

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.03.04

真空炉温度均匀性测量的数值模拟研究

刘明君, 赵学师

(中国电子科技集团公司第十四研究所, 江苏 南京 210039)

摘 要: 热电偶是检测真空炉温度均匀性的常用计量器具, 但目前热电偶的几何特性及发射率对炉温均匀性检测影响方面的研究较少。本文利用数值模拟方法研究了热电偶发射率和直径对真空炉温度均匀性检测的影响, 结果表明直径和发射率对常用规格热电偶稳态温度影响量级相当。开展零维模型分析, 结果表明热电偶温度对直径和发射率相对变化率的敏感性相等, 验证了数值模拟结论的准确性, 为真空炉温度计量提供了理论指导与技术借鉴。

关键词: 真空炉; 温度均匀性; 热电偶; 数值模拟

中图分类号: TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)03-0020-05

Numerical Simulation of Measurement of Temperature Uniformity in Vacuum Furnace

LIU Mingjun, ZHAO Xueshi

(The 14TH Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210039, China)

Abstract: Thermocouples have been widely applied in the measurement of temperature uniformity of vacuum furnaces. The effects of geometry and emissivity of thermocouple on the temperature uniformity measurement have not been sufficiently investigated. These effects have been investigated by numerical simulation method in this paper. The results show that the influence of diameter of thermocouple on the steady-state temperature of commonly used thermocouples is close to the influence of emissivity. The 0D model analysis shows that the sensitivity of thermocouple temperature to the relative change rate of diameter is equal to the sensitivity to the relative change rate of emissivity, which verifies the accuracy of the numerical simulation conclusions. This article provides a theoretical guidance and technical reference for temperature measurement of vacuum furnace.

Key words: vacuum furnace; temperature uniformity; thermocouple; numerical simulation

0 引言

真空炉广泛应用于焊接、镀膜、热处理、干燥、冶金等领域^[1-2], 温度均匀性是真空炉保证真空工艺产品质量的重要指标^[3]。目前, 真空炉的温度计量以及温度控制普遍利用热电偶实现^[4-6]。在真空条件下, 真空炉内气体的对流和导热非常微弱, 传热以辐射为主, 测温准确性受热电偶本身性能的影响很大。由于角系数以及材料发射率不同^[7], 控温与测温热电偶以及载荷间对温度的响应时间不同, 控温和测温存在温度滞后或超前^[8]。改善炉温控制系统, 例如引入模糊 PID 控制算法^[9]等, 可提升真空炉温度均匀性; 通过在热电偶测温端增加套管等方式改善真空炉热电偶的测温准确度已有一些实践^[10]。

由于真空测温实验手段受限, 数值模拟成为了探究真空炉温度场分布影响因素以及预测改进方案效果的便捷手段。真空过程的瞬态温度场, 例如真空钎焊工件的温度变化^[11]、真空碳热还原过程的温度场^[12]等, 是真空过程传热仿真的关注点。对于真空炉的温

度均匀性, 目前的研究多关注加热器的几何尺寸、数目等因素^[13-14]产生的影响, 而测温和控温热电偶几何特性及发射率差异对温度均匀性的影响则少有研究。

本文利用数值模拟方法探究了控温和测温热电偶发射率、直径对温度均匀性的影响, 计算了不同加热功率下控温热电偶与测温热电偶间温度响应的差异以及载荷的温度滞后情况, 为优化真空炉温度均匀性检测提供理论指导。

1 数值模拟

1.1 物理模型

真空炉、热电偶和载荷的仿真布置如图 1 所示。为减少炉体几何因素对辐射的影响, 将炉体简化为立方体, 炉体内壁长 0.5 m, 外壁长 0.6 m, 炉体内壁面为加热面; 载荷几何尺寸(长 × 宽 × 高)为 10 cm × 10 cm × 2 cm; 控温热电偶直径 2 mm, 布置于载荷上方中轴线处, 距离内壁 15 cm; 测温热电偶直径 2 mm, 按温度均匀性检定的九点测温法布置, 外侧的 8 个测

