



汪洪星. 基于多元回归分析的电缆烟密度结构尺寸影响因素及预测模型[J]. 电线电缆, 2025, 68(5): 21-28.

WANG H X. Structural size influencing factors and predictive model of cable smoke density based on multiple regression analysis[J]. Wire & Cable, 2025, 68(5): 21-28.

DOI: 10.16105/j.dxdl.1672-6901.20258005

# 基于多元回归分析的电缆烟密度结构尺寸影响因素及预测模型

汪洪星

(耐克森(苏州)线缆系统有限公司, 苏州 215124)

**摘要:** 为定量解析电缆结构尺寸对烟密度的影响机制并构建预测模型, 文中基于多元回归分析方法, 以 20 mm 为临界尺寸划分数据集, 系统探究导体质量、硅橡胶质量及外径等参数的耦合作用规律。通过历史试验数据构建回归方程, 结合 F 检验 ( $p < 0.05$ ) 与方差膨胀因子 ( $VIF < 5$ ) 筛选关键变量, 结果表明: 对于外径  $\geq 20$  mm 的电缆, 烟密度与导体质量呈正相关 ( $\beta = 0.011$ ), 与硅橡胶质量呈负相关 ( $\beta = -0.045$ ); 对于外径  $< 20$  mm 的电缆, 外径与硅橡胶质量的交互作用显著 ( $\beta = -0.37$ ), 外径每增加 1 mm 需减少硅橡胶用量 5% 以抑制烟密度激增。模型验证显示, 预测误差  $\leq 2%$  ( $R^2 > 0.97$ ) 可为电缆材料选型与结构优化提供定量设计工具。该研究突破了传统定性分析的局限性, 可为智能算法驱动的电缆防火性能精准设计奠定基础。

**关键词:** 电缆烟密度; 结构参数; 多元回归; 交互作用; 防火设计

**中图分类号:** TM247

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-6901(2025)05-0021-08

## 0 引言

随着城市化进程的发展与新型基础设施建设的推进, 电线电缆作为能源传输和信息交互的核心载体, 其防火安全性能日益受到关注。特别是在轨道交通、高层建筑及地下管廊等场景中, 电缆燃烧时释放的烟雾不仅威胁人员逃生安全, 还会加剧设备腐蚀与环境污染。国际电工委员会在 IEC 61034-2: 2019 中明确要求对电缆烟密度进行量化评估, 推动了低烟无卤材料的广泛应用。然而, 当前研究多聚焦于材料配方优化(如阻燃剂种类与含量)对烟密度的改善作用, 而电缆结构尺寸的定量影响机制尚未系统揭示, 这已成为制约防火性能精准设计与新材料高效应用的关键瓶颈。

现有研究表明, 电缆烟密度受多因素耦合影响。例如, 蔡炜等<sup>[1]</sup>通过锥形量热仪试验发现, 热辐射强度与烟密度呈非线性关系; 王彩生等<sup>[2]</sup>提出, 通过改变燃烧物质量可间接影响透光率。宋静静等<sup>[3]</sup>研究认为, 影响成品阻燃光缆烟密度的因素主要来源于材料与产品内部的结构, 即光缆结构中发烟塑料的占比。国外的研究<sup>[4-6]</sup>则发现, 电缆外径、可燃物占比、热释放速率、材

料的氧指数等因素与烟密度存在强关联。然而, 上述成果多为定性分析或局限于单一变量, 缺乏对结构参数(如外径、导体质量、可燃物质量)的系统建模。此外, 现有模型未考虑尺寸差异(如 20 mm 为界)导致的燃烧行为差异, 难以指导工程实践中的参数优化。

针对上述问题, 本研究基于多元回归分析方法, 构建电缆结构尺寸与烟密度的定量预测模型。①分尺寸建模: 基于 IEC 测试标准, 以 20 mm 为界划分数据集, 分别建立大、小尺寸电缆的回归方程, 揭示尺寸差异对影响机制的调控作用。②引入交互作用: 针对小尺寸电缆, 提出外径与硅橡胶质量的交互项, 显著提升模型预测精度。③分析工程普适性: 通过残差分析与交叉验证, 证实模型在  $\pm 2%$  误差范围内的稳健性, 为企业提供可落地的材料选型与结构设计指南。

本研究旨在量化电缆的结构参数对烟密度的贡献度、引入交互作用对小尺寸电缆烟雾释放行为的影响, 实现模型驱动材料与结构协同优化; 另外, 还可为智能算法(如机器学习)提供特征工程基础, 推动防火电缆从“经验设计”向“数据驱动”转型。

