

文章编号: 1006-3080(2025)05-0614-09

DOI: 10.14135/j.cnki.1006-3080.20241204001

电阻发热元件温度均匀性仿真研究

谭 健¹, 蔡 冰¹, 刘华臣¹, 徐青怡³, 张 慧², 詹望成³(1. 湖北中烟工业有限责任公司, 武汉 430040; 2. 上海新型烟草制品研究院有限公司, 上海 201315;
3. 华东理工大学工业催化研究所, 上海 200237)

摘要:针对电阻发热元件普遍存在加热温度分布不均匀的问题, 本文采用电热耦合仿真方法对发热元件的结构和材料进行研究与优化, 以降低不同区域的温度差值。首先, 采用温度均匀系数作为发热元件温度均匀性的量化指标, 研究发热元件的折弯间隙宽度、内倒角和外倒角等折弯结构参数对温度分布均匀性的影响, 在原发热元件基础上优化设计了一种能实现最佳温度均匀性的发热元件结构, 其主要采用 $R_1=0.3$ mm 的内倒圆与外直角结合的折弯结构, 间隙宽度为 0.5 mm。进一步研究了不同 PTC(Positive Temperature Coefficient)材料对温度分布均匀性的影响, 结果表明具有较高电阻率和较高热导率的铝铜合金材料有助于改善发热元件的温度均匀性。

关键词:电阻发热元件; 温度均匀性; 电热耦合仿真; 折弯结构; PTC 材料

中图分类号: TB24

文献标志码: A

目前, 小型电加热器具的发热元件普遍采用电阻加热技术^[1], 且存在针状、片状、网状等不同形状^[2]。尽管电阻发热元件基本原理相同, 即在不导电且具有良好的导热性能的基体上覆盖导电浆料或金属导热片^[3], 但普遍存在温度分布不均匀的问题, 直接影响了小型电加热器具的加热效果, 并导致批量生产合格率偏低等一系列问题。例如, 有一款电阻加热元件, 当采用红外测温法测量其表面温度时, 发现同一截面上不同位置的温差可高达 100 °C, 这种温度不均匀性会降低发热元件的加热性能。因此, 开展电加热器具发热元件温度分布均匀性的研究具有重要意义。贾丽娜^[4]使用红外技术对同一批次加热卷烟器具的加热元件进行空载测温, 发现加热元件的温度偏差显著, 然后, 其通过数学建模手段确定并优化加热元件温控系统的关键参数以提升测温稳定性与一致性。时春鑫^[3]对片状中心加热元件搭建了温度控制电路, 并对其基底材料、发热浆料及布线形式进行数值仿真分析, 发现发热浆料在一定条件下对加热

元件的温度场均匀性没有影响, 并联布线形式的温度场均匀性优于串联布线形式, 此研究为实现加热元件温度一致性提供了理论指导。然而, 目前有关发热元件的结构设计和材料选择与提高发热元件温度均匀性关系的研究鲜见报道。

本文针对电阻发热元件温度均匀性较差的问题, 采用仿真模拟方法, 分析并优化发热元件的结构和材料, 通过合理调整其设计参数, 有效改善发热元件温度分布的均匀性, 提升发热元件的加热效果。

1 数学模型

为了研究发热元件的温度均匀性, 需要基于基础理论, 实现在仿真平台对发热元件模型进行电热耦合^[5]求解, 并借助温度均匀系数进行量化分析。

1.1 基础理论

1.1.1 电热方程 在稳态传热过程中, 发热元件作为纯电阻电路, 当电流通过电阻时, 电能全部转化为内

收稿日期: 2024-12-04

基金项目: 教育部基本科研业务费和上海新型烟草制品研究院有限公司研发项目(Z2024-011Z)

作者简介: 谭 健(1993—), 男, 湖北人, 硕士生, 中级工程师, 主要研究方向为新型烟草。E-mail: tanjian@hbtobacco.cn

通信联系人: 张 慧, E-mail: zhangh1@sh.tobacco.com.cn; 詹望成, E-mail: zhanwc@ecust.edu.cn

引用本文: 谭 健, 蔡 冰, 刘华臣, 等. 电阻发热元件温度均匀性仿真研究[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2025, 51(5): 614-622.

Citation: TAN Jian, CAI Bing, LIU Huachen, et al. Simulation on Temperature Uniformity of Resistance Heating Elements[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2025, 51(5): 614-622.

能(热能),没有其他形式的能量转化。

电场分布控制方程:

$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 R \quad (1)$$

其中, P 表示功率, I 表示电流, U 表示电压, R 表示电阻。

热能控制方程:

$$P = K \Delta T S \quad (2)$$

其中, K 表示综合传热系数^[6], 包括导热系数、对流传热系数和辐射系数; ΔT 表示温度差; S 表示加热元件的表面积。

1.1.2 发热元件电阻值计算 在电压恒定的情况下, 加热元件的发热量由加热元件的电阻值大小所决定。加热元件的电阻计算公式为:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3)$$

其中, ρ 为材料的电阻率, L 为加热元件的长度, A 为加热元件的横截面积。由于加热元件通常采用金属材料, 其电阻率会随着温度的变化而变化, 金属材料的电阻率与温度之间的线性关系表达式如式(4)所示:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (4)$$

其中, ρ_0 为参考电阻率, α 为材料的电阻率温度系数(TCR), T_0 为参考温度。

综合式(1)~式(3), 发热元件的电阻值由材料及结构决定, 同时受电能和热能影响, 关系式如下:

$$P = U^2 A / [L \rho_0(1 + \alpha(T - T_0))] \quad (5)$$

$$\Delta T = P / (KS) \quad (6)$$

1.2 电热耦合仿真

1.2.1 基础理论 仿真计算可以对各种传热过程进行模拟, 已广泛应用于工程设计和优化^[7-9]。其中, ANSYS 电热耦合理论基于有限元法(FEM), 结合电场与热场的相互作用, 通过焦耳热效应进行耦合^[10], 电流通过导体产生焦耳热, 作为热源加载到热场中。

