

电磁屏蔽用聚氯乙烯(PVC)线管的制备工艺与性能研究

王百提^{1,2} 张长伟² 潘海勇²

1 中财招商投资集团有限公司,浙江杭州,310051;

2 浙江中财管道科技股份有限公司,浙江绍兴,312500;

摘要:本文针对自主开发的共挤PVC屏蔽线管,系统研究了导电炭黑含量、挤出工艺参数及结构设计对产品性能的影响规律。研究表明:当内层屏蔽材料中导电炭黑含量达到15%~18%时,材料形成连续导电网络,体积电阻率降至 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 级别,电磁屏蔽效能突破40 dB;挤出温度(170~190 °C)和挤出速度(螺杆转速15~20 r/min)的协同控制可实现内层表面粗糙度低于1.5 μm;内壁平整度每降低0.5 μm(Ra值),屏蔽效能提升约3~5 dB;屏蔽层厚度在0.3~0.5 mm范围时,厚度增加与屏蔽效能提升呈非线性正相关,超过0.6 mm后出现性能拐点。本研究为高性能电磁屏蔽线管的工业化生产提供了理论依据和技术支持。

关键词:PVC屏蔽线管;屏蔽效能;导电炭黑;挤出工艺;挤出温度;体积电阻率;表面粗糙度

DOI:10.69979/3029-2727.25.06.065

引言

随着电子设备电磁兼容性要求日益严格,屏蔽线管作为关键防护元件,其性能优化成为研究热点。传统金属屏蔽管存在重量大、成本高、易腐蚀等问题,而以聚氯乙烯(PVC)为基体的导电复合材料凭借轻量化、耐腐蚀、易加工等优势逐步成为主流选择。然而,现有研究在共挤成型工艺参数对屏蔽层微观结构及最终屏蔽效能的影响机制方面仍存在研究空白。

本研究基于自主开发的共挤PVC屏蔽线管(内层为PVC/导电炭黑复合材料,外层为普通PVC),重点探究五大核心问题:(1)炭黑含量与导电网络形成的构效关系;(2)挤出温度梯度对内层表面形貌的影响规律;(3)挤出速度引发的剪切效应与界面缺陷的关联机制;(4)内壁拓扑结构对电磁波反射/吸收路径的作用机理;(5)屏蔽层厚度在电磁衰减中的贡献度量化。通过建立“工艺-结构-性能”多维关系模型,为高性能屏蔽线管的工业化生产提供理论支撑。

1 实验部分

1.1 材料与制备

材料:选用悬浮法PVC树脂(SG-5型,新疆中泰),其平均聚合度为 1050 ± 50 ,符合GB/T 5761-2018标准要求。

功能填料:导电炭黑(特导电级),比表面积 $>100 \text{ m}^2/\text{g}$,DOP吸收值 $\geq 350 \text{ mL}/100\text{g}$ 。

配方体系:内层屏蔽材料组成为PVC 100份、导电炭黑15~30份、CPE(含氯量35%)12份、钙锌稳定剂4

份、PE蜡0.8份;外层PVC组成为PVC 100份、碳酸钙15份、ACR加工助剂2份、钛白粉1.5份。

制备工艺:采用异向锥形双螺杆共挤系统,螺杆尺寸为65/132,内层屏蔽料与外层PVC分别通过独立流道在模头内复合。

1.2 测试与表征

导电性能:按GB/T 15662-1995标准,使用四探针电阻仪(RTS-9,广州四探针)测量体积电阻率。

屏蔽效能:依据GJB 8820-2015标准,在1MHz~3GHz频段采用便携式频谱分析仪(MS2720T)测试屏蔽效能。

表面形貌:通过激光共聚焦显微镜(Olympus OLS5000)获取三维表面轮廓,计算表面粗糙度Ra值。

微观结构:采用场发射扫描电镜(Hitachi SU8010)观察炭黑分散状态及断面形貌。

流变性能:使用转矩流变仪(哈普电器200A)测试熔体与剪切速率关系。

2 结果与讨论

2.1 炭黑含量对屏蔽效果的影响机制

导电炭黑含量与PVC复合材料屏蔽性能存在典型渗流阈值效应。当炭黑含量低于10%时,材料体积电阻率维持在 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上,仅具备微弱抗静电能力;当含量增至15~18%临界区间时,电阻率发生断崖式下降(10^2 ~ $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$),此时炭黑粒子形成三维导电网络,电磁屏蔽效能跃升至35~42 dB,满足工业级屏蔽要求(40 dB)^[1,4]。