## 1 烟雾产生和烟密度测量

### 1.1 烟雾产生机理及影响因素

烟雾产生机理<sup>[7]</sup>涉及电缆燃烧过程中材料内部或表面的化学反应(热解和裂解),导致大量热量和气体(如烟雾、热气和有毒气体)的释放。烟雾是由固体颗粒、液滴和气体组成的复杂混合物,其产生机理与电缆的材料、结构、热解温度、氧气含量等因素密切相关。这些因素的变化均可能会对烟雾产生机理产生影响,从而影响烟雾的生成和特性。

采用固定电缆材料、生产工艺、测试方法对结构尺寸进行分析,研究电缆结构尺寸对烟密度的影响。经初步分析,电缆结构尺寸可能会有统计学意义上显著影响的可能,包含如下变量:电缆外径、导体质量、可燃物质量(包含绝缘或护套材料,本研究中两者的材料均为硅橡胶)、屏蔽的质量、其他质量(主要为包带)。

### 1.2 烟密度测量原理

烟密度测量采用消光法,即测定燃烧产物悬浮体系的光学透光率,以表示电缆燃烧时的烟密度<sup>[8]</sup>。在光透过烟层时,光强度的变化服从拉姆伯特(Lambert)定律,即

$$I = I_0 \exp(-cL) \quad (1)$$

式中:  $I$  为透过烟层后的光强度, cd;  $I_0$  为入射光强度, cd;  $L$  为光通过的距离, m;  $c$  为消光系数,  $\text{m}^{-1}$ 。

## 2 多元回归分析方法

### 2.1 数学模型

多元回归分析<sup>[9-11]</sup>是一种利用多个自变量(或解释变量)来预测因变量(或响应变量)的统计分析方法,旨在通过多个自变量(结构参数)预测因变量(烟密度),其数学模型可表示为

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2)$$

式中:  $Y$  为烟密度, %;  $X_i$  为结构参数, 如外径、导体质量等;  $\beta_0$  为截距项;  $\beta_i$  为回归系数;  $\varepsilon$  为随机误差项;  $k$  为自变量个数。

回归系数通过最小二乘法<sup>[12]</sup>估计,目标是使最小化观测值与预测值的残差平方和,即

$$\min \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \min \sum_{i=1}^n (Y_i - (\beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \cdots + \beta_k X_{ik}))^2 \quad (3)$$

其解由正规方程给出,即

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

式中:  $n$  为样本容量;  $X$  为  $n \times (k+1)$  设计矩阵(含

截距项);  $Y_i$  为第  $i$  次试验中电缆烟密度的实测值;  $\hat{Y}_i$  为第  $i$  次试验中电缆烟密度的预测值;  $\hat{\beta}$  为回归系数估计向量;  $Y$  为  $n \times 1$  观测值向量。

多元回归模型的显著性可以通过统计检验来确认,其中最常用的检验是联合假设检验(F检验)。F检验可用于检验模型是否显著。基于模型的解释力和拟合程度计算  $F_{\text{比}}$ ,然后将其与F分布临界值进行比较。若  $F_{\text{比}} > F_{\alpha}(k, n-k-1)$ ,就可以拒绝零假设,则模型显著( $\alpha$  为显著性水平)。其中,模型整体显著性(F检验)公式为

$$F_{\text{比}} = \frac{SS_{\text{因子}}/DF_{\text{因子}}}{SS_{\text{误差}}/DF_{\text{误差}}} \quad (5)$$

式中:  $SS_{\text{因子}}$  为因子平方和;  $DF_{\text{因子}}$  为因子自由度;  $SS_{\text{误差}}$  为误差平方和;  $DF_{\text{误差}}$  为误差自由度。

模型拟合优度与自变量的重要性需要通过多维度指标综合评估。

① 决定系数( $R^2$ )。表征模型解释因变量方差的比例,其值域为  $[0, 1]$ ,越趋近于1,表明模型对数据变异的捕捉能力越强,见公式(6)。

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{误差}}}{SS_{\text{总}}} \quad (6)$$

式中:  $SS_{\text{总}}$  为总平方和。

② 调整决定系数( $R^2_{\text{调整}}$ )。引入自变量数量惩罚项,修正因变量增加导致的模型复杂度对解释力的虚高影响,避免过拟合,见公式(7)。

$$R^2_{\text{调整}} = 1 - \left[ \frac{(1-R^2)(n-1)}{n-k-1} \right] \quad (7)$$

③ 均方根误差(RMSE)。量化预测值与实际值的平均偏差, RMSE 越小表明模型精度越高,见公式(8)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{SS_{\text{误差}}}{n-k-1}} \quad (8)$$

采用上述指标解析电缆结构参数(如外径、导体质量)与烟密度的定量关系。通过  $R^2$  与  $R^2_{\text{调整}}$  的协同分析,证实模型对数据变异的解释具有高效性;同时, RMSE 进一步验证了预测公式的工程适用性。这一多指标评估框架为电缆防火性能的精准设计与材料优化提供了理论依据与实证支撑。