温点距相邻三个壁面的距离为 5 cm。炉体壁面为每个热电偶开有直径为 4 cm 的安装孔。

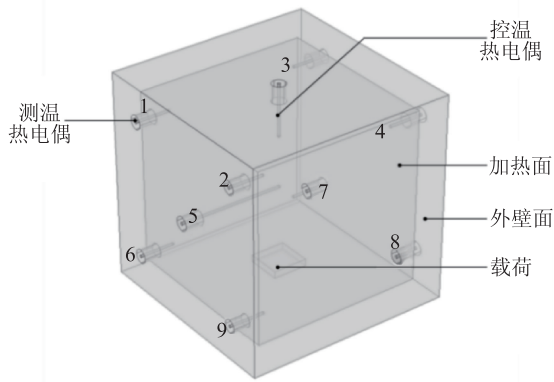


图 1 数值模拟真空炉和热电偶布置示意图

1.2 基本方程

真空炉内空气稀薄，忽略炉内空气的对流传热和导热，只考虑真空炉壁和热电偶、载荷间的辐射和导热。热电偶、载荷和真空炉壁面内的传热控制方程为

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式中： T 为温度； ρ 为密度； c_p 为定压比热； λ 为导热系数； x, y, z 为空间坐标； t 为时间。

热电偶表面、载荷表面和内壁之间进行辐射换热，假设各表面均为灰体漫反射表面，炉内第 k 个表面的净吸收热流 q_k 为

$$q_k = G_k - J_k \quad (2)$$

式中： G_k 为第 k 个表面收到的投射辐射力； J_k 为第 k 个表面的有效辐射力。

表面的有效辐射力包括表面的灰体辐射和对投射辐射力的反射两部分。考虑到辐射不容易透过真空炉内各表面，因此有

$$J_k = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + (1 - \varepsilon_k) G_k \quad (3)$$

式中： ε_k 为发射率； σ 为 Stefan-Boltzmann 常数， $5.67 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-4}$ 。

表面收到的投射辐射力为

$$G_k = \frac{1}{A_k} \sum_i J_i A_i X_{i,k} = \sum_i J_i X_{k,i} \quad (4)$$

式中： J_i 为第 i 个表面的有效辐射力； A_i 为第 i 个面的面积； $X_{k,i}$ 为角系数，即第 k 个面向第 i 个面的辐射占第 k 个面总辐射量的比例； $X_{i,k}$ 为角系数，即第 i 个面向第 k 个面的辐射占第 i 个面总辐射量的比例； A_k 为第 k 个面的面积。

辐射热源为加在炉体内壁面的均匀热源，其功率根据控温热电偶温度按如下形式调节

$$Q = Q_0 \frac{T_g - T_c}{T_g - T_0} \quad (5)$$

式中： Q_0 为最大功率，取为 10 kW； T_c 为控温热电偶温度； T_g 为目标温度，取为 600 ℃； T_0 为环境温度，20 ℃。炉体外侧壁面温度和初始温度均为 20 ℃。数值模拟采用 COMSOL Multiphysics 完成。热电偶导热系数、定压比热和密度按铂的物理性质取值，载荷、加热器和绝热壁的导热系数、定压比热、导热系数和发射率分别参照钢、石墨和石墨毡的物理性质取值。

表 1 材料的物理性质参数

结构	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	ε
加热器	1700	1500	180	0.95
绝热壁	120	200	0.05	0.77
载荷	7800	1000	30	0.8
热电偶	21450	133	71.6	0.8

2 结果与讨论

2.1 基本温升特性

真空炉加热过程中，测温热电偶、控温热电偶和载荷中心点的温升特性如图 2 所示。热电偶和载荷的温升速率均先快后慢，最终温度达到稳定。载荷较热电偶比热容更大，几何尺寸更大，更靠近加热面，因此角系数更大，比表面积更小，热扩散率也更小。负载的温度滞后表明，角系数对负载温度的影响与几何尺寸和物理性质的影响相比较小。

如图 3 所示，控温热电偶发射率由 0.75 增加至 0.95，控温热电偶相对负载的温度超前无显著改变。因此，导致控温热电偶与载荷出现温差的因素主要是几何尺寸和热扩散率。