表 1: 炭黑含量对 PVC 复合材料性能的影响

炭黑含量(%)	体积电阻率(Ω·cm)	屏蔽效能(1GHz,dB)	拉伸强度(MPa)	断裂伸长率(%)
10	3.2×10^8	18.5	38.2	120
15	6.5×10^2	41.3	35.7	85
20	9.8×10^1	52.7	32.1	45
25	2.4×10^1	59.2	28.5	28
30	8.7×10^0	63.5	25.3	15

深层机理分析表明,当炭黑含量达 15%时,粒子间距缩小至 10 nm 以内,电子可通过量子隧穿效应跨越势垒;含量增至 20%时,形成双重导电机制(接触导电+隧穿导电),此时屏蔽效能提升主要来自电磁波反射损耗增强;当含量超过 25%,材料内部因炭黑团聚产生局部涡流效应,显著提升电磁波吸收能力(吸收损耗占比超 40%)。但需注意,过高炭黑含量(>30%)会导致熔体粘度上升 76%,冲击强度下降 60%,严重影响加工性能及产品韧性^[2]。

2.2 挤出温度对内层平整度的影响规律

表 2: 挤出温度对制品质量的影响及解决方案

温度区间	塑化状态	典型缺陷	表面粗糙度 Ra(μm)	改进措施
<160°C	塑化不足	熔体破裂, 鲨鱼皮现象	>3.5	提高加热段温度, 增加混炼时间
170-190°C	完全塑化	表面光洁如镜	0.8-1.2	保持温度波动 $\pm 2^{\circ}\text{C}$
>195°C	热分解开始	气泡、黄线	>2.5	加强热稳定剂, 优化模头流道

深层机理在于温度通过三重路径影响表面质量:(1)温度升高降低熔体粘度(190°C 时粘度比 170°C 低 42%),促进物料流动铺展;(2)适当温度提升炭黑与 PVC 的界面相容性,SEM 显示 190°C 样品中炭黑分散均匀性指数比 170°C 提高 35%;(3)温度梯度影响熔体弹性,温度不足时熔体储能模量(G')过高,引发出口胀大效应,导致表面波纹。

2.3 挤出速度与内层平整度的相互作用

PVC 作为热敏性聚合物,其加工温度窗口狭窄(160-200°C),而炭黑的加入进一步复杂化了温度控制逻辑。研究表明,挤出温度梯度与内层表面粗糙度呈现非线性关系:当机筒温度低于 160°C 时,物料塑化不充分,熔体破裂导致表面粗糙度 Ra>3.5 μm;温度升至 170-190°C 理想区间时,PVC 分子链充分松弛,炭黑分散均匀,表面 Ra 值降至 0.8-1.2 μm;但当温度超过 195°C,PVC 开始发生热分解反应,释放的 HCl 气体形成表面气泡(直径 50-200 μm),使 Ra 值反弹至 2.5 μm 以上^[1]。

挤出速度通过剪切应力场和物料停留时间双重路径影响内层表面形貌。在双螺杆共挤系统中,螺杆转速从 10 r/min 增至 25 r/min 时,表面粗糙度呈现先降后升的抛物线变化:低速区(10-15 r/min)因剪切热不足导致炭黑分散不均,Ra 值为 2.1-2.8 μm;中速区(15-20 r/min)达到最佳平衡点,熔体剪切粘度适宜,Ra 值稳定在 1.0-1.3 μm;高速区(>20 r/min)则因剪切过热(温升达 12-15°C)及熔体弹性湍流引发表面“竹节”现象,Ra 值升至 3.2 μm 以上^[3]。

表 3: 双螺杆挤出工艺参数优化方案

工艺参数	低缺陷区	风险区	优化建议
螺杆转速(r/min)	15-20	<12 或 >22	采用 18 r/min 恒速控制
牵引速度比	1.02-1.08	<1.0 或 >1.15	设定为挤出速度的 1.05 倍
螺杆冷却(°C)	60-70	<50 或 >80	闭环控温系统 $\pm 1^{\circ}\text{C}$

工艺参数	低缺陷区	风险区	优化建议
机头压力(MPa)	12-15	>18	增加过滤网目数

牵引速度的匹配同样关键：当牵引速度/挤出速度比值 (V_p/V_e) 维持在 1.02–1.08 时，管材轴向应力分布均匀；若 $V_p/V_e < 1.0$ ，导致管壁堆积增厚（局部增厚达 15%）；而 $V_p/V_e > 1.10$ 则引发过度拉伸，使屏蔽层厚度波动超 $\pm 7\%$ ，破坏导电网络连续性。真空定径环节需控制真空度在 0.05 ± 0.01 MPa，过高真空度导致管坯过度压缩，内层炭黑向表面迁移形成导电“须状物”。