在终端电压驱动下, 发热元件内部电场和电流密度^[11]的表达式分别为:

$$E = -\nabla V \quad (7)$$

$$J = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e \quad (8)$$

其中, ∇ 为纳布拉算子; E 为发热元件内部电场; V 为电势; J 为电流密度, A/m^2 ; σ 为电导率, $1/(\Omega \cdot m)$; $\frac{\partial D}{\partial t}$ 为位移电流密度, A/m^2 ; J_e 为外部电流密度, A/m^2 ; t 为时间, s 。

根据焦耳定律 $P = JE$, 代入式(7)和式(8)得到发热元件内部 P 的表达式:

$$P = \left(\sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e \right) \cdot (-\nabla V) \quad (9)$$

发热元件内部热传递过程属于含内热源的三维非稳态传热, 其表达式如下:

$$P = \rho' c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) \quad (10)$$

其中, ρ' 为材料的密度, kg/m^3 ; k 为传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; c 为材料的比热容, $J/(kg \cdot K)$; T 为温度, K 。

将式(9)代入式(10), 即可得到发热元件上的温度分布:

$$\rho' c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = \left(\sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e \right) \cdot (-\nabla V) \quad (11)$$

ANSYS 通过迭代计算, 更新温度依赖的材料属性, 确保电场与热场的动态耦合求解, 从而准确模拟电热相互作用的复杂过程。本研究采用 ANSYS Workbench 中的 Electric-Thermal 模块进行仿真, 可以快速获得发热元件的温度与电流密度分布, 极大提高了电加热器具传热计算的准确性和效率。

1.2.2 几何模型 运用 ANSYS SpaceClaim 软件建立发热元件的几何模型, 如图1所示, 可以视为等宽、等厚的长方形薄片等距弯折3次($n=3$)后的对称模型, 首尾两端连接电源。在元件弯折处增加两个半径参数, 分别为内圈半径(内倒角半径) R_1 和外圈半径(外倒角半径) R_2 , 如图2所示。实际发热元件模型所涉及的相关参数见表1。

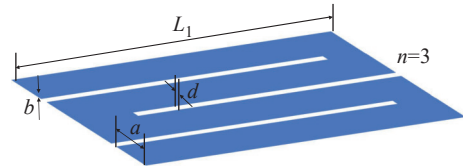


图1 发热元件几何模型

Fig. 1 Geometric model of heating element

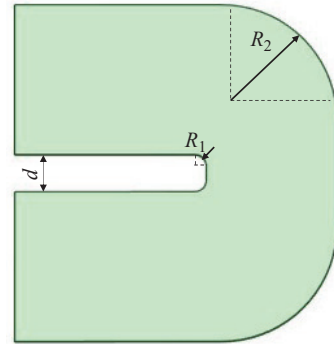


图2 发热元件弯折处内外倒角示意图

Fig. 2 Illustration of the inner and outer chamfers at the bending points of the heating element

表 1 发热元件结构参数

Table 1 Structural parameters of heating element

L_1/mm	a/mm	b/mm	d/mm	n	R_1/mm	R_2/mm
10	1.25—1.45	0.02—0.03	0.1—0.5	3	0.1—0.35	0—1.5

在趋肤效应作用下,电流会在发热电路的弯折处出现聚集现象^[12]。为了研究发热元件的加热性能,优化电流聚集效应^[13],在仿真研究过程中调整间隔宽度(d),改变原有直角为倒角。

1.2.3 仿真基础 基于理论基础,结合实际发热元件模型,电热耦合关系式如式(12)~式(14)所示。

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho_0(1 + \alpha(T - T_0)) \frac{4L_1 + 3d}{ab} \quad (12)$$

$$P = U^2 ab / [(4L_1 + 3d)\rho_0(1 + \alpha(T - T_0))] \quad (13)$$

$$P = \Delta T K (4L_1 + 3d)a \quad (14)$$

1.2.4 边界条件 本文采用的发热元件实际工作条件如下:工作电压 1~5 V,工作温度 250~350 °C,换热系数 500~800 W/(m²·K)。因此,对发热元件模型首尾两端施加恒定电压 3 V,环境温度为 22 °C,设置换热系数为 500 W/(m²·K)。

1.2.5 网格划分及网格质量 使用高阶四面体网格划分方法,软件会自动根据模型的几何特征进行划分。设置网格最小单元尺寸为 5×10^{-5} m,壁面处网格进行加密处理,所划分网格单元质量分布如图 3 所示,其中 Tet10 表示 10 节点二次四面体单元。由图 3 可知,所划分网格绝大部分均处于高质量网格区间(0.75~1.00),存在一些质量中等区间(0.50~0.75)的网格,但仍在可接受范围内,整体网格质量良好,满足模拟计算的精度要求。