试验数据的检定通常采用方差分析法(ANOVA)<sup>[13]</sup>,以筛选统计学意义上显著影响的变量。ANOVA分析旨在通过数学模型分析因变量和变量之间的统计学关系,计算由变量不同水平引起的均方与随机误差的均方的比值,利用F检验确定变量的显著性。

如果  $SS_{\text{因子}}/DF_{\text{因子}}$  与  $SS_{\text{误差}}/DF_{\text{误差}}$  之间的差异

很小(即比率很小), 则表明变量或变量交互作用水平的变化, 对指标的影响接近于随机误差的影响; 反之, 变量水平的改变对性能指标有显著影响, 该变量为统计学意义上的显著变量。采用 F 分布表量化变量是否显著, 通过查询 F 分布表可得各种自由度下  $F_{比}$  的临界值, 判断依据见表 1。其中,  $n_1$ 、 $n_2$  分别为变量和误差的自由度。

表 1 变量显著性判定准则

Tab.1 Criteria for variable significance determination

序号	条件	结论
1	$F_{比} > F_{0.01}(n_1, n_2)$	有高度统计学意义上显著影响
2	$F_{0.01}(n_1, n_2) > F_{比} > F_{0.05}(n_1, n_2)$	有统计学意义上显著影响
3	$F_{0.05}(n_1, n_2) > F_{比} > F_{0.1}(n_1, n_2)$	有统计学意义上一定影响
4	$F_{比} < F_{0.1}(n_1, n_2)$	无统计学意义上显著影响

在判断  $F_{比}$  时, 置信度指试验者对所述结论正确性的判断大概有  $1-\alpha$  的把握。置信度通常取 0.1, 0.05, 0.01, 对应不同的 F 分布表。

## 2.2 数据处理的计算机辅助

使用计算机进行辅助计算可以极大地提高

回归分析的效率和精度。常用的回归分析软件包括 Excel<sup>[14]</sup> 和 Minitab<sup>[15]</sup> 等。Excel 作为一款广泛使用的电子表格软件, 其回归分析功能简单易用, 适合初学者和简单的数据分析。Minitab 可以进行更复杂的回归分析, 包括非线性回归、多元回归、逐步回归等。Minitab 具有丰富的统计图表和分析工具, 可以帮助深入挖掘数据, 并进行回归模型的诊断和选择。

## 3 数据处理与分析

IEC 61034-2: 2019 中, 不同尺寸电缆的烟密度测试方法不同。结合实际应用案例中的测试差异, 本文以标准规定的电缆外径 20 mm 为界, 将样品分为大尺寸电缆( $\geq 20$  mm)和小尺寸电缆( $< 20$  mm), 分段获取较为精确的回归方程。

样品的结构参数通过实际测量和理论计算两种方式获取。其中, 实际测量参数为电缆外径。其余结构参数, 如导体质量、硅橡胶质量, 因实际测量与理论计算差异较小, 为方便后期应用, 采用理论计算方式。小尺寸电缆和大尺寸电缆样品的结构参数与烟密度测试结果分别见表 2 和表 3。

表 2 大尺寸电缆结构参数与烟密度测试结果

Tab.2 Structural parameters and smoke density data of large-diameter cables

样品编号	电缆外径/mm	导体质量/(kg·km <sup>-1</sup> )	屏蔽质量/(kg·km <sup>-1</sup> )	硅橡胶质量/(kg·km <sup>-1</sup> )	其他质量/(kg·km <sup>-1</sup> )	烟密度/%
1-1 <sup>#</sup>	26.6	427.6	173.7	502.0	28.4	45.0
1-2 <sup>#</sup>	24.5	978.0	112.5	345.0	6.7	59.0
1-3 <sup>#</sup>	29.4	1 722.7	78.3	448.0	35.1	61.5
1-4 <sup>#</sup>	24.6	1 957.0	0	195.0	4.7	76.0
1-5 <sup>#</sup>	23.6	877.0	60.5	295.0	41.8	58.0

表 3 小尺寸电缆结构参数与烟密度数据

Tab.3 Structural parameters and smoke density data of small-diameter cables

样品编号	电缆外径/mm	导体质量/(kg·km <sup>-1</sup> )	硅橡胶质量/(kg·km <sup>-1</sup> )	其他质量/(kg·km <sup>-1</sup> )	烟密度/%
2-1 <sup>#</sup>	10.5	87.9	90.1	2.6	54.4
2-2 <sup>#</sup>	8.0	20.5	60.7	0	63.0
2-3 <sup>#</sup>	7.7	32.7	52.8	0.5	58.0
2-4 <sup>#</sup>	10.2	84.4	86.4	1.0	58.1
2-5 <sup>#</sup>	9.1	84.4	67.1	1.0	65.0
2-6 <sup>#</sup>	6.8	20.5	45.6	0	46.8

