# 加热体截面形状对真空烧结炉温度场的影响

王寒寒 景来兴 李建昌<sup>\*</sup> (东北大学 机械工程与自动化学院 真空流体工程研究中心 沈阳 110819)

# Effect of Cross-Section Shape of Heating Elements on Temperature Field for Vacuum Sintering Furnace

WANG Hanhan, JING Laixing, LI Jianchang\*

(Vacuum and Fluid Engineering Research Center, School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract** As the core component of a vacuum sintering furnace, the geometric cross-section shape of heating elements directly affects the furnace temperature distribution, while temperature uniformity is a crucial index for evaluating the furnace's performance. This paper investigates the influence of twelve types of heating elements, including circular ring, circular, diamond, square, semicircular, rectangular, and different combinations of these shapes, on the temperature distribution using the finite element method. Combined with the geometric relationship between the heating body and the micro-element surface of the workpieces, a heat transfer model is established to study the radiation characteristics of the elements with different cross-section shapes. The results show that, under no-load conditions, the size of the temperature uniformity zone is the largest in the furnace with rectangular/circular combined cross-section elements, whereas the furnace with rectangular-section ones exhibits the smallest, with a difference of 16%. Compared with the circular combined-shaped furnace, the maximum temperature difference of the workpieces in the diamond-shaped one is reduced by 30.18°C, while the furnace temperature uniformity is increased by 23%. Our work may provide a theoretical basis and technical reference for optimizing the heater design of a vacuum sintering furnace.

**Keywords** Vacuum sintering furnace, Cross-section shape of heating elements, Finite element simulation, Furnace temperature uniformity, Temperature uniformity zone

摘要 加热体是真空烧结炉的核心部件,其几何截面形状直接影响真空烧结炉内温度分布,而炉温均匀性是衡量烧结炉 性能的关键指标。文章用有限元方法研究了圆形、圆环形、菱形、正方形、半圆形、矩形及其不同组合截面等 12 种加热体形 状对真空烧结炉温度分布规律的影响。通过加热体与工件微元面间的几何关系构建烧结炉内传热模型,研究了不同截面形 状加热体的辐射特性。结果表明空载条件下,矩形和圆形组合的截面形状加热体烧结炉内均温区面积最大,而矩形加热体炉 内均温区面积最小,二者相比相差 16%。而负载状态下,菱形截面加热体烧结炉相较于菱形和圆形组合截面烧结炉内工件最 大温差降低了 30.18℃,炉温均匀性提高了 23%。研究可为真空烧结炉加热体结构设计与优化提供理论参考。

关键词 真空烧结炉 加热体截面形状 有限元仿真 炉温均匀性 均温区面积

中图分类号: TK175 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202412002

真空烧结炉广泛应用于热处理、钎焊和冶金等 领域,是生产碳化硅(SiC)陶瓷等高性能复合材料的 高温加工装备<sup>[1-3]</sup>,温度均匀性是衡量其加热性能的 关键指标<sup>[4-8]</sup>。加热体作为核心部件,其结构、布局 和材料直接影响炉内温度场<sup>[9-12]</sup>。例如,刘静等<sup>[13]</sup> 用 COMSOL 研究了石墨加热管的数量、长度和直

\*联系人: E-mail: jcli@mail.neu.edu.cn

收稿日期:2024-12-09

基金项目:山东省科技厅重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2023CXGC010208)

径等参数对真空渗碳炉温度场的影响,发现通过优 化这些参数可使炉内最大温差降低 11%, 显著提升 了炉温均匀性。熊梨等<sup>[14]</sup>模拟了负载下真空烧结 炉的加热管直径、加热管与有效加热区间距等结构 布局参数对炉温均匀性的影响,研究表明加热管直 径是影响炉温均匀性的关键参数,而加热管与有效 加热区的间距影响相对较小。杨松等[15]有限元模 拟了钼带加热体宽度对钕铁硼真空烧结炉温度场 的影响,发现加热体宽度增加工件最大温差增大, 炉温均匀性降低。解永强<sup>16</sup>探究了真空炉加热元 件材料和空间布局,认为在炉体轴向布置三组(每组 沿轴向4圈)的钼带加热元件,有效工作区温度均匀 性 $\leq$ 5℃。Sany X Y 等<sup>[17]</sup>分析了加热室隔热板与加 热 anv 棒的间距及加热区截面尺寸等参数对真空炉 温度均匀性的影响,通过优化这些参数使炉内温度 均匀性提高了 92%, 达到标准等级 3℃。张啸鹏<sup>[18]</sup> 研究了加热体结构对真空烧结氮化硅工件质量的 影响,发现烧结炉内加热体结构前后2组,左右3组 相较于初始结构(前后2组,左右4组),工件温度均 匀性提高了 7.6%。然而, 文献关于加热体截面形状 对烧结炉温度场影响的报道较少。本文基于 ANSYS 构建了烧结炉瞬态温度场数值模型,研究了加热体 几何截面形状对炉温均匀性的影响,探究了最优加 热体截面形状,为烧结炉温度场的优化提供参考。