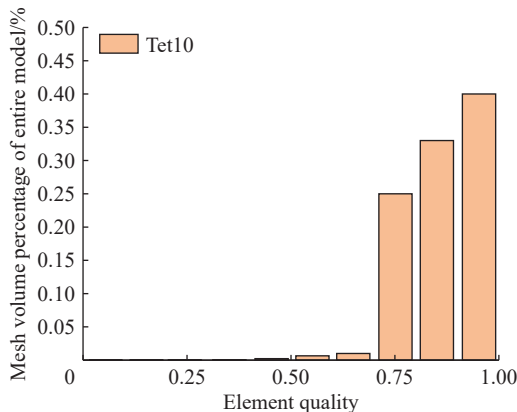


图 3 模型网格单元质量图

Fig. 3 Quality chart of model mesh units

1.2.6 温度均匀性 发热元件结构设计的目的减小发热元件表面低温区与高温区的差值,使得温度分布尽可能均匀。本文采用温度均匀度系数(η)作

为发热元件整体加热性能的评价指标,以确保分析的准确性^[14-15]。

$$\bar{T} = \frac{\sum T_i}{N} \quad (15)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (T_i - \bar{T})^2}{N}} \quad (16)$$

$$\eta = \frac{\sigma}{\bar{T}} \quad (17)$$

其中, T_i 为区域 i 处测量得到的温度值; N 为采样点个数; $\bar{T}$ 为采样点平均温度; σ 为采样点均方差,反映全部统计温度点和平均温度的偏离程度; η 作为均方差与平均温度的比值,以消除不同参考温度带来的影响,该数值越小,表明温度的均匀性越好。

2 结果与讨论

由于本研究涉及的发热元件温度不均匀现象主要存在于弯折区域,因此重点研究不同折弯结构与材料对于发热元件的电阻值及表面温度的影响。其中,材料参数设置为热导率为 100 W/(m·°C),电阻率为 3×10^{-5} Ω/m。

2.1 不同折弯结构对发热元件温度分布均匀性的影响

2.1.1 间隙宽度的影响 在原直角折弯结构(图 4)基础上,不改变折弯结构(3 mm×3 mm),研究间隙宽度 d 对发热元件温度均匀性的影响,其中约束条件为折弯结构总宽 3 mm($2a+d=3$ mm),折弯结构总电阻 $R=5$ Ω。结合电阻计算公式调整发热片宽度(a)与厚度(b),具体变量参数如表 2 所示。

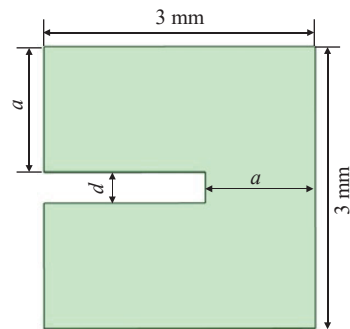


图 4 直角折弯结构图

Fig. 4 Structural diagram of right-angle bending

在给定电压 3 V 的情况下,通过热电偶进行仿真研究,获得图 5 所示的发热元件温度云图。由于温度云图中无法直观得到间隙宽度对温度均匀性的影响,因此引入温度均匀系数,计算得到图 6 所示的

表 2 直角折弯结构尺寸

Table 2 Dimensions of the right-angle bending structure			
No.	d/mm	a/mm	b/mm
A	0.1	1.45	0.025
B	0.2	1.40	0.026
C	0.3	1.35	0.028
D	0.4	1.30	0.029
E	0.5	1.25	0.030

均匀系数、温度与间隙宽度关系图。在电阻值与电压值均保持恒定的情况下, 折弯结构内部间隙宽度

越大, 温度均匀系数越小, 表明较大的间隙有助于改善加热过程中的温度均匀性。这是因为随着间隙宽度的增大, 热量能够更均匀地分布在整個加热元件中。但加热均匀性与间隙宽度之间存在的正相关性有一定的上限。在实际使用中, 持续增加间隙宽度会导致发热元件厚度增加, 以保持电阻值的恒定。但设计上的物理限制导致发热元件的厚度通常只能在 0.015~0.030 mm 之间进行调整。因此, 合理调节发热元件间隙宽度对加热均匀性具有重要影响。结合表 2 和图 5、图 6 可见, 当 $d=0.5\text{ mm}$ 、 $a=1.25\text{ mm}$ 、 $b=0.030\text{ mm}$ 时, 折弯结构 (E) 的发热均匀性最佳。

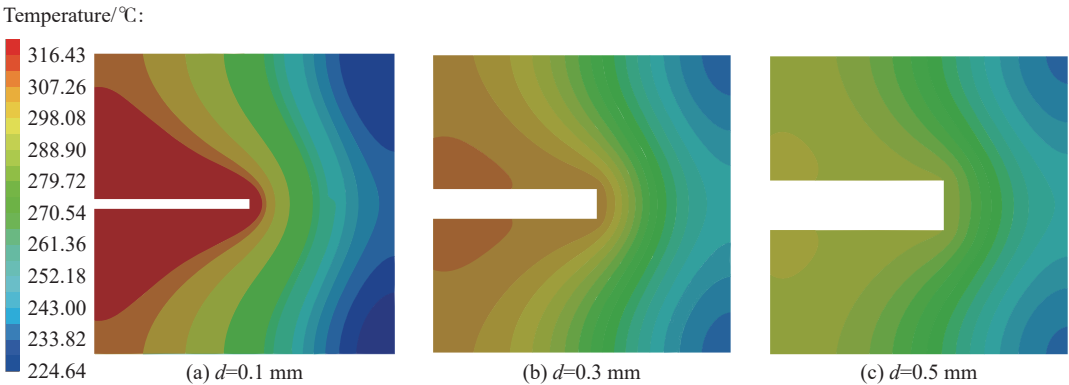


图 5 部分折弯结构的温度云图
Fig. 5 Temperature contour maps of the partially bent structures

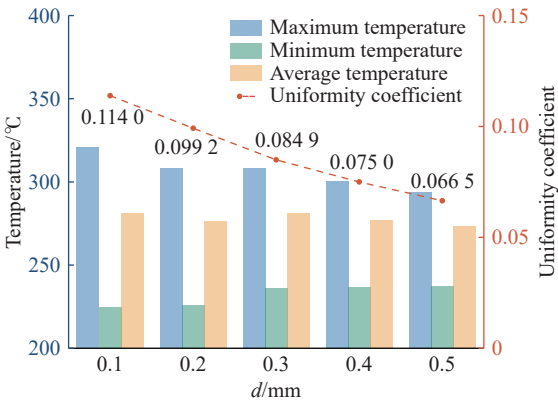


图 6 均匀系数、温度与间隙宽度关系图
Fig. 6 Relationship diagram among uniformity coefficient, temperature and gap width

