

阻燃抗静电输送带材料制备及其安全性能研究

王升旭 谢保华 杜洪波 刘明辉
山东祥通橡塑科技有限公司 山东 济宁 272100

摘要:为解决煤矿、化工等高危场景中输送带火灾、静电积累的安全隐患,本文开展阻燃抗静电输送带材料制备及安全性能研究。通过筛选基体材料、优化阻燃与抗静电体系,设计正交试验确定最优配方,优化混炼、硫化等关键工艺参数并验证稳定性,系统测试材料阻燃、抗静电及力学性能。结果表明,最优配方与工艺制备的材料,极限氧指数 $\geq 32\%$ 、表面电阻率 $\leq 3.0\times 10^8\Omega$,力学性能达标,综合安全性能优良,适配高危场景,为输送带安全应用提供技术支持。

关键词: 阻燃抗静电; 输送带材料制备; 安全性能

引言:输送带是煤矿、化工等行业物料输送的核心设备,其阻燃、抗静电性能直接关系到作业安全。当前传统输送带易因摩擦生热、静电积累引发火灾,且现有材料存在阻燃与抗静电协同性差、力学性能不足等问题,难以满足严苛安全标准。基于此,本文聚焦阻燃抗静电输送带材料的配方设计、工艺优化及安全性能评价,旨在制备综合性能优异的材料,解决实际应用中的安全痛点,推动高危行业输送设备安全升级。

1 阻燃抗静电输送带材料配方设计与原料筛选

1.1 原料选择与性能分析

(1)基体材料筛选:对比丁腈橡胶、氯丁橡胶等常用弹性体基体,重点分析其拉伸强度、断裂伸长率等力学性能及混炼、硫化等加工性能,结合输送带使用场景对材料韧性、耐磨性的要求,排除加工难度大、力学性能不足的基体,确定综合性能最优的基体材料。(2)阻燃剂选择与优化:分析微胶囊化氢氧化铝、DOPO衍生物等常用阻燃剂的阻燃机制,探究不同阻燃剂单独使用及复配后的协同阻燃效果,优先选择阻燃效率高、环保无卤、与基体相容性好的阻燃体系,降低阻燃剂添加量对材料性能的负面影响。(3)抗静电剂选择与适配:筛选导电炭黑、季磷盐等不同类型抗静电剂,测试其表面电阻率控制效果,重点验证抗静电剂与阻燃体系的协同作用,避免两者相互干扰,确保材料同时满足阻燃和抗静电指标要求^[1]。(4)辅助原料选择:选用合适的偶联剂提升阻燃剂、补强剂与基体的相容性,搭配高效硫化剂优化硫化工艺,加入炭黑等补强剂增强材料力学性能,同时添加适量软化剂改善加工流动性,全面提升材料的加工性能与使用性能。

1.2 配方正交试验设计

(1)试验因素与水平确定:以阻燃剂添加量、抗静

电剂添加量为核心影响因素,辅以偶联剂添加量为次要因素,根据前期单因素试验结果,设定3-4个合理水平,确保覆盖最优性能区间。(2)正交试验方案制定:采用合适的正交表设计试验方案,明确试验分组、各变量的控制范围,确定阻燃性能、抗静电性能、力学性能为核心评价指标,规范试验检测方法。(3)试验误差控制:严格规范原料称量、混炼时间、硫化温度等操作流程,采用精准称量仪器,每组试验重复3次,取平均值作为试验结果,减少人为操作和仪器误差对试验数据的影响。

1.3 配方优化与确定

(1)正交试验结果分析,通过极差分析、方差分析确定各因素对性能的影响程度。极差分析明确各因素影响优先级,方差分析验证影响显著性,得出阻燃剂添加量对阻燃性能影响最大,抗静电剂添加量对静电性能起决定性作用。(2)单因素验证试验,针对关键影响因素进行单因素试验,优化最优添加量。以正交试验得出的最优水平为基础,分别改变阻燃剂、抗静电剂添加量,进行单因素试验,确定二者最优添加范围,兼顾各项性能平衡。(3)最优配方确定,综合阻燃、抗静电及力学性能,确定最终原料配比。结合正交试验与单因素试验结果,筛选出极限氧指数 $\geq 32\%$ 、表面电阻率 $\leq 3.0\times 10^8\Omega$ 、拉伸强度 $\geq 15\text{MPa}$ 的最优配方,满足阻燃抗静电输送带使用要求。

2 阻燃抗静电输送带材料制备工艺研究

2.1 制备工艺路线设计

(1)总体工艺流程设计:结合原料特性及输送带成型要求,明确制备工艺的先后顺序,制定完整流程:原料预处理→基体橡胶塑炼→阻燃剂、抗静电剂及辅助原料分段混炼→胶料塑化→压延成型→硫化交联→冷却定型→试样裁切,确保各步骤衔接顺畅,避免原料分散

