

电线电缆的燃烧性能及其不合格原因分析与应对策略

张益鑫

上海起帆电缆股份有限公司 上海 201514

摘要: 电线电缆的燃烧性能直接关系到电力系统的安全运行、环境保护以及人身安全。本文从燃烧性能的定义与评价指标出发,分析了燃烧性能对电缆安全运行、环境和人身安全以及电力系统稳定性的影响。通过对材料、工艺和设计因素的系统分析,揭示电线电缆燃烧性能不合格的主要原因,包括绝缘材料阻燃性能不足、挤出工艺缺陷、交联工艺不完善以及结构设计不合理等。提出材料优化、工艺改进和设计优化等应对策略,包括新型阻燃材料的应用、材料配方的改进、挤出和交联工艺的优化以及导体与绝缘层的匹配设计优化,以期有效提升电线电缆的燃烧性能,降低火灾风险,保障电力系统的安全稳定运行。

关键词: 电线电缆; 燃烧性能; 阻燃材料; 工艺优化; 设计优化; 火灾风险

引言

电线电缆作为电力传输的重要载体,其燃烧性能直接关系到电力系统的安全运行和火灾风险控制。随着电力需求的增长和电缆敷设密度的增加,电缆火灾事故频发,造成了严重的人员伤亡和财产损失。以及燃烧性能差的电缆在火灾中容易引发电力系统瘫痪,影响关键设施的正常运行,造成巨大的经济损失。研究电线电缆的燃烧性能及其不合格原因,并提出有效的应对策略,具有重要的理论意义和实际应用价值。

一、电线电缆燃烧性能概述

(一) 燃烧性能的定义与评价指标

电线电缆的燃烧性能是指其在火灾条件下抵抗燃烧、延缓火焰蔓延以及减少有毒气体释放的能力。燃烧性能的评价指标主要包括氧指数(OI)、垂直燃烧性能(如UL94标准)、烟密度、毒性气体释放量等。氧指数反映了材料在燃烧时所需的最低氧气浓度,数值越高,阻燃性能越好;垂直燃烧性能则通过燃烧时间、滴落物等参数评估材料的阻燃等级。烟密度和毒性气体释放量则直接关系到火灾中的人员逃生和救援效率^[1]。例如,低烟无卤电缆在燃烧时产生的烟雾和有毒气体较少,能够有效提高火灾中的能见度并降低人员中毒风险。

(二) 燃烧性能对电线电缆安全运行的影响

电线电缆的燃烧性能直接影响其在实际应用中的安全性和可靠性。燃烧性能差的电缆在过载或短路情况下容易引发火灾,导致电气系统瘫痪甚至引发大规模停电事故。例如,在高层建筑中,电缆燃烧性能不足容易导

致火灾迅速蔓延,造成严重的人员伤亡和财产损失。

(三) 燃烧性能对环境和人身安全的影响

电线电缆燃烧过程中释放的有毒气体(如一氧化碳、氯化氢等)和浓烟对环境和人身安全构成严重威胁。例如,聚氯乙烯(PVC)电缆在燃烧时会释放大量氯化氢气体,不仅腐蚀设备,还会对人体呼吸道造成严重伤害。此外,燃烧性能差的电缆在火灾中容易形成“烟囱效应”,加速火焰蔓延,增加灭火难度。例如,在地铁隧道等封闭空间中,电缆燃烧产生的烟雾和有毒气体会迅速充满整个空间,严重影响人员疏散和救援工作^[2]。提高电缆的燃烧性能对于减少火灾中的环境危害和人员伤亡具有重要意义。

(四) 燃烧性能对电力系统稳定性的影响

电线电缆的燃烧性能直接关系到电力系统的稳定性。在火灾情况下,燃烧性能差的电缆会导致电力供应中断,影响关键设施(如医院、数据中心)的正常运行。例如,数据中心对电力供应的连续性要求极高,一旦电缆因燃烧性能不足引发火灾,容易导致服务器宕机,造成巨大的经济损失。此外,燃烧过程中电缆的绝缘层损坏还会引发短路,进一步扩大事故范围。提升电缆的燃烧性能不仅是防火安全的需求,也是保障电力系统稳定运行的重要措施。

二、电线电缆燃烧性能不合格的原因分析

(一) 材料因素对燃烧性能的影响

电线电缆的燃烧性能首先取决于其材料的选择和性能。材料因素直接决定了电缆在高温或火灾条件下的表现。

绝缘材料是电缆燃烧性能的核心组成部分。阻燃性能不足的绝缘材料在高温下容易分解并释放可燃气体，加速火焰蔓延。例如，普通聚乙烯（PE）材料在燃烧时热释放速率较高，且易产生熔滴，导致火焰扩散。相比之下，阻燃型聚乙烯（FRPE）通过添加阻燃剂（如氢氧化铝或氢氧化镁）能够有效延缓燃烧过程。阻燃剂的添加比例不当或分散不均匀会削弱其阻燃效果，导致电缆在实际火灾中无法达到预期的阻燃性能^[3]。