## 3.1 变量与因变量的相关系数分析

根据大尺寸电缆和小尺寸电缆的结构参数与烟密度测试结果, 采用 Pearson 相关系数评估变量与因变量的相关性。大尺寸电缆和小尺寸

电缆变量间相关系数矩阵分别见表 4 和表 5, 其散点矩阵与密度椭圆<sup>[16]</sup> 分别见图 1 和图 2。

对于大尺寸电缆(图 1), 导体质量、硅橡胶质量、金属屏蔽质量的密度椭圆呈扁态, 而剩余

表 4 大尺寸电缆变量间相关系数矩阵

Tab.4 Correlation coefficient matrix of variables for large-diameter cables

测试项	烟密度	电缆外径	导体质量	金属屏蔽质量	硅橡胶质量	其他质量
烟密度	1.0000					
外径	-0.1739	1.0000				
导体质量	0.8864	0.2776	1.0000			
金属屏蔽质量	-0.8068	0.1121	-0.7830	1.0000		
硅橡胶质量	-0.8279	0.6805	-0.5104	0.7257	1.0000	
其他质量	-0.4299	0.4004	-0.2450	0.0518	0.4906	1.0000

表 5 小尺寸电缆变量间相关系数矩阵

Tab.5 Correlation coefficient matrix of variables for small-diameter cables

测试项	烟密度	电缆外径	导体质量	金属屏蔽质量	其他质量
烟密度	1.0000				
导体质量	0.1892	1.0000			
外径	0.1863	0.9288	1.0000		
硅橡胶质量	0.1102	0.8811	0.9906	1.0000	
其他质量	-0.1065	0.8282	0.8749	0.8687	1.0000

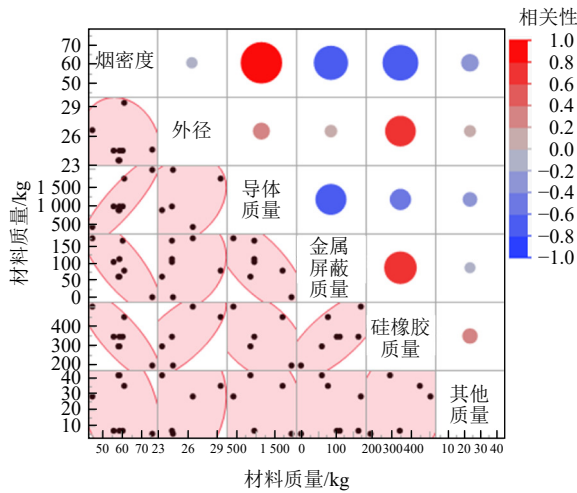


图 1 大尺寸电缆变量间相关性散点矩阵与密度椭圆  
Fig.1 Scatter matrix and density ellipses for correlation analysis of large-diameter cables

两个变量呈圆态,则可以初步判定,烟密度与导体质量、硅橡胶质量、金属屏蔽质量存在较明显的相关性,而与外径、其他质量并无明显的相关。通过变量图形偏转斜率可以判断,烟密度与导体质量呈正相关,与金属屏蔽及硅橡胶的质量呈负相关。需要注意的是,变量中金属屏蔽质量与其余变量的相关系数绝对值均较大,即金属屏蔽质量与其他变量具有强相关性。这是因为,金属屏蔽质量与电缆的结构尺寸存在强关联。为了尽可能准确地反映变量与因变量的关系,构

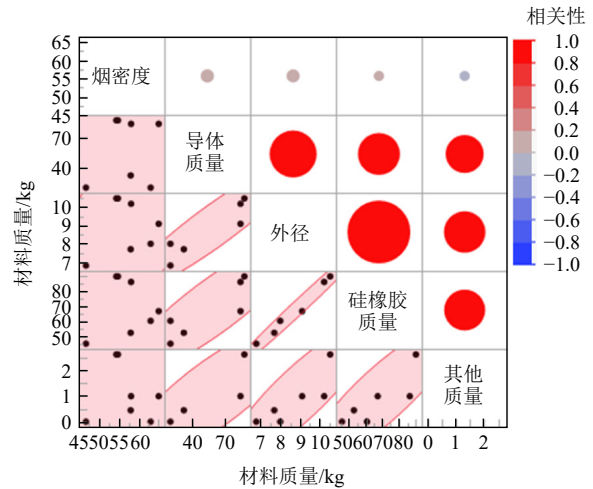


图 2 小尺寸电缆变量间相关性散点矩阵与密度椭圆  
Fig.2 Scatter matrix and density ellipses for correlation analysis of small-diameter cables

建回归方程时需要注意规避变量的内部关联。

对于小尺寸电缆(图 2),外径与硅橡胶质量存在强交互,将两者的交互作用作为一个变量纳入回归方程中进行显著性检定。在回归方程进行拟合时,可通过“前进法”<sup>[17]</sup>等进行变量筛选,筛选出烟密度与电缆外径、硅橡胶质量,以及两者的交互作用的显著影响,采用这 3 个变量进行回归分析方程拟合。