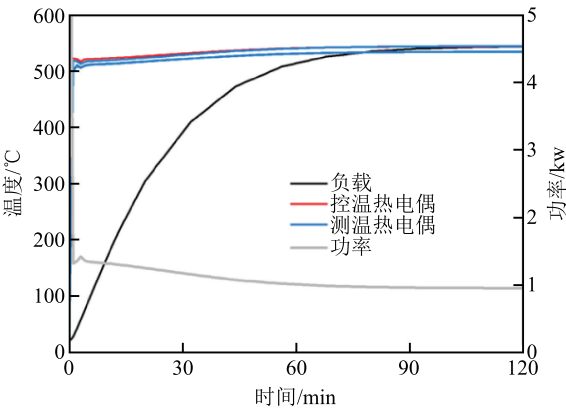


图 2 真空炉温升特性

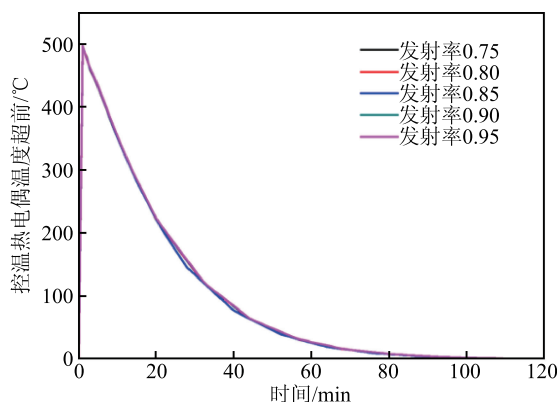


图3 控温热电偶较载荷温度超前

2.2 测温热电偶发射率对温度均匀性测量的影响

利用控温热电偶和测温热电偶之间的最大和最小温差评价真空炉温度均匀性。定义温度上偏差为9个测温热电偶中最高温度 $t_{m\max}$ 与控温热电偶温度 t_c 的差,即

$$\Delta t_{\max} = t_{m\max} - t_c \quad (6)$$

定义温度下偏差为9个测温热电偶中最低温度 $t_{m\min}$ 与控温热电偶温度 t_c 的差,即

$$\Delta t_{\min} = t_{m\min} - t_c \quad (7)$$

测温热电偶发射率对加热过程中温度上偏差和温度下偏差的影响分别如图4和图5所示(控温热电偶发

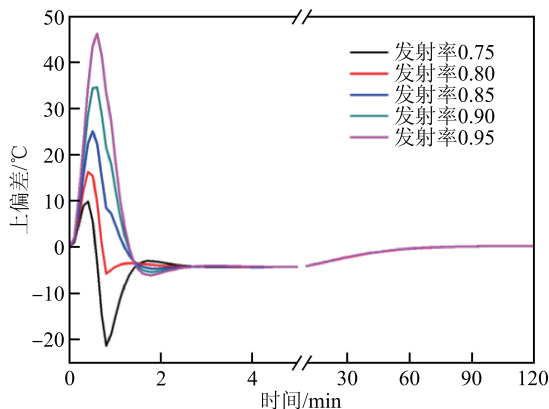


图4 发射率对温度上偏差的影响

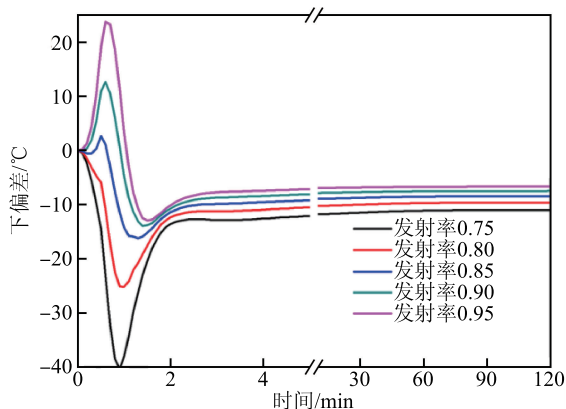


图5 发射率对温度下偏差的影响

射率为0.8), 可以看出发射率对热电偶升温阶段温度偏差的影响大于温度稳定阶段对温度偏差的影响。在升温阶段, 当测温热电偶发射率由0.75增加至0.95时, 温度上偏差峰值由 -21.3°C 增至 46.3°C , 温度下偏差峰值由 -40.3°C 增至 23.7°C , 测温热电偶间最大温差在 21.4°C 至 24.5°C 之间变化。温度最终达到稳定时的情况如图6所示, 中心点测温热电偶(5号)与控温热电偶在空间位置上最为接近, 温差最小; 外侧8个测温热电偶之间温差较小, 与中心点测温热电偶和控温热电偶之间温差较大。稳态时, 随着测温热电偶发射率上升, 控温热电偶和中心点测温热电偶温度几乎不变, 温度上偏差几乎不变, 约为 0.3°C ; 外侧热电偶温度上升, 温度下偏差由 -11.0°C 缩小至 -6.7°C 。