2.1.2 内倒角形状的影响 内倒角主要是通过改变结构的几何形状影响热量传递和温度分布。在直角折弯结构 (E) 的基础上, 仅改变内倒角半径 R_1 (0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 mm, 分别命名为 E1~E6), 研究内倒角形状对加热均匀性的影响。图 7 和图 8 所示分别为 R_1 为 0.10、0.25 mm 和 0.30 mm 时折弯结构示意图和温度云图。

图 9 所示为均匀系数、温度与内倒角半径的关

系图。在仅改变内倒角的折弯结构 (E1~E4) 中, 温度均匀系数随着内倒角半径 R_1 的增大而增大, 并且在所有情况下均大于原直角结构的温度均匀系数 (0.066 0), 说明内部直角结构的温度均匀性劣于倒角结构。但是将内部直角处理成内倒圆 $R_1=0.30\text{ mm}$ (E5) 时, 最高温度与最低温度差值最小, 温度均匀系数降至 0.030 3, 温度均匀性最佳。随着内倒圆半径进一步增大到 0.35 mm (E6), 温度均匀系数又增大, 温度均匀性下降。

这一现象表明, 当把内部直角处理成倒角时, 可能破坏了原本直角结构下相对稳定的热传导和热扩散状态, 改变了热量传导的方向和速率, 热量更容易在某些区域聚集, 从而导致温度均匀性下降, 即温度均匀系数增大。而将内部直角处理成内倒圆后, 热量能够相对均匀地传递与扩散, 减少了局部热点和冷点的形成, 使得温差减小, 温度均匀系数降低。但内倒圆半径的优化应遵循一个平衡原则, 适度的内倒角半径能够平衡热流的局部集中效应, 有效改善温度分布均匀性, 半径过大则会对温度均匀性产生负面影响。