### 3.2 多元回归的模型拟合及解释

根据大尺寸电缆和小尺寸电缆的结构参数

与烟密度测试结果,采用 Excel 分析计算大尺寸电缆和小尺寸电缆的回归模型拟合优度,结果见表 6 和表 7。由表 6 和表 7 可知,  $R^2$  和  $R^2_{\text{调整}}$  均接近于 1,且两者差距较小,均方根误差仅为 1.24,表明回归模型的拟合优度较高。

表 6 大尺寸电缆回归模型拟合优度

Tab.6 Goodness-of-fit metrics of large-diameter cable regression model

$R^2$	$R^2_{\text{调整}}$	均方根误差	因变量均值	观测数 (或权重和)
0.988	0.979	1.24	59.46	8

表 7 小尺寸电缆回归模型拟合优度

Tab.7 Goodness-of-fit metrics of small-diameter cable regression model

$R^2$	$R^2_{\text{调整}}$	均方根误差	因变量均值	观测数 (或权重和)
0.999	0.997	0.355	57.16	7

为进一步验证模型的稳健性,对模型进行残差分析。大尺寸电缆和小尺寸电缆的方差分析结果见表 8 和表 9。由表 8 和表 9 可知,残差分布均匀,未发现明显的异方差性;方差分析中  $p$  分别为 0.0003 和 0.0001,均小于 0.05,表明应拒绝原假设,即可判定模型有效。

表 8 大尺寸电缆回归模型方差分析

Tab.8 ANOVA results of large-diameter cable regression model

方差源	自由度	平方和	均方	$F_{\text{比}}$	$p$
模型	3	495.56	165.19	107.966	0.0003*
误差	4	6.12	1.53		
校正总和	7	501.68			

注: \*为在 0.05 水平上显著相关。

表 9 小尺寸电缆回归模型方差分析

Tab.9 ANOVA results of small-diameter cable regression model

方差源	自由度	平方和	均方	$F_{\text{比}}$	$p$
模型	3	217.30	72.43	573.84	0.0001*
误差	3	0.38	0.13		
校正总和	6	217.68			

注: \*为在 0.05 水平上显著相关。

### 3.3 模型优化及确认

大尺寸电缆和小尺寸电缆回归系数显著性见表 10 和表 11。由表 10 可知,除金属屏蔽质量以外,其余变量的  $p$  均小于 0.05。因此,金属屏

蔽质量对于烟密度为非显著影响变量,为了保证模型的准确,将其剔除后再进行优化后的模型拟合。由表 11 可知,所有项的  $p$  均小于 0.05。因此,小尺寸电缆的模型无需进一步优化。

表 10 大尺寸电缆回归系数显著性

Tab.10 Regression coefficients and significance of large-diameter cables

项	系数估计值	标准误差	$t_{\text{比}}$	$p$
截距	61.43	2.76	22.25	<0.0001*
导体质量	0.0129	0.0013	9.57	0.0007*
硅橡胶质量	-0.0552	0.0074	-7.44	0.0017*
金属屏蔽质量	0.0316	0.0150	1.68	0.1077

注: \*为在 0.05 水平上显著相关。

表 11 小尺寸电缆回归系数显著性

Tab.11 Regression coefficients and significance of small-diameter cables

项	系数估计值	标准误差	$t_{\text{比}}$	$p$
截距	-156.76	5.201	-30.14	<0.0001*
外径	23.65	0.738	32.04	<0.0001*
外径×硅橡胶质量	-0.37	0.011	-33.92	<0.0001*
硅橡胶质量	3.43	0.151	22.77	0.0002*

注: \*为在 0.05 水平上显著相关。

对于大尺寸电缆,从因变量中剔除金属屏蔽质量,获得优化后模型的拟合优度,以及模型的方差分析,见表 12 和表 13。由表 12 和表 13 可知,优化后的模型更准确。

表 12 优化后大尺寸电缆回归模型拟合优度

Tab.12 Goodness-of-fit metrics of large-diameter cable optimized regression model

$R^2$	$R^2_{\text{调整}}$	均方根误差	因变量均值	观测数 (或权重和)
0.9748	0.9647	1.59	59.46	8

表 13 优化后大尺寸电缆回归模型方差分析

Tab.13 ANOVA results of large-diameter cable optimized regression model

方差源	自由度	平方和	均方	$F_{\text{比}}$	$p$
模型	2	489.0	244.51	96.63	0.0001*
误差	5	12.7	2.53		
校正总和	8	501.7			