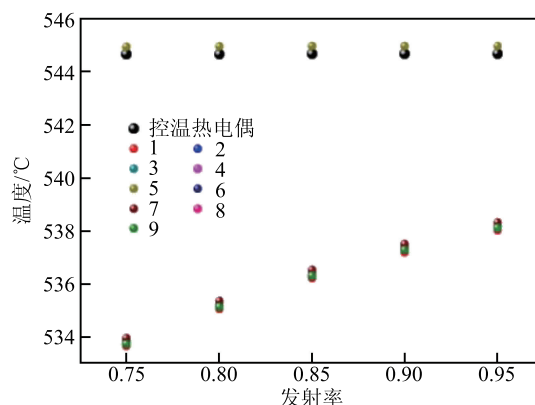


图6 测温热电偶发射率对最终时刻热电偶温度的影响

2.3 测温热电偶直径对温度均匀性测量的影响

测温热电偶直径对温度上偏差和温度下偏差的影响分别如图7和图8所示(热电偶发射率均为0.8)。当测温热电偶直径由1.6 mm增加至2.4 mm, 升温段温度上偏差峰值由 19.6°C 下降至 14.0°C , 下偏差峰值由 -20.7°C 负向增至 -29.3°C , 测温热电偶间最大温差由 21.4°C 增至 25.7°C 。在整个加热阶段, 各工况上、下偏差曲线不重合。温度最终稳定时(如图9所示), 随

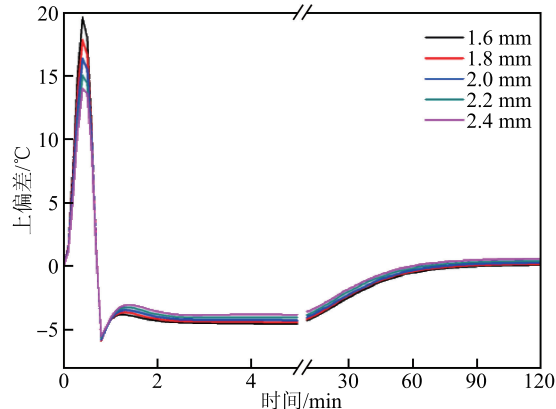


图7 测温热电偶直径对温度上偏差的影响

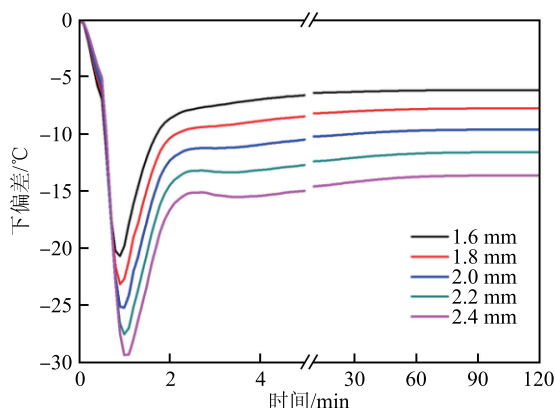


图8 测温热电偶直径对温度下偏差的影响

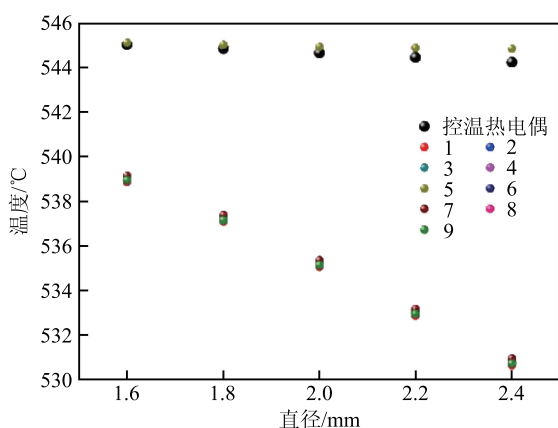


图9 测温热电偶直径对最终时刻热电偶温度的影响

随着热电偶直径增加,所有热电偶稳态温度均下降,其中控温热电偶温度相对中心点热电偶温度下降稍快,上偏差由 0.1°C 增至 0.6°C ,下偏差由 -6.2°C 扩大至 -13.6°C 。

综上所述,测温热电偶发射率 $0.75 \sim 0.95$,直径 $1.6 \sim 2.4 \text{ mm}$ 范围内,两因素对热电偶升温段和稳态温度影响量级相当。