护套材料的热稳定性直接影响电缆在高温环境下的机械性能和燃烧性能。热稳定性差的护套材料在高温下容易软化、变形甚至分解，导致电缆结构破坏，加剧燃烧。例如，聚氯乙烯（PVC）护套在高温下会释放氯化氢气体，不仅腐蚀周围设备，还会降低电缆的阻燃性能。

（二）工艺因素对燃烧性能的影响

电线电缆的制造工艺对其燃烧性能具有重要影响。工艺缺陷容易导致材料性能无法充分发挥，甚至引入新的燃烧风险。

挤出工艺是电缆制造中的关键环节，直接影响绝缘层和护套层的均匀性和致密性。挤出温度过高或过低都会导致材料热老化或塑化不良，进而影响其阻燃性能。例如，挤出温度过高会导致阻燃剂分解失效，降低材料的阻燃效果；挤出温度过低则会导致材料塑化不完全，形成微观缺陷，成为燃烧过程中的薄弱点。

交联工艺通过提高材料的分子链交联度，增强其热稳定性和机械强度。交联工艺不完善会直接影响电缆的燃烧性能。例如，交联度不足的绝缘材料在高温下容易软化，失去绝缘性能，导致短路并引发火灾。此外，交联过程中如果温度或时间控制不当，还会导致材料局部过热或交联不均匀，形成性能薄弱区域，在火灾中成为燃烧的起始点^[4]。

（三）设计因素对燃烧性能的影响

电线电缆的结构设计对其燃烧性能具有重要影响。设计不合理会导致材料性能无法充分发挥，甚至加剧燃烧风险。

电缆的结构设计直接影响其热管理和燃烧性能。例如，多层绝缘结构设计中，如果各层材料的热膨胀系数差异过大，在高温下会产生分层现象，导致热量积聚并加速燃烧。此外，电缆的填充材料如果选择不当（如使用易燃的聚丙烯填充绳），在火灾中会成为火焰蔓延的通道，加剧燃烧风险。

导体与绝缘层的匹配设计对电缆的燃烧性能具有重

要影响。例如，导体截面积过大而绝缘层厚度不足，会导致电缆在过载情况下局部过热，引发绝缘层分解并燃烧。此外，导体表面粗糙度较高时，容易在绝缘层与导体之间形成微小气隙，这些气隙在高温下会成为局部放电的起点，进一步引发绝缘层燃烧。

三、提升电线电缆燃烧性能的应对策略

（一）材料优化对燃烧性能的提升作用

材料优化是提升电线电缆燃烧性能的核心途径之一。通过选用高性能材料和改进材料配方，可以有效提高电缆的阻燃性、热稳定性和环境适应性，从而降低火灾风险。

1. 新型阻燃材料的应用及其效果

新型阻燃材料的研发和应用为提升电线电缆燃烧性能提供了重要支持。通过改进燃烧过程中的热释放、烟密度和毒性气体释放等关键指标，有效提高电缆的防火安全性能。

无卤阻燃材料（如聚烯烃基无卤阻燃剂）是目前应用较为广泛的一类新型材料。与传统含卤阻燃材料相比，无卤材料在燃烧时不会释放氯化氢、溴化氢等有毒气体，且烟密度较低，能够有效改善火灾中的能见度，为人员逃生和消防救援创造有利条件。例如，在高层建筑中，采用无卤阻燃电缆可以减少火灾中烟雾对疏散通道的遮蔽，提高逃生成功率。

纳米阻燃材料（如纳米氢氧化镁、纳米黏土）通过纳米级分散效应，能够在较低添加量下实现优异的阻燃效果。纳米氢氧化镁在高温下分解吸热，生成耐火氧化物层，有效隔绝氧气和热量，延缓燃烧过程。此外，纳米黏土通过层状结构在燃烧过程中形成致密的炭层，进一步阻隔热量和氧气的传递，增强材料的阻燃性能。

2. 材料配方改进对燃烧性能的改善

材料配方的优化是提升电线电缆燃烧性能的关键手段之一。通过科学调整配方中各组分的比例和种类，可以有效改善电缆的阻燃性、热稳定性和环境安全性，从而降低火灾风险。

在聚氯乙烯（PVC）电缆中，增加无机阻燃剂（如氢氧化铝或氢氧化镁）的含量是提升阻燃性能的常用方法。氢氧化铝在高温下分解吸热，释放水蒸气，稀释可燃气体并降低燃烧温度。例如，在工业生产中，将氢氧化铝的添加量从30%提高到50%，可以使PVC材料的氧指数从25%提升至32%，有效增强了其阻燃性能。

增塑剂的种类和用量对电缆燃烧性能也有重要影响。传统邻苯二甲酸酯类增塑剂在燃烧时会释放有毒气体，

而环保型增塑剂（如环氧大豆油）不仅毒性低，还能提高材料的热稳定性。例如，在电缆制造中，采用环氧大豆油替代30%的邻苯二甲酸酯增塑剂后，燃烧时的烟密度降低了20%，且有毒气体释放量有效减少。