不均、成型不良等问题，为材料综合性能奠定基础。

(2) 关键工艺环节分析：明确各核心步骤的控制参数及作用，塑炼环节主要破坏橡胶分子链，提升其可塑性，便于后续混炼；混炼环节核心是实现各原料均匀分散，确保阻燃、抗静电及力学性能协同发挥；压延环节用于将胶料加工成符合输送带厚度要求的片材，保证尺寸均匀；硫化环节通过交联反应使橡胶形成稳定网络结构，提升材料力学强度、阻燃性及抗静电持久性^[2]。(3) 工艺设备选型：根据制备规模及性能要求选型，混炼环节选用密闭式炼胶机，具备混炼效率高、原料分散均匀、能耗低的优势，适配多组分原料混炼需求；压延环节选用三辊压延机，可精准控制辊温、辊速，保证片材厚度均匀、表面光滑；硫化环节选用平板硫化机，能精准控制硫化温度、压力和时间，确保硫化充分；同时配备原料预处理设备及试样裁切设备，完善制备流程。

2.2 关键制备工艺参数优化

(1) 混炼工艺优化：以原料分散性、胶料加工性能及成品力学性能为评价指标，研究混炼温度、时间、转速的影响。确定混炼温度控制在80-100℃，温度过低则原料分散不均，过高易导致橡胶提前硫化；混炼时间设定为15-20min，确保各组分充分融合；转速调节至30-40r/min，平衡混炼效率与分散效果，优化后使阻燃剂、抗静电剂在基体中分散均匀，避免局部性能缺陷。(2) 硫化工艺优化：重点探讨硫化温度、压力、时间对材料交联度及综合性能的影响，通过单因素试验确定最优参数。硫化温度控制在140-150℃，温度过高会导致橡胶老化，过低则硫化不充分；硫化压力设定为10-15MPa，保证胶料紧密交联，提升力学强度；硫化时间为20-30min，确保交联反应充分，使材料同时具备优良的阻燃性、抗静电性和拉伸强度，避免出现硫化不足或过硫化现象。(3) 压延工艺优化：聚焦材料厚度均匀性和表面平整度，调整压延温度与辊速比。压延温度控制在90-100℃，与混炼后胶料温度匹配，避免胶料粘辊或成型不良；辊速比调节为1:1.2-1:1.5，确保胶料在辊筒间均匀延展，控制片材厚度误差在±0.1mm以内，表面无气泡、裂纹、划痕等缺陷，满足输送带使用的尺寸要求^[3]。

2.3 制备工艺验证试验

(1) 按照优化后的工艺参数制备试样，严格规范试样制备流程，先对原料进行干燥预处理，去除水分杂质，再按设定参数完成塑炼、混炼、压延、硫化等步骤，冷却定型后，按照相关标准裁切试样，确保试样尺寸精准、边缘整齐，避免尺寸偏差影响后续性能测试。(2) 试样外观及微观结构表征：通过肉眼观察试样表

面，确认无气泡、裂纹、缺料等外观缺陷；借助光学显微镜观察材料微观结构，验证阻燃剂、抗静电剂在基体中的分散均匀性，若微观结构无团聚现象，说明工艺参数合理，可保障材料性能稳定发挥^[4]。(3) 工艺稳定性测试：按照优化后的工艺参数，重复制备5-6组试样，分别测试各组试样的阻燃性能、抗静电性能及力学性能，计算性能指标的变异系数。若变异系数小于5%，说明制备工艺重复性好、稳定性强，可用于规模化生产，确保批量生产的输送带材料性能一致。

3 阻燃抗静电输送带材料安全性能测试与分析

3.1 阻燃性能测试与分析

(1) 测试方法选择：严格依据GB/T3685-2017《输送带实验室规模的燃烧特性试验方法》及行业相关标准，结合输送带实际使用场景中可能出现的火灾隐患，采用酒精喷灯燃烧试验和滚筒摩擦试验两种核心方法。酒精喷灯燃烧试验用于模拟明火引燃场景，测试材料的阻燃极限；滚筒摩擦试验用于模拟输送带运行过程中的摩擦生热引燃风险，全面评估材料在不同引燃条件下的阻燃性能。(2) 阻燃性能指标测试：按照选定的测试方法，精准测定材料的核心阻燃指标，包括续燃时间、无焰燃烧时间、炭化长度及阻燃等级。试验过程中，严格控制燃烧时间、喷灯火焰强度等变量，每组试样重复测试3次，取平均值作为最终结果。要求续燃时间 ≤ 3s、无焰燃烧时间 ≤ 10s、炭化长度 ≤ 250mm，确保材料达到难燃级别，满足输送带安全使用的基础要求。(3) 阻燃机制分析：结合测试结果，深入探讨阻燃剂与基体材料的协同阻燃作用原理。微胶囊化氢氧化铝受热分解释放结晶水，吸收大量热量降低材料表面温度，同时生成氧化铝隔热层阻隔氧气；DOPO衍生物则通过捕获燃烧自由基，抑制链式反应的进行，两者复配后形成“降温-隔氧-抑自由基”的协同效应，有效提升材料的阻燃性能，避免火焰蔓延和有毒烟气产生。