2.4 分析与讨论

为解释产生直径和发射率对热电偶温度影响量级相当,直径与热电偶稳态温度负相关现象的原因,采用热电偶零维模型分析辐射加热过程中热电偶的能量守恒。

将热电偶简化为圆柱状结构,直径为 d ,加热壁内长度为 l ,加热壁外长度为 δ 。热电偶、载荷表面和加热壁表面导热足够快,热电偶内部温度、载荷表面和加热壁表面温度均匀,分别为 T , T_e 和 T_w 。载荷和热电偶表面平整,不存在自身表面投射到自身表面的辐射。

热电偶中的传热过程包括收到的辐射传热和沿热电偶向外界的导热。热电偶收到的投射热辐射主要为

加热壁和载荷的灰体辐射

$$q_m = \varepsilon_m (G_m - \sigma T^4) \approx \varepsilon_m \sigma (T_a^4 - T^4) \quad (8)$$

式中: T_a 为对热电偶表面与加热壁和载荷辐射力相当的黑体辐射温度; G_m 为热电偶表面收到的投射辐射力; ε_m 为热电偶表面发射率。

热传导的热流密度近似为

$$q_c \approx \frac{\lambda}{\delta} (T - T_0) \quad (9)$$

导热传热面积为热电偶的截面积,辐射换热面积为热电偶的侧面积,高温段体积只计炉内部分,根据能量守恒定律,热电偶温度的控制方程为

$$\frac{1}{4} \pi d^2 l \rho c_p \frac{dT}{dt} \approx q_m \pi d l - q_c \frac{1}{4} \pi d^2 \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)和(9),化简得热电偶升温率为

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} \approx \frac{4\varepsilon_m}{d} \sigma (T_a^4 - T^4) - \frac{\lambda}{\delta l} (T - T_0) \quad (11)$$

式(11)中, $4\varepsilon_m \sigma (T_a^4 - T^4)/d$ 为辐射传热的能量输入, $\lambda(T - T_0)/\delta l$ 为导热的能量耗散。辐射热流作用在热电偶表面,而热电偶的能量与体积成正比,随着热电偶直径增加,热电偶收到的辐射总能量随半径一次方增加,但热电偶体积按半径平方增加;导热沿热电偶向外,与热电偶长度有关,与直径无关。因此,热电偶直径增加,稳态温度下降。

发射率和直径对热电偶温度的影响可通过求温度对两者的偏导得到。对于升温段,传导散热很少,可忽略不计。因此可将热电偶的温度方程先简化为

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} \approx \frac{4\varepsilon_m}{d} \sigma (T_a^4 - T^4) \quad (12)$$

温度初始值为室温 T_0 ,则该方程的解为

$$\left(\arctan \frac{T}{T_a} - \arctan \frac{T_0}{T_a} \right) + \ln \sqrt{\frac{T_a + T}{T_a - T} \cdot \frac{T_a - T_0}{T_a + T_0}} = \frac{\sigma}{\rho c_p} \cdot \frac{4\varepsilon_m}{d} \cdot 2T_a^3 t \quad (13)$$

式(13)对发射率和直径的偏导数之比为

$$\frac{\partial T}{\partial \varepsilon_m} / \frac{\partial T}{\partial d} = - \frac{d}{\varepsilon_m} \quad (14)$$

因此,升温阶段,热电偶温度对发射率和直径相对变化率的敏感性相当,即

$$\frac{\partial T}{\partial \ln \varepsilon_m} = - \frac{\partial T}{\partial \ln d} \quad (15)$$

模拟结果表明,测温热电偶发射率由 0.75 增至 0.95 ,相对 0.8 变化了 25% ,升温段测温热电偶间最大温差改变为 3.1°C ;直径由 1.6 mm 增至 2.4 mm ,

相对 2.0 mm 变化了 40%，升温段测温热电偶间最大温差改变为 4.3℃。两因素产生的热电偶温度变化量级相当，与分析一致。

温度最终达到稳定时情况类似。稳态时，辐射吸热和热电偶与外界的导热平衡，温度变化率为零，根据式(11)，热电偶的稳态温度满足以下方程。

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} \approx \frac{4\varepsilon_m}{d} \sigma (T_a^4 - T^4) - \frac{\lambda}{\delta l} (T - T_0) = 0 \quad (16)$$

