测量电缆或其材料抵抗外力拉伸的能力，是防止断裂的关键指标。

○抗疲劳性：在多次反复弯曲后保持机械完整性的能力，尤其重要于机械振动频繁的应用场景。

综上所述，通过对特种电缆在极端环境下的性能全面分析，可以揭示其劣化规律、失效机理和运行寿命特性，为提高其可靠性设计和长期稳定运行提供科学依据。

三、提升特种电缆可靠性的关键技术

在极端环境中提升特种电缆的可靠性，需要通过多方面的技术手段进行综合优化，从材料、结构、制造工艺到监测和维护，全方位确保电缆性能的稳定性与耐久性。以下将针对关键技术进行详细探讨^[2]。

（一）材料技术的改进

特种电缆可靠性的提升，离不开材料的选择和改性。优质材料是电缆应对极端环境的基础：

●耐高温与低温材料：针对高温环境，采用耐热聚合物、陶瓷基复合材料等高性能材料；对低温环境，需选用低温柔性材料如氟塑料或聚氨酯改性树脂，确保材料在极低温条件下保持良好的柔韧性和机械强度。

●抗腐蚀材料：在化学腐蚀环境中，研究采用高耐腐蚀性材料，如稀有金属涂层或复合防护层，以抵御酸碱化学品和盐雾腐蚀。

●抗辐射与抗老化材料：利用交联聚乙烯、聚酰亚胺等材料提高电缆长期抗老化性能，同时添加抗辐射剂或引入特殊屏蔽层以适应强辐射场景。

（二）结构设计的优化

电缆的独特结构设计是确保其性能稳定的关键。通过对层级、保护套以及内部排列的优化，能够显著增强电缆的承载能力和环境适应性：

●多层复合结构：采用多层屏蔽和保护结构，例如内外两层护套设计，外部材料主防护机械损伤，内部材料提高耐温或电磁干扰防护能力。

●功能分区设计：将电缆的各部分功能模块化，例如导体、屏蔽层和外护套分别针对不同的环境需求进行设计，确保各单元具备最优性能。

●抗机械冲击结构：通过在电缆加入金属铠装、增强芯或使用高强度纤维编织层，显著提高抗压、抗拉及耐机械振动能力。

（三）制造工艺的创新

制造工艺是电缆性能的重要保障，采用先进技术确保材料与结构的完美结合：

●精密挤出技术：通过高精度挤出工艺，确保护套与绝缘层的均匀性和稳定性，避免空隙或偏差导致的性能降低。

●交联工艺改进：化学交联或物理交联（如电子束交联）优化绝缘层的分子结构，提升耐压性能和抗老化性能。

●表面处理与防护涂层技术：采用等离子表面改性、电镀涂层等工艺，增强电缆外表面对腐蚀和磨损的抵抗能力。

（四）环境保护技术的增强

通过外部保护技术，有效防止极端环境对电缆的直接侵害，从而间接提高电缆寿命：

●耐环境防护层：应用抗紫外线、防水、防沙尘涂层技术，提升电缆在室外恶劣环境中的长期稳定性。

●气密性与防水性增强：采用气密封装设计，并在多层结构中加入防水阻隔层，避免湿气侵入导致绝缘性能降低。

●防火阻燃技术：引入低烟无卤阻燃材料和高效防火涂层，确保电缆在火灾环境中的安全性。

四、结语

通过对特殊电缆在极端环境下的可靠性分析，本研究总结如下重要结论：极端环境（如高温、强寒、高湿、高压及强电磁场等）对特殊电缆的性能和寿命有着显著影响。这些环境因素可能导致电缆材料老化、机械性能劣化和电气性能下降，从而降低其运行可靠性。在研究中，我们发现优化材料特性、改进电缆结构设计以及采用先进的制造工艺可以有效地提高电缆的耐环境性和可靠性。此外，智能监测和预测技术的引入也在及时发现隐患方面取得了显著成效。研究表明，采用耐高温聚合物材料、复合绝缘层结构以及涂覆特种保护涂层等方法能够显著延缓电缆的环境退化过程。同时，基于多变量分析的寿命预测模型可以为特殊电缆的设计和维护提供可靠参考，从而最大化其使用寿命。在提高特殊电缆可靠性的技术措施中，材料工程与智能监控技术的结合发挥了至关重要的作用^[3]。

参考文献

- [1] 赵斯佳；杜协和. 10kV 级电机电缆引出线及其连线绝缘技术研究 [J]. 防爆电机, 2022(05).
- [2] 尚朔. 电机引出线为多导电排结构的设计 [J]. 上海大中型电机, 2013(01).
- [3] 沈宏谋, 王丕力. 电磁调速电机激磁线圈引出线保护套 [J]. 中小型电机, 1995(05).