# 1 真空烧结炉仿真建模

## 1.1 模型假设

本文中对烧结炉进行结构简化和假设如下:(1) 所有材料均匀且各向同性<sup>[19]</sup>;(2)烧结过程只考虑热 辐射,忽略热传导和热对流<sup>[20-21]</sup>;(3)不考虑 SiC 工 件相变对烧结过程中温度场的影响<sup>[22]</sup>;(4)简化烧结 炉壳体水冷系统为恒定温度壁面。

#### 1.2 几何模型及网格划分

如图 1(a)所示,以 ZSD-9-13600W 超大型自动 化反应烧结真空炉为参考建模,烧结炉保温层由石 墨板、毯毡和钢板复合而成,采用均匀分布的石墨 管作为加热体,因整个加热系统呈轴对称分布,为减 少计算量选择炉体中心横截面的 1/2 构建二维温度 场模型。采用自动网格划分,网格总计 32979 个,节 点总计 33271 个,平均网格质量为 0.943 (见图 1(b))。 如图 2 所示,基于前人对加热体结构的研究<sup>[23-26]</sup>,本 文探究了截面积为定值具有不同截面形状包括圆 环形、圆形、方形、菱形、矩形及其组合截面等 12 种加热体。



图1 真空烧结炉模型图及网格。(a)烧结炉中心横截面 1/2 模型,(b)网格划分

Fig. 1 Model and mesh of the vacuum sintering furnace. (a) 1/2 model of the center cross-section for sintering furnace, (b) mesh division

## 1.3 边界条件

在模拟中,各材料物性参数如表1所示<sup>[27-29]</sup>。 边界条件设置如下:(1)石墨加热体设为体热源,按



- 图2 加热体几何截面形状。(a)圆环形,(b)圆形,(c)菱形,(d)正方形,(e)半圆形,(f)矩形,(g)组合截面一,(h)组合截面二,(i)组合截面三,(j)组合截面四,(k)组合截面五,(1)组合截面六
- Fig. 2 Geometric section of the heaters. (a) Circular ring, (b) circular, (c) diamond, (d) square, (e) semi-circular, (f) rectangle, (g) combined section I , (h) combined section II , (i) combined section II , (j) combined section IV, (k) combined section V and (l) combined section V, respectively

定功率 2000000 W/m<sup>3</sup> 加热 3 h, 步长设为 360 步, 每 步 30 s; (2)将水冷系统简化为恒温壁面 25℃; (3)计 算域初始温度设为 25℃。

表 1 不同材料的物理性能参数 Tab. 1 Thermal physical parameters of different materials

材料	密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	比热容 /(I·kg <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup> )	导热系数 /(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	动力黏度 /(kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )
	/(kg iii )	/(J Kg K )	/(w iii K )	/(kg III 3 )
<b></b>	2160	710	94.21	-
毯毡	260	800	0.30	-
氮气	1.14	1040.67	$2.42 \times 10^{-2}$	1.66×10 <sup>-5</sup>
SiC 工件	3211	692	40	-

# 2 仿真结果分析

# 2.1 空载炉内温度均匀性

在空载状态下按恒定功率进行加热仿真。 图 3(a)所示为加热结束时圆环形加热体烧结炉内的温度云图,以炉体中心点温度 1350.75 K 为基准, 在±5 K 范围内绘出 1355.75 K 的等温线,计算出该 均温区面积为 4863.75 cm<sup>2</sup>。其余 11 组不同加热体 仿真模型的均温区面积测算结果如图 3(b),发现组 合截面一均温区面积最大(4997.58 cm<sup>2</sup>),矩形截面 均温区面积最小为 4189.02 cm<sup>2</sup>,均温区面积提高了 约 16%。组合截面一、二、三及圆形截面加热体辐 射均匀性较好,均温区面积相对较大;而方形、矩形 和菱形截面加热体辐射均匀性较差,均温区面积较 小。整体而言,组合截面加热体烧结炉内均温区面积 较大,而单一截面加热体均温区面积略小(见图 3(b) 插图)。如后详述,不同加热体截面形状会改变热 辐射的方向性和强度分布,进而导致均温区的差异。

#### 2.2 负载炉内温度均匀性

如图 4(a)所示,在空载模拟基础上选取有较大 均温区面积的圆环形截面加热体,在烧结炉内引入 5 组共 25 个 \u03c60 mm×\u03c640 mm 的 SiC 工件, 获得炉 内工件温度分布云图。结果表明,中心处工件温度 较低,越靠近加热体的工件温度越高。为了探究加 热体截面形状对炉温均匀性的影响,采用相同方法对 组合截面一、二、三及圆形、菱形加热体进行模拟, 图 4(b)结果表明菱形加热体炉内 SiC 工件最大温 差为 102.95℃, 而组合截面二为 133.13℃, 炉温均匀 性提高了约23%。可见菱形截面加热体烧结炉内 热量分布更均匀,降低了中心工件与顶角工件之间 的温差,有效提升了炉温均匀性;而组合截面二最 大温差较大(133.13℃), 热量分布不均, 导致中心与 顶角工件间的温差增大,炉温均匀性较低。可见, 加热体截面形状影响其辐射特性,进而导致工件间 最大温差的不同。