对式(16)求发射率和直径的偏导数，再做整理得

$$\left(\frac{\lambda}{\delta l} + \frac{4\varepsilon_m}{d} 4\sigma T^3 \right) \frac{\partial T}{\partial \varepsilon_m} = \frac{4}{d} \sigma (T_a^4 - T^4) \quad (17)$$

$$\left(\frac{\lambda}{\delta l} + \frac{4\varepsilon_m}{d} 4\sigma T^3 \right) \frac{\partial T}{\partial d} = -\frac{4\varepsilon_m}{d^2} \sigma (T_a^4 - T^4) \quad (18)$$

两式相除可得

$$\varepsilon_m \frac{\partial T}{\partial \varepsilon_m} = -d \frac{\partial T}{\partial d} \quad (19)$$

温度达到稳定时，如果发射率和直径的相对变化率相当，则稳态温度对两者的敏感性相同。测温热电偶发射率相对变化 25%，稳定时测温热电偶间最大温差下降 4.3℃；直径相对变化 40%，稳定时测温热电偶间最大温差增加 7.9℃。模拟与理论分析结果一致。

3 结论

利用数值模拟方法分析了热电偶发射率和直径对真空炉温度均匀性检测的影响，计算结果表明，升温段测温热电偶和控温热电偶之间的温差较温度稳定时高一个数量级。测温热电偶直径 1.6~2.4 mm，发射率在 0.75~0.95 之间，升温段和温度稳定时，测温热电偶直径变化和发射率变化对测温产生的影响相当。发射率相对 0.8 增加 25%，升温段测温热电偶间最大温差改变为 3.1℃，稳定时测温热电偶间最大温差下降 4.3℃。直径相对 2.0 mm 变化 40%，升温段测温热电偶间最大温差增加 4.3℃，稳定时测温热电偶间最大温差增加 7.9℃。对热电偶传热的零维模型分析进一步表明：升温阶段和稳定情况下，热电偶温度对发射

率相对变化率的敏感性与对直径相对变化率的敏感性相同。本文的研究为真空炉温度计量提供了理论指导，未来将进一步开展特殊型号真空炉温度计量实验研究。

参考文献

- [1] 许艺峰, 张德禹, 徐学军, 等. 液体火箭发动机推力室钎焊过程热固耦合分析[J]. 焊接学报, 2010, 32(10): 93-96.
- [2] 王魁汉. 特殊条件下的温度测量技术[J]. 工业加热, 2007, 36(6): 48-50.
- [3] 程建平, 张红梅. 高温真空钎焊设备的研制[J]. 电子工艺技术, 2010, 31(1): 48-50.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 9452-2012 热处理炉有效加热区测定方法[S]. 2012.
- [5] 国家市场监督管理总局. JJF 1101-2019 环境试验设备温度、湿度参数校准规范[S]. 2019.
- [6] 王魁汉. 真空炉专用热电偶(上)[J]. 机械工人(热加工), 2007(3): 40-42, 45.
- [7] 王魁汉, 吴向中, 董健. 粉末冶金真空炉专用新型热电偶与在线原位校准[J]. 粉末冶金技术, 2015, 33(2): 140-146, 155.
- [8] 廖正贵, 王宏杰. 热电偶对符合 AMS2750 标准 TUS 测量影响[J]. 物流工程与管理, 2014, 36(6): 156-157, 166.
- [9] 王跃飞, 陈焰, 雷金辉, 等. 内热式多级连续真空炉炉温均匀性的测定及改善[J]. 真空电子技术, 2014(5): 87-91.
- [10] 王成君, 杨兆建. 基于 AMS2750E 标准的低温真空焊接设备温度均匀性的实现[J]. 电子工业专用设备, 2015(10): 42-45, 65.
- [11] 钟茅, 邹吾松. 真空铝钎焊过程温度场的有限元数值仿真[J]. 航空精密制造技术, 2008, 44(6): 38-41.
- [12] 周厚军, 陈秀敏, 杨斌, 等. 氧化铝真空碳热还原炉瞬态温度场模拟计算[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(10): 896-901.
- [13] 刘静, 李家栋, 王昊杰, 等. 真空渗碳炉加热系统结构优化数值模拟研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 641-646.
- [14] 赵雨涛, 康慧, 曲平. 真空钎焊炉加热体的数值模拟[J]. 工业加热, 2008, 37(1): 33-37.

收稿日期: 2021-02-25; 修回日期: 2021-05-11

引用格式: 刘明君, 赵学师. 真空炉温度均匀性测量的数值模拟研究[J]. 计测技术, 2021, 41(3): 20-24.