2.1.3 外倒角形状的影响 在 2.1.2 节不同内倒角折

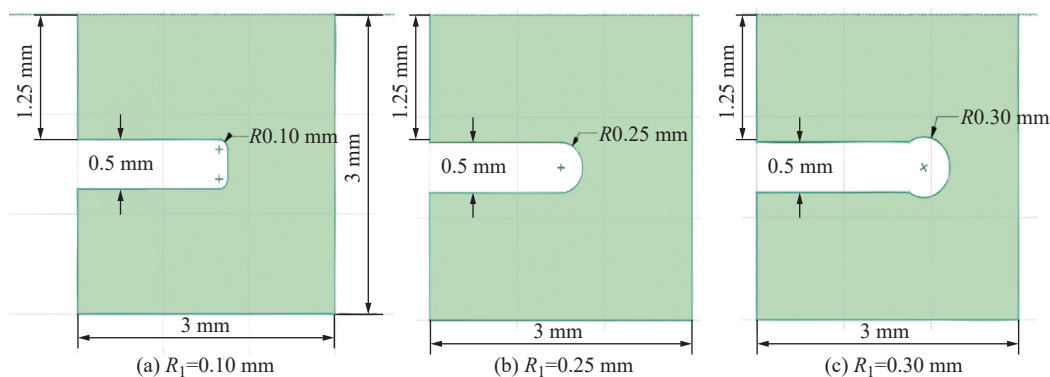


图 7 部分内倒角的形状和尺寸图

Fig. 7 Graphics and dimension diagrams of the partially inner chamfers

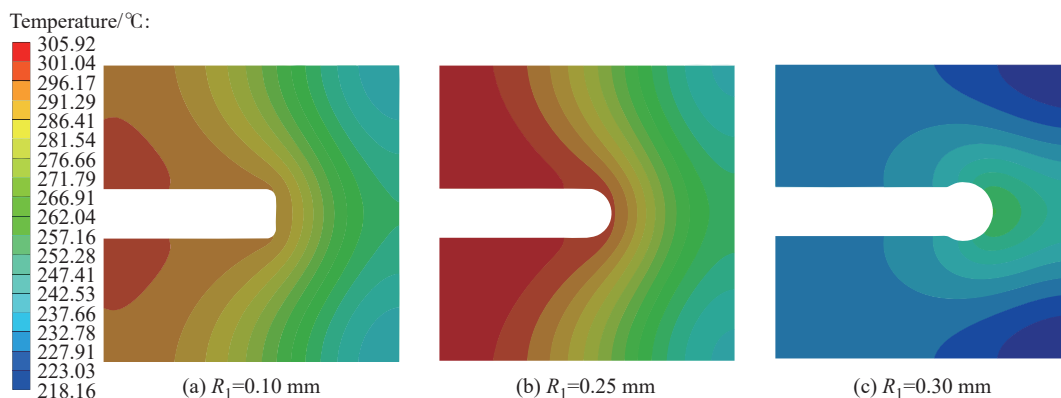


图 8 部分内倒角下折弯结构的温度云图

Fig. 8 Temperature contour map of bent structures with partially inner chamfers

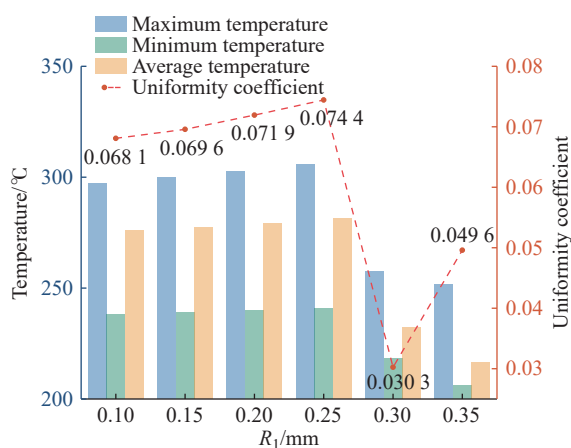


图 9 均匀系数、温度与内倒角半径的关系图

Fig. 9 Relationship diagram among uniformity coefficient, temperature and inner chamfer radius

弯结构研究中发现, E5 温度均匀性最佳, 在此基础上, 进一步将 E5 折弯结构的外直角进行倒角化处理, 设置不同外倒角半径, 并以 E5a~E5f 编号, 如表 3 所示, 具体尺寸如图 10 所示。

图 11 为 3 种不同外倒角的折弯结构的温度云图。通过对温度云图的数据计算可以得到图 12, 结果表明外倒角结构(E5a~E5f)温度均匀系数均大于

表 3 不同外倒角折弯结构尺寸

Table 3 Dimensions of bent structures with different outer chamfers

Outer chamfer	R_2/mm
E5a	0.25
E5b	0.50
E5c	0.75
E5d	1.00
E5e	1.25
E5f	1.50

外直角结构(E5)的对应值; $R_2=0.25\text{ mm}$ 时温差最小, $R_2=1.50\text{ mm}$ 时温差最大。在同为内倒圆的结构下, R_2 越大, 折弯结构的温差越大, 温度均匀系数越大, 即热场分布越不均匀。这可能是较大的外倒角使折弯结构的热量集中, 散热区域减小, 导致局部温度升高更明显。因此为了改善温度均匀性, 建议选择较小的外倒角半径, 以减小温差。

2.2 发热元件结构优化模型

结合上述分析讨论, 在不改变原发热元件总长与总宽的基础上, 采用 $R_1=0.3\text{ mm}$ 、 $d=0.5\text{ mm}$ 、 $a=1.25\text{ mm}$ 、

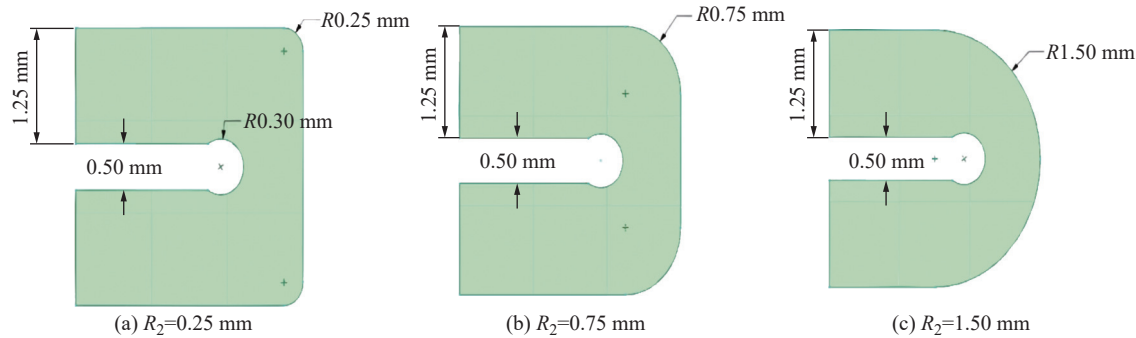


图 10 部分外倒角的形状和尺寸图

Fig. 10 Graphics and dimension diagrams of the partially outer chamfers

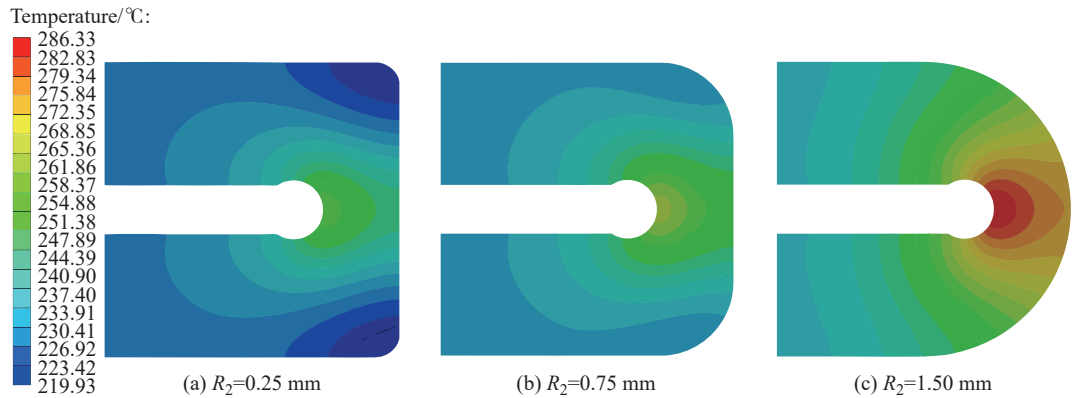


图 11 部分外倒角下折弯结构的温度云图

Fig. 11 Temperature contour maps of bent structures with partially outer chamfers