注: \*为在 0.05 水平上显著相关。

大尺寸电缆和小尺寸电缆的烟密度实际值与预测值对比见图 3 和图 4。由图 3 和图 4 可

知,模型优化后实际值和预测值拟合良好。

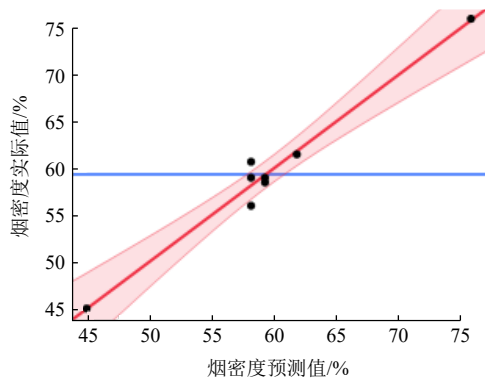


图3 大尺寸电缆烟密度实际值与预测值对比

Fig.3 Actual vs. predicted smoke density of large-diameter cables

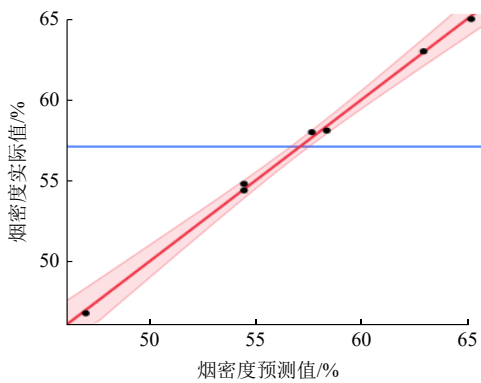


图4 小尺寸电缆烟密度实际值与预测值对比

Fig.4 Actual vs. predicted smoke density of small-diameter cables

### 3.4 回归方程

分析优化后模型的输出系数及概率统计值,大尺寸电缆回归系数显著性见表14。

表14 优化后大尺寸电缆回归系数显著性

Tab.14 Regression coefficients and significance of large-diameter cables after model optimization

项	系数估计值	标准误差	$t_{比}$	$p$
截距	62.7	0.04125	15.44	0.0001*
硅橡胶质量	-0.045	$8.169 \times 10^{-5}$	-5.68	0.0047*
导体质量	0.011	$1.551 \times 10^{-5}$	7.02	0.0022*

注: \*为在0.05水平上显著相关。

由表14和表11分别构建大尺寸电缆和小尺寸电缆的烟密度多元回归方程为

$$Y = 62.7 - 0.045X_1 + 0.011X_2 \quad (9)$$

$$Y = -156.76 + 23.65X_3 - 0.37X_1X_3 + 3.43X_1 \quad (10)$$

式中:  $X_1$  为硅橡胶质量,  $\text{kg} \cdot \text{km}^{-1}$ ;  $X_2$  为导体质量,  $\text{kg} \cdot \text{km}^{-1}$ ;  $X_3$  为外径, mm。

## 4 结果与讨论

根据公式(9)和公式(10),验证其他规格电缆,发现其预测精度较好,预测值与实际值误差在 $\pm 2\%$ 范围内,能够指导产品预设计、划定材料有效应用范围。

由公式(9)可知,对于大尺寸电缆( $\geq 20 \text{ mm}$ ),导体质量与烟密度呈显著正相关( $\beta = +0.011, p < 0.01$ ),反映导体热容延缓燃烧;硅橡胶质量则呈现负相关( $\beta = -0.045, p < 0.01$ )。这一结果揭示,导体截面增大或硅橡胶层厚度减少均会导致烟密度升高。例如,当导体质量从  $400 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1}$  增至  $600 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1}$  时,烟密度增加  $2.2\%$  ( $200 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1} \times 0.011$ );若同时将硅橡胶质量从  $500 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1}$  降低至  $300 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1}$ ,则烟密度将进一步升高  $9.0\%$  ( $200 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1} \times 0.045$ )。烟密度升高可能反映燃烧过程中烟雾释放量的减少,该结论与工程经验一致:绝缘或护套材料过厚(如硅橡胶质量  $> 300 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1}$ )会因热解产物增多而导致透光率显著下降。因此,在防火性能要求严苛的场景,建议优先以导体截面( $\geq 400 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1}$ )与薄层硅橡胶( $\leq 300 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1}$ )设计界限,选用烟密度性能更好的材料,以平衡导电能力与烟雾控制的需求。