2.4 内壁平整度对屏蔽效果的影响机制

内壁表面形貌通过电磁波反射路径和电流传导效率双重机制影响屏蔽效能。激光轮廓仪数据显示，当表面粗糙度 R_a 从 $0.5 \mu\text{m}$ 增至 $3.0 \mu\text{m}$ 时，在 1 GHz 频率下屏蔽效能衰减达 12.7 dB，尤其对 >800 MHz 高频段影响显著。

微观机理包含：(1) 粗糙峰-谷结构形成电磁波散射源，增加电磁波在腔体内的反射路径长度，当 $R_a > 2 \mu\text{m}$ 时，多重反射损耗占比超总屏蔽效能的 35%；(2) 表面凸起导致局部电流密度集中（有限元分析显示凸起处电流密度是平坦区的 6.8 倍），加速焦耳热效应，降低整体导电性；(3) 凹槽区域形成导电网络断裂带，阻断电子连续传输路径。实验表明， R_a 值每降低 $0.5 \mu\text{m}$ ，表面阻抗均匀性提升 18%，屏蔽效能波动范围缩小至 ± 1.5 dB。

2.5 内层厚度对屏蔽效能的优化策略

屏蔽层厚度 (δ) 与屏蔽效能 (SE) 遵循 $\delta = K \cdot 1/n(\text{SE})$ 的对数增长规律。在 0.1 – 0.3 mm 薄层区间，厚度增加显著提升屏蔽效能（ δ 每增 0.1 mm，SE 提高 15–18 dB）；当厚度达 0.5 mm 时，SE 趋近饱和值 (62 dB)；厚度超过 0.6 mm 后，因趋肤效应 (1 GHz 下趋肤深度仅 0.2 mm) 导致边际效益锐减， δ 增加 0.1 mm 仅提升 SE 约 2 dB^[5]。

值得注意的是，厚度设计需兼顾电磁性能与力学性能：当厚度 > 0.5 mm 时，复合材料脆性增大，三点弯曲试验显示断裂挠度下降 40%；而在 0.3 mm 以下时，管材抗压强度不足 (< 350 N/cm)。通过有限元电磁仿真建议：对民用 30–40 dB 要求场景，采用 0.3 mm 厚度；工

业级 60 dB 要求场景，采用 0.5 mm 厚度并配合 22% 炭黑含量的优化方案。

3 结论

(1) 导电网络构建：炭黑含量在 15–18% 区间实现渗流阈值突破，体积电阻率降至 $10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ 级，电磁屏蔽效能达 40 dB 以上；当含量增至 25%，吸收损耗占比提升至 40%，但需平衡力学性能下降风险。

(2) 表面质量控制：170–190 °C 挤出温度与 15–20 r/min 螺杆转速的工艺组合，可实现内层 $R_a < 1.5 \mu\text{m}$ 的高品质表面；温度波动需控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，牵引速度比 (V_p/V_e) 保持在 1.02–1.08 区间。

(3) 平整度–效能关联：表面粗糙度 R_a 值每降低 $0.5 \mu\text{m}$ ，屏蔽效能提升 3–5 dB，尤其对 >800 MHz 高频段改善显著； $R_a > 2 \mu\text{m}$ 时多重反射损耗占比超 35%，导致屏蔽均匀性劣化。

(4) 厚度优化设计：屏蔽层厚度 0.4 – 0.5 mm 为性价比拐点，可兼顾 60 dB 级屏蔽效能与良好力学性能；超过 0.6 mm 厚度时趋肤效应导致边际效益锐减，原材料成本上升 42% 而效能仅提升 5–8 dB。

本研究成果已应用于建筑智能布线系统，通过共挤工艺优化实现了产品合格率提升至 98.5%。未来研究方向包括纳米炭黑表面改性提升分散性，以及多层梯度屏蔽结构设计拓展适用频段。

参考文献

- [1] 吕海金. 炭黑改性高分子聚合物中的导电性研究 [J]. 塑料工业, 2005(5): 66–67.
- [2] 胡正勇, 徐鹏, 牛芝雅. 聚氯乙烯/炭黑电力屏蔽材料的制备及性能分析 [J]. 塑料科技, 2021(6): 28–31.
- [3] 宁英沛, 辛振祥等. PVC/华光特导电炭黑 (HG-CB) 复合材料的性能 [J]. 聚氯乙烯, 1995(1): 3–8.
- [4] 宁英沛. PVC 炭黑复合材料的导电特性 [J]. 聚氯乙烯, 1993(6): 29–39.
- [5] 牛翔宇, 凌新龙. 电磁屏蔽材料的研究进展 [J]. 纺织科学与工程学报, 2023(2): 109–118.