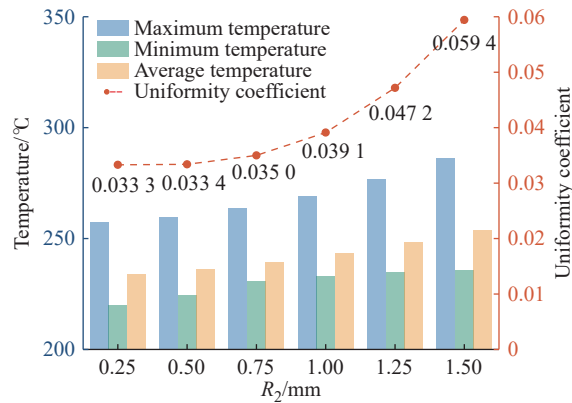


图 12 均匀系数、温度与外倒角半径的关系

Fig. 12 Relationship among uniformity coefficient, temperature and outer chamfer radius

$b=0.03\text{ mm}$ 的折弯结构,设计了一款温度均匀性优异的发热元件结构,具体结构尺寸如表 4 所示。

在表 5 所示发热元件仿真条件下,计算了发热元件的温度云图和不同折弯区域宽度的电流密度云图,分别如图 13 与图 14 所示。发热元件折弯区域存在局部高温点,这是由于该区域存在较大的电流密度,热能传递效率较高。同时,折弯区域直角边缘处具有较强的散热能力,使高温区的温度有所降低,从而使温度均匀系数下降,仅为 0.005 3,展现出极佳的

表 4 发热元件结构尺寸

Table 4 Structural dimensions of the heating element						
L_1/mm	a/mm	b/mm	d/mm	n	R_1/mm	R_2/mm
10	1.25	0.03	0.5	3	0.3	0

表 5 发热元件仿真条件

Table 5 Simulation conditions of the heating element					
U/V	$T_0/^\circ\text{C}$	$K/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	$k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	$\rho/(\Omega\cdot\text{m}^{-1})$	
3	22	500	100	3×10^{-5}	

温度分布均匀性。从图 15 发热元件的热流密度云图可见,发热元件折弯区域外直角边缘处热流密度较低,但整体热流密度分布较均匀,这意味着发热元件各点的温度趋于一致,正如图 13 所示,整体发热元件的温差小于 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 。由此可见,在这种发热元件结构下,适度的边缘散热能够有效降低因折弯区域电流密度过大引起的局部高温问题,有利于实现整体温度均匀性。

2.3 材料属性对发热元件温度分布均匀性的影响

受材料的电阻率与热导率影响,仿真得到的发热元件加热温度处于较低水平。因此,需要进一步优化发热元件的材料,以提升其加热温度均匀性。

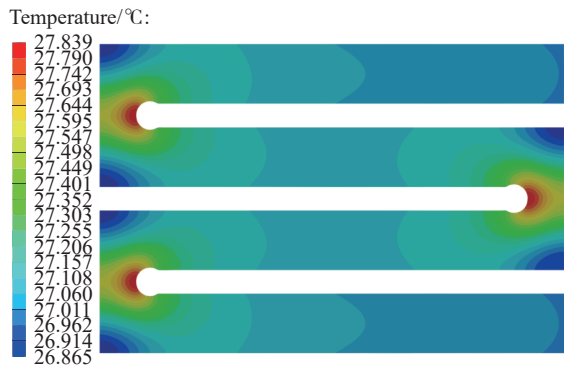


图 13 发热元件的温度云图

Fig. 13 Temperature contour map of the heating element

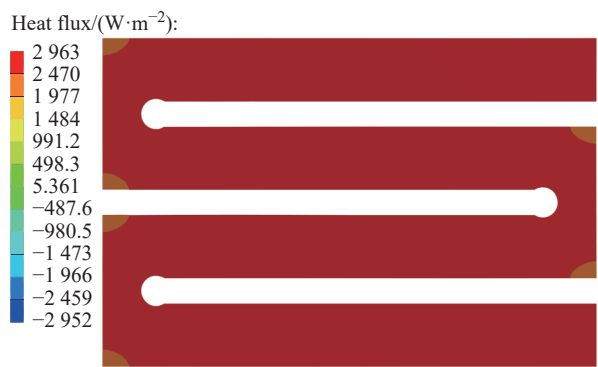


图 15 发热元件的热流密度云图

Fig. 15 Heat flux contour map of the heating element

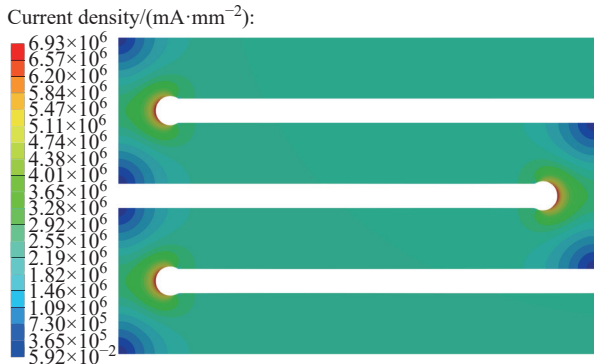


图 14 发热元件的电流密度云图

Fig. 14 Current density contour map of the heating element

不同材质的物性差异明显,根据实际工作电压(1~5 V)和所需达到的加热温度(250~350 ℃)来确定合适的加热功率。通常,会采用调控电压的方式来实现发热元件功率调节,因此研究不同稳态电压下加热元件的电热耦合情况,其中保持环境温度22.0 ℃、换热系数 500 W/(m²·K) 的边界条件。

结合 2.2 节设计的最优发热元件结构,在考虑发热元件的材料选用时,首要原则是材料需具备高电阻率与良好热导率,以保证电能高效转化为热能并有效传导。此外,材料应具备耐高温性、耐腐蚀性、可加工性等特点,结合上述分析,筛选了以下 3 种合适的 PTC (Positive Temperature Coefficient) 材料,作为发热元件的材料,具体属性详见表 6。