由公式(10)可知,对于小尺寸电缆( $< 20 \text{ mm}$ ),烟密度与导体质量无显著关联。这一现象可能归因于小尺寸电缆(规格通常为  $16 \text{ mm}^2$  以下)的导体截面较小,其热容与导热能力有限,难以显著影响燃烧过程中材料的热解速率与烟雾生成量。此外,外径的差异性会直接改变硅橡胶层的体积占比(如外径从  $8 \text{ mm}$  增至  $12 \text{ mm}$  时,硅橡胶用量需减少  $20\%$  以维持烟密度稳定),导致外径与硅橡胶质量的交互作用成为主导因素( $\beta = -0.37, p < 0.0001$ )。值得注意的是,外径对烟密度的独立正向效应( $\beta = +23.65\%$ )显著高于硅橡胶质量的直接影响( $\beta = +3.43\%$ ),表明在小尺寸电缆设计中,外径控制是抑制烟雾释放的核心策略。例如,当外径超出  $12 \text{ mm}$  时,即使硅橡胶质量减少  $5\%$ ,烟密度仍可能因交互作用激增  $15\%$  以上。因此,建议将外径严格限定在  $8 \sim 12 \text{ mm}$  范围内,并同步优化硅橡胶占比( $\leq 15\%$ ),以平衡结构强度与防火性能。最后,需要注意交互项调控:交互项的负向作用( $\beta = -0.37$ )要求在外径增大时严格限制硅橡胶用量,否则烟密度将因二者的叠加效应而激增。

## 5 结论

本研究通过多元回归分析揭示了电缆结构

尺寸对烟密度的定量影响机制,并构建了分尺寸预测模型,主要结论如下。

### 1) 结构参数对烟密度的定量影响机制

对于大尺寸电缆( $\geq 20$  mm):烟密度主要受导体质量与硅橡胶质量的显著影响。导体质量每增加  $1 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-1}$ ,烟密度提升  $0.011\%$ ( $p<0.01$ );硅橡胶质量每增加  $1 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-1}$ ,烟密度降低  $0.045\%$ ( $p<0.01$ ),表明增加导体截面需同步优化绝缘层厚度以平衡防火性能。

对于小尺寸电缆( $<20$  mm):烟密度由外径、硅橡胶质量及其交互作用共同主导。交互项系数为 $-0.37$ ( $p<0.0001$ ),表明外径增大需严格限制硅橡胶用量(建议 $\leq 70 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-1}$ ),以避免烟密度非线性激增。

### 2) 工程应用指导

材料参数阈值:设计要求满足导体截面积大( $\geq 400 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-1}$ )、硅橡胶层薄( $\leq 300 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-1}$ )的大尺寸电缆产品,其烟密度参数能够得到很好的保障。反之,则需要选用烟密度性能更好的硅橡胶材料。

结构设计:小尺寸电缆外径宜控制在  $8\sim 12$  mm,并优化硅橡胶占比(推荐 $\leq 15\%$ ),以规避交互作用导致的烟雾风险。

模型应用:基于回归方程( $R^2>0.97$ ,误差 $\leq 2\%$ ),可直接预测新规格电缆的烟密度,缩短研发周期  $30\%$  以上。

### 3) 研究局限与展望

本研究未考虑极端环境(如高温、高湿)对烟密度的动态影响,未来可结合加速老化试验拓展模型适用性;此外,引入机器学习算法(如支持向量回归)有望进一步提升非线性关系的捕捉精度。

## 参考文献 References

- [1] 蔡炜,杨明睿,林运鑫. 电缆燃烧产烟影响因素的试验研究[J]. *安全与环境工程*, 2009, 16(3): 109-112.  
CAI W, YANG M R, LIN Y X. Experimental study on the effective factors of smoke generation in cable's combustion[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2009, 16(3): 109-112.
- [2] 王彩生,向德坤,魏林强,等. 电缆烟密度测定不合格率较高的分析[J]. *电世界*, 2013(12): 2.  
WANG C S, XIANG D K, WEI L Q, et al. Analysis of high failure rate in cable smoke density testing[J]. *Electric World*, 2013(12): 2.
- [3] 宋静静,王正刚,樊轩虎,等. 不同结构及材料下阻燃光缆烟密度测试结果的分析[J]. *现代传输*, 2020(2): 51-55.
- [4] SONG J J, WANG Z G, FAN X H, et al. Analysis of smoke density test results of flame-retardant optical cables under different structures and materials[J]. *Modern Transmission*, 2020(2): 51-55.
- [5] RAO B N, ARUNJOTHI R, SRINIVASAN A R, et al. Fire safety assessment of polymeric cables and materials based on heat release rate, combustion smoke and toxicity[J]. *Power Research*, 2008, 4(2): 195-212
- [6] RAO B N, ARUNJOTHI R, SRINIVASAN A R. Assessing smoke and fire hazard of burning electric cables[C]// IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, 24-28 July 2012, Bangalore, India. New York: IEEE, 2012.
- [7] TARKA I, PIERGIES J, ŁYSZCZ M. Fire and smoke properties of electric cables and wires in case of different geometric structure and composition[J]. *Materials Research Proceedings*, 2020, 17: 226-232.
- [8] 疏学明,申世飞,刘勇进,等. 火灾烟雾颗粒凝并分形特性研究[J]. *物理学报*, 2006, 55(9): 4466-4471.  
SHU X M, SHEN S F, LIU Y J, et al. Study on fractal coagulation characteristics of fire smoke particles[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(9): 4466-4471.
- [9] 周保华,范洪欣,蔡发,等. 影响电缆或光缆燃烧烟密度测定结果的因素[J]. *检验检疫科学*, 2006, 16(2): 45-47.  
ZHOU B H, FAN H X, CAI F, et al. Factors affecting the measurement results of smoke density from burning cables or optical cables[J]. *Quality Safety Inspection and Testing*, 2006, 16(2): 45-47.
- [10] HARDY M, BRYMAN A. Handbook of data analysis[M]. London: Sage Publications, 2004.
- [11] 冯远照. 多元回归分析-分源预测法对矿井瓦斯涌出量预测研究[J]. *石化技术*, 2023, 30(7): 82-85.  
FENG Y Z. Application of multiple linear regression and source-differentiated prediction method to gas emission in coal mining district[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2023, 30(7): 82-85.
- [12] 陈凯玲,刘亚楠. 多元回归分析在配网工程造价中的应用[J]. *中国电力企业管理*, 2024(18): 52-53.  
CHEN K L, LIU Y N. Application of multiple regression analysis in cost estimation of distribution network projects[J]. *China Power Enterprise Management*, 2024(18): 52-53.
- [13] 魏欣. 基于趋势线拟合的多元试验数据分析的电缆状态评价方法: CN108469571A[P]. 2018-08-31.  
WEI X. Method for cable condition evaluation based on trendline fitting for multivariate test data analysis: CN108469571A[P]. 2018-08-31.
- [14] LI D Q, LI Y C, ASADIZADEH M, et al. Assessing the mechanical performance of different cable bolts based