抑烟剂的添加是改善电缆燃烧性能的另一重要措施。钼化合物（如钼酸铵）作为高效的抑烟剂，能够在燃烧过程中促进炭层的形成，减少烟雾生成。例如，在低烟无卤电缆制造中，添加2%的钼酸铵后，燃烧时的烟密度降低了35%，有效提高火灾中的能见度^[5]。此外，抑烟剂与阻燃剂的协同作用可以进一步提升材料的综合性能。

（二）工艺改进对燃烧性能的提升作用

工艺改进是提升电线电缆燃烧性能的重要途径之一。通过优化制造工艺，可以有效提高材料的均匀性、致密性和热稳定性，从而增强电缆在高温或火灾条件下的表现。

1. 挤出工艺优化对燃烧性能的影响

挤出工艺是电线电缆制造中的关键环节，直接影响绝缘层和护套层的质量。优化挤出工艺参数（如温度、速度和压力）能够改善材料的微观结构，提升其阻燃性能。例如，在挤出过程中，温度过高会导致阻燃剂分解失效，而温度过低会导致材料塑化不完全，形成微观缺陷。通过精确控制挤出温度（通常控制在150℃~200℃之间），可以确保材料充分塑化且阻燃剂性能不受破坏。此外，优化挤出速度能够减少材料内部应力集中，避免形成裂纹或气隙，从而降低燃烧过程中火焰蔓延的风险。

2. 交联工艺精细化控制对热稳定性的提升

交联工艺通过提高材料的分子链交联度，能够有效增强电缆的热稳定性和机械强度。精细化控制交联工艺参数（如温度、时间和交联剂用量）是提升燃烧性能的关键。例如，在过氧化物交联工艺中，交联温度过高会导致材料局部过热，形成性能薄弱区域；而温度过低会导致交联度不足，降低材料的热稳定性。通过将交联温度控制在170℃~190℃之间，并确保交联时间充足（通常为2~4分钟），可以实现材料均匀交联，提高其耐热性和阻燃性。此外，优化交联剂用量（如过氧化二异丙苯的添加量）能够避免交联过度或不足，确保材料在高温下仍能保持稳定的性能。

（三）设计优化对燃烧性能的提升作用

设计优化是提升电线电缆燃烧性能的重要环节。通过改进电缆的结构设计和优化导体与绝缘层的匹配关系，

可以有效提高电缆的热管理能力和阻燃性能，从而降低火灾风险。

1. 结构设计改进对燃烧性能的促进作用

电缆的结构设计直接影响其热分布和燃烧性能。合理的结构设计能够延缓火焰蔓延并减少热量积聚。例如，采用多层绝缘结构设计时，通过在各层之间添加阻燃隔离层（如陶瓷化硅橡胶），可以在高温下形成致密的陶瓷化屏障，有效隔绝氧气和热量，延缓燃烧过程。此外，优化电缆的填充材料设计（如使用阻燃型玻璃纤维填充绳）能够减少可燃材料的比例，降低火灾中的燃烧负荷。

2. 导体与绝缘层优化匹配对燃烧性能的增强

导体与绝缘层的匹配设计对电缆的燃烧性能具有重要影响。优化匹配关系可以提高电缆的热稳定性和阻燃性能。例如，在高压电缆设计中，通过增加绝缘层厚度并选用高耐热材料（如交联聚乙烯XLPE），可以有效提高电缆的耐高温等级和阻燃性能。此外，导体表面处理工艺的改进（如采用光滑镀层或涂覆阻燃涂层）能够减少导体与绝缘层之间的气隙，避免局部放电引发的绝缘层分解和燃烧。

结语

电线电缆的燃烧性能是保障电力系统安全运行和降低火灾风险的关键因素。通过材料优化、工艺改进和设计优化等综合策略，能够有效提升电缆的燃烧性能，降低火灾风险。随着材料科学和制造技术的不断发展，电线电缆的燃烧性能将得到进一步提升，为电力系统的安全稳定运行提供更加可靠的保障。

参考文献

- [1] 杨建, 潘清, 邵迅之, 等. 电线电缆燃烧性能试验标准及材料、工艺研究[J]. 上海电气技术, 2024, 17(04): 101-104.
- [2] 赵迪. 阻燃电线电缆标准体系对比[J]. 电线电缆, 2024, 67(06): 46-50.
- [3] 叶慧. 电缆燃烧性能标准要求分析与探究[J]. 智能建筑电气技术, 2024, 18(05): 51-55.
- [4] 杜毅威. 民用建筑阻燃电缆型号标注问题探讨[J]. 建筑电气, 2024, 43(09): 3-8.
- [5] 王腾飞, 颜鲲, 杨国成, 等. 电线电缆的燃烧性能及其不合格原因分析[J]. 现代传输, 2024, (04): 32-36.