2.3.1 铝铜合金 铝铜合金 (Aluminum-Copper alloy) 是一种常见的金属合金,具有优良的力学性能、良好

的导电性以及相对较低的密度。不同铜含量的合金具有不同的性能和应用,含铝较多的合金其电阻率较高,且更容易加工。

图 16 所示为不同电压下铝铜合金对发热元件温度均匀性的影响。随着电压从 3.0 V 增加到 5.0 V,发热元件的温度均随之增加,并且铝铜合金的均匀系数普遍低于 0.025,且相对稳定,说明发热元件在该电压区间内的整体温度均匀性较好。其中电压为 4.5 V 时,发热元件的平均温度为 310 ℃,较符合工作温度范围,而电压为 5.0 V 时发热元件的最低温度高于 350 ℃。因此,铝铜合金在 3.0~4.5 V 电压下表现出良好的温度均匀性和工作稳定性,对实际设计应用具有一定借鉴意义。

2.3.2 铜镍合金 铜镍合金 (Copper-Nickel alloy) 是一种常用于各种工业应用的材料,它具有优良的耐腐蚀性、耐高温性和良好的导热与加工性能,广泛应用于许多领域。

图 17 所示为不同电压下铜镍合金对发热元件温度均匀性的影响。随着电压的增加,发热元件的最高温度、最低温度和平均温度都呈上升趋势,并且超出了一定的工作温度范围。其中,电压为 2.0~3.5 V 时温度均匀系数相对稳定且略微增大。在电压为 2.5 V 时,发热元件的最高温度为 352 ℃,平均温度为 240 ℃,较符合发热元件的工作条件,但未达到较好的温度均匀性。

2.3.3 镍铬合金 镍铬合金 (Nickel-Chromium alloy)

表 6 不同 PTC 材料参数

Table 6 Different PTC material parameters

Material	Density/(kg·m ⁻³)	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Resistivity/(Ω·m)	Temperature coefficient of resistance/(°C ⁻¹)
Aluminum-Copper alloy	1.93×10 ⁴	174	5.6×10 ⁻⁷	4.5×10 ⁻³
Copper-Nickel alloy	8.90×10 ³	20	4.9×10 ⁻⁷	8.0×10 ⁻⁶
Nickel-Chromium alloy	8.40×10 ³	15	1.0×10 ⁻⁶	4.0×10 ⁻⁴

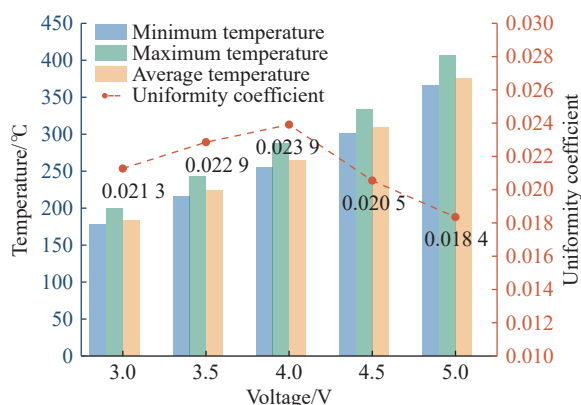


图 16 不同电压下铝铜合金对发热元件温度均匀性的影响

Fig. 16 Influence of aluminum-copper alloys on the temperature uniformity of heating elements under different voltages

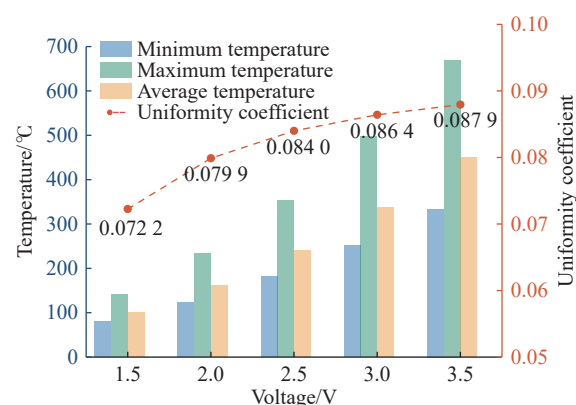


图 17 不同电压下铜镍合金对发热元件温度均匀性的影响

Fig. 17 Influence of copper-nickel alloys on the temperature uniformity of heating elements under different voltages

是制造电热元件的常用材料,由于其耐高温和高电阻性,镍铬合金可以在较高的电流和温度下长时间工作,并且具有良好的抗腐蚀性和可加工性,适用于各种制造需求。

图 18 所示为不同电压下镍铬合金对发热元件温度均匀性的影响。当电压从 2.5 V 升高到 4.5 V

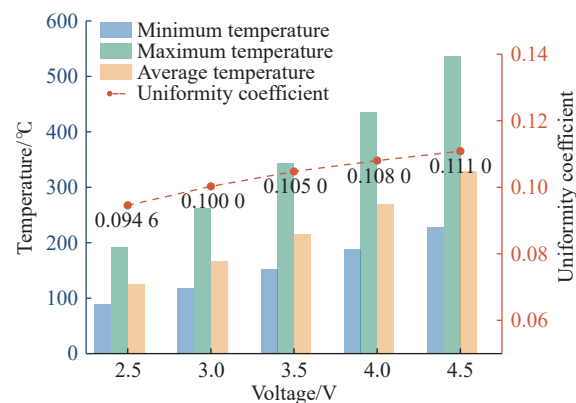


图 18 不同电压下镍铬合金对发热元件温度均匀性的影响

Fig. 18 Influence of nickel-chromium alloys on the temperature uniformity of heating elements under different voltages