3.2 抗静电性能测试与分析

(1) 测试方法选择：按照GB/T1410-2006《固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法》，采用高阻计测定材料的表面电阻和体积电阻；依据GB/T12703-2021《纺织品静电性能的评定》，测试材料的静电衰减时间，全面反映材料的抗静电能力，确保测试结果符合行业安全标准。(2) 抗静电性能指标测试：重点分析不同环境条件（温度20-40℃、湿度30%-80%）对材料抗静电性能的影响。在低温低湿环境下，材料表面易积累静电，表面电阻和体积电阻升高，静电衰减时间延长；在高温高湿环境下，水分可促进电荷转移，降低电阻值，

提升抗静电效果。通过测试确定材料在不同工况下的抗静电稳定性,要求表面电阻 $\leq 1 \times 10^8 \Omega$,静电衰减时间 $\leq 2s^{[5]}$ 。(3)抗静电机制分析:阐明抗静电剂在材料中的分散状态及电荷转移路径。导电炭黑在基体中形成连续的导电网络,可快速将材料表面积累的静电传导至地面;季磷盐类抗静电剂则通过迁移至材料表面,吸收空气中的水分形成导电水膜,加速电荷消散。两种抗静电剂协同作用,确保材料在长期使用过程中保持稳定的抗静电性能,避免静电积累引发火花,杜绝火灾隐患。

3.3 力学安全性能测试与分析

(1)测试项目确定:结合输送带在煤矿、化工等场景的实际使用需求,确定核心力学安全指标,包括拉伸强度、撕裂强度、耐磨性及耐疲劳性。拉伸强度反映材料抵抗断裂的能力,撕裂强度保障材料在受力不均时不发生破损,耐磨性和耐疲劳性则确保材料适应长期摩擦和反复受力的工作环境,延长使用寿命。(2)力学性能测试:按照GB/T528-2009《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》、GB/T529-2008《硫化橡胶或热塑性橡胶撕裂强度的测定》等标准,采用万能试验机、耐磨试验机进行试验。严格控制试验温度、拉伸速度等参数,准确记录测试数据,计算平均值及变异系数,确保测试结果的准确性和可靠性。(3)力学性能与安全应用的关联性分析:结合测试结果,分析材料力学性能与实际输送场景的适配性。要求拉伸强度 $\geq 15MPa$,撕裂强度 $\geq 30kN/m$,耐磨性能符合行业标准,确保材料在输送重物、长期运行过程中不发生断裂、撕裂等损坏,避免因材料力学性能不足导致输送带失效,保障输送作业的安全稳定。

3.4 综合安全性能评价

(1)建立综合评价体系:结合阻燃、抗静电、力学三大核心性能,采用层次分析法设定评价指标权重,其中阻燃性能权重0.4、抗静电性能权重0.3、力学性能权重0.3,明确各指标的评价标准,形成科学、全面的综合评

价体系,避免单一性能评价的局限性。(2)综合评价结果分析:将本研究材料的各项性能测试结果与现有同类输送带材料进行对比,分析其优势与不足。本研究材料在阻燃性和抗静电稳定性上优于同类产品,力学性能达到行业先进水平,但在低温环境下的抗静电持久性仍有提升空间,为后续优化指明方向。(3)应用可行性分析:结合煤矿、化工等易燃易爆、静电敏感的实际应用场景,判断材料的应用前景。该材料各项安全性能均满足行业标准,能有效杜绝火灾、静电等安全隐患,且加工工艺成熟、成本可控,适配规模化生产,可广泛应用于各类高危环境下的输送作业,具有良好的应用价值和推广前景。

结束语

本文完成了阻燃抗静电输送带材料的配方、制备工艺及安全性能的系统研究,通过正交试验与单因素试验确定最优方案,工艺稳定性良好,材料各项安全性能均满足行业标准,优于同类产品,可广泛应用于高危输送场景。本研究仍存在低温环境抗静电持久性不足的局限,后续将重点优化抗静电体系,提升材料极端工况适应性,进一步完善制备工艺,为输送带安全材料的研发与推广提供参考。

参考文献

- [1]胡晋瑞.煤矿用阻燃输送带阻燃性研究[J].中国化工贸易,2022,10(29):188-190.
- [2]孙少阳.PVC、PVG高强度整芯阻燃输送带及其带芯设计[J].中国化工贸易,2023,12(14):200-202.
- [3]杨兴明.关于煤矿用PVC阻燃输送带的抗静电性能探讨[J].当代化工研究,2021,9(3):77-78.
- [4]王倩.煤矿用阻燃输送带的检测检验研究[J].工程建设与设计,2022,22(16):77-79.
- [5]王玉龙.煤矿用阻燃输送带阻燃性研究[J].当代化工研究,2021,11(4):112-113.