- on design of experiments techniques and analysis of variance[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 130: 104307.
- [14] 涂虬. Excel 在回归分析中的应用 [J]. *武汉工程职业技术学院学报*, 2001, 13(2): 24-32.
- TU Q. Application of Excel in regression analysis[J]. *Journal of Wuhan Polytechnic*, 2001, 13(2): 24-32.
- [15] 黄志兴. 如何应用 MINITAB 软件来解决多元回归中多个自变量筛选问题 [C]// 中国质量协会. 第三届中国质量学术论坛论文集. 上海: 宝钢股份宝钢分公司, 2008:354-359.
- HUANG Z X. How to solve the question of multi-independent variable screening in multiple regression by MINITAB[C]// China Quality Association. Proceedings of the 3rd China Quality Academic Forum. Shanghai: Baosteel Branch, 2008:354-359.
- [16] GOOS P, MEINTRUP D. Statistics with JMP: Graphs, descriptive statistics and probability[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [17] 马逢时, 周暉, 刘传冰. 六西格玛管理统计指南: MINITAB——使用指导 [M]. 2 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2013. 310-311.
- MA F S, ZHOU W, LIU C B. Six sigma management statistical guide——MINITAB usage instructions[M]. 2nd Edition. Beijing: China Renmin University Press, 2013: 310-311.

收稿日期: 2025-01-05

修回日期: 2025-03-01

作者简介: 汪洪星 WANG Hongxing  
1987—, 男, 高级工程师  
主要从事电线电缆设计及材料配方研发  
E-mail: [hongxing.wong@outlook.com](mailto:hongxing.wong@outlook.com)

## Structural Size Influencing Factors and Predictive Model of Cable Smoke Density Based on Multiple Regression Analysis

WANG Hongxing

(Nexans (Suzhou) Cable Solutions Co., Ltd., Suzhou 215124, China)

**Abstract:** To quantitatively analyze influence mechanisms of cable structural dimensions on smoke density and establish predictive models, multiple regression analysis was employed. Coupling effects of conductor weight, silicone rubber weight and outer diameter were investigated by stratifying datasets based on a critical diameter threshold of 20 mm. Regression equations were constructed based on historical experimental data, with key variables screening through F-tests ( $p < 0.05$ ) and variance inflation factors ( $VIF < 5$ ). Results indicated that for cables with an outer diameter  $\geq 20$  mm, smoke density exhibited a positive correlation with conductor weight ( $\beta = 0.011$ ) and a negative correlation with silicone rubber weight ( $\beta = -0.045$ ). For cables with an outer diameter  $< 20$  mm, the interaction between outer diameter and silicone rubber weight was significant ( $\beta = -0.37$ ), while for every 1 mm increase in outer diameter, a 5% reduction in silicone rubber content was required to suppress the surge in smoke density. Model validation demonstrated that prediction errors within  $\pm 2\%$  ( $R^2 > 0.97$ ) could provide enterprises with a quantitative design tool for material selection and structural optimization. The study transcends the limitations of traditional qualitative analysis and lays the foundation for intelligent algorithm-driven precision design of cable fire safety performance.

**Key words:** cable smoke density; structural parameters; multiple regression; interaction effects; fire-resistant design