时,发热元件的最高温度显著增加,同时温差从 101 °C (2.5 V) 增加到 308 °C (4.5 V)。在较高电压下,局部过热,会使温度分布均匀性变差,影响使用寿命和性能。而在较低电压(如 2.5 V)下,温度不满足发热元件工作温度的最低要求。图 18 所示温度均匀系数均保持在 0.1 附近,这表明镍铬合金材料的温度均匀性差,不适用于本研究的发热元件。

结合上述分析,铝铜合金相比于其他两种材料热导率较高,发热元件整体的温度均匀性较好,并且在一定电压范围内符合实际工作温度,是 3 种合金材料中最佳的 PTC 材料。

3 结 论

本文主要研究了电阻发热元件的电阻值与温度之间的关系,借助仿真模拟方法,通过调节发热元件的结构和材料来优化温度分布,从而提高发热元件表面温度的均匀性,实现对小型电加热器具性能的显著提升,主要结论如下:

(1) 通过调节发热元件的折弯结构,在不改变原发热元件整体长度与宽度的基础上,优化设计了一款温度均匀性表现优异的发热元件折弯结构(E5),其主要采用 $R_1=0.3$ mm 的内倒圆结构与外直角结构,间隙宽度为 0.5 mm,该结构适度的边缘散热有效降低了折弯区域的内部高温,显著提升了发热元件整体温度均匀性。

(2) 结合优化的发热元件模型,通过调节稳态电压,筛选出适合发热元件工作条件的材料。其中铝铜合金材料具有较高电阻率与良好热导率,有利于实现发热元件的温度均匀性,尤其是在较高电压(3.0~4.5 V)下,铝铜合金表现出良好的温度均匀性,对实际设计应用具有一定借鉴意义。

参考文献:

- [1] 李强,谢泉,马瑞,等.厚膜电阻的研究现状及发展趋势[J].材料导报,2014,28(7):31-38.
- [2] 时春鑫,郑绪东,吴建德,等.加热卷烟加热元件温度场分析及试验研究[J].烟草科技,2020,53(11):89-96.
- [3] 时春鑫.加热卷烟电阻式加热元件传热模型与实验研究[D].昆明:昆明理工大学,2021.
- [4] 贾丽娜.电加热不燃烧卷烟烟具温控系统的优化与设计[D].昆明:昆明理工大学,2019.
- [5] 滕双双.钢板电阻加热有限元模拟研究[D].沈阳:东北大学,2019.
- [6] 卢昕博,滕如玉,陈嘉彬,等.电子设备外壁自然散热综合传热系数仿真研究[J].华东理工大学学报(自然科学版),

- 2024, 50(5): 659-667.
- [7] 司念朋. 正温度系数电热元件及器具试验仪的研制 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [8] 孙志伟, 王威, 杜文, 等. 电加热型烟草制品加热体的电热模拟 [J]. 烟草科技, 2020, 53(9): 85-93.
- [9] 孙剑韬, 陈义坤, 刘磊, 等. 加热不燃烧型雾化系统传热仿真分析 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2021, 54(7): 668-674.
- [10] 桂秦锋. 某款电加热烟草产品的 CFD 仿真与实验验证 [D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [11] 黄宵宁, 刘锦, 杨成顺, 等. 典型表面状态下的绝缘子空间电场特性研究 [J]. 电力工程技术, 2020, 39(3): 144-150.
- [12] 杜林, 张科, 冯辉, 等. 计及趋肤效应的套管载流结构损耗分析 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(17): 4746-4756.
- [13] 岳小萍, 关君. 电趋肤效应机理与应用 [J]. 新乡学院学报 (自然科学版), 2012, 29(1): 24-26.
- [14] 康智强, 徐博文, 夏晓东, 等. 地面毛细管辐射板的温度不均匀性和供热能力数值分析 [J]. 节能, 2020, 39(10): 15-17.
- [15] 陈忠加, 雷雯雯, 王青春. 基于温度和速度均匀性的侧送风烘房设计及仿真 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 18-26.

Simulation on Temperature Uniformity of Resistance Heating Elements

TAN Jian¹, CAI Bing¹, LIU Huachen¹, XU Qingyi³, ZHANG Hui², ZHAN Wangcheng³

(1. China Tobacco Hubei Industrial Co. Ltd, Wuhan 430040, China; 2. Shanghai New Tobacco Product Research Institute Co. Ltd, Shanghai 201315, China; 3. Institute of Industrial Catalysis, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Regarding the common issue of uneven temperature distribution in resistive heating elements, this paper adopts an electro-thermal coupling simulation method to research and optimize the structure and materials of the heating elements, aiming to reduce the temperature difference across different regions. Firstly, the temperature uniformity coefficient is used as a quantitative index to evaluate the temperature uniformity of heating elements. The influence of bending structure parameters such as the bending gap width, inner chamfer, and outer chamfer of the heating element on the uniformity of temperature distribution is studied. Based on the original heating element, an optimized heating element structure that can achieve the best temperature uniformity is designed, it mainly adopts a bending structure combining an inner fillet with $R_1 = 0.3$ mm and an outer right angle, with a gap width of 0.5 mm. Furthermore, the influence of different PTC (Positive Temperature Coefficient) materials on the uniformity of temperature distribution is studied. The results show that the aluminum-copper alloy material with higher resistivity and higher thermal conductivity is beneficial to improving the temperature uniformity of the heating element.

Key words: resistive heating element; temperature uniformity; electro-thermal coupling simulation; bending structure; PTC material

(责任编辑: 张欣)