#### 3 加热体截面形状对烧结炉传热的影响

如图 5(a)所示,对圆形加热体的几何截面形状 进行了简化建模,引入动轴ρ,水平轴 OX 与ρ之间 的夹角定义为变量θ,通过动轴ρ端点随θ变化的 运动轨迹表示加热体几何截面形状(此方法亦适于 其他几何截面形状的表示)。图 5(b)为真空烧结炉 加热体与工件间的微元几何关系,其中:





Fig. 3 Effect of cross-section shape of heating elements on temperature uniformity. (a) Temperature distribution cloud of the sintering furnace with circular heater, (b) effect of cross-section shape of heaters on the uniformity of the temperature field, the insert shows the influence of the single and combined heaters on temperature uniformity



图4 加热体截面形状对工件温度的影响。(a)圆环形加热体烧结炉内工件温度云图,(b)工件最大温差变化曲线

Fig. 4 Effect of heater section shapes on the workpiece temperature. (a) Temperature cloud of the sintering furnace with circular heaters, (b) the maximum temperature difference curve of the workpieces



图5 真空烧结炉传热模型。(a)圆形截面加热体几何关系图, (b)加热体微元面辐射传热图

Fig. 5 Heat transfer model of vacuum sintering furnace. (a) Geometric diagram of circular section heater, (b) radiative heat transfer diagram for the microplane of heaters

$$\cos\beta_1 = \frac{d - \rho \cos\theta}{L} \tag{1}$$

$$\cos\beta_2 = \frac{\rho\sin\theta}{L} \tag{2}$$

$$L^{2} = (d - x)^{2} + y^{2}$$
 (3)

$$d\Phi_{1,2} = \sigma T^4 \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{\pi L^2} dA_1 dA_2 \qquad (4)$$

将式(1)、(2)与(3)代入(4)得到烧结炉加热体 与工件微元面之间辐射传热公式:

$$d\Phi_{1,2} = \frac{\sigma T^4}{\pi} \frac{(d - \rho \cos \theta)\rho \sin \theta}{\left(\rho^2 + d^2 - 2d\rho \cos \theta\right)^2} dA_1 dA_2 \qquad (5)$$

式中:  $d\Phi_{1,2}$  为微元面  $dA_1$  辐射到另一个微元面  $dA_2$  的 能量;  $\sigma$ 为黑体辐射常量,  $\sigma_b=5.67 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>); T 为微元面  $dA_1$  的温度;  $\beta_1$  为  $dA_1$  面法线与  $dA_1$  到  $dA_2$ 的视线之间的夹角; L 为  $dA_1$  到  $dA_2$  的距离;  $\beta_2$  为  $dA_1$  面法线与  $dA_1$  到  $dA_2$  的视线之间的夹角; d为 烧结炉中心工件到加热体中心的距离, 为定值 570 mm。 为探究加热体截面形状对烧结炉辐射传热的 影响,如图 6 所示通过 MATLAB 分别计算了组合 截面一、二、圆形、菱形和方形截面形状加热体与 工件微元面之间的辐射传热。发现随时间增加,加 热体微元面辐射量均呈现上升趋势,但辐射量增长 的速度存在显著差异。其中,组合截面一、二和圆 形截面加热体辐射量增长最快,菱形截面的辐射量 增长速度居中,而方形截面的增长最慢。上述差异 主要归因于组合截面的复杂结构增加了辐射面积 并提供了有效的辐射路径,而圆形截面的对称性也 有助于提高辐射传热。相比之下,菱形和方形截面 的加热体由于几何形状较为简单,辐射面积和路径 不如其他形状有效,导致辐射传热量较弱。



图6 不同加热体截面形状对烧结炉辐射传热的影响对比曲线

Fig. 6 The comparative curves of radiation heat transfer for sintering furnace heaters with different section shapes

#### 4 结论

烧结炉内均温区面积及工件温差的影响,结果表明: (1)空载条件下,组合截面一、二、三及圆形截面加 热体辐射均匀性较高,均温区面积相对较大;而方 形、矩形和菱形截面加热体辐射均匀性较差,均温 区面积较小。组合截面一烧结炉内均温区面积最 大,而矩形截面最小,两者相差16%。(2)负载工况 下,菱形截面加热体炉内工件最大温差降低了30.18℃, 相对于组合截面二其炉温均匀性提高了23%。(3)加 热体几何截面形状对辐射传热有显著影响,其中组 合截面一、二及圆形截面因其独特的几何结构和对 称性,表现出更优的辐射传热性能;而菱形和方形 截面的辐射传热性能较弱。

#### 参考文献

- [1] Cheng J P, Zhang H M. Development of high-temperature vacuum brazing equipment[J]. Electronics Process Technology, 2010, 31(1): 48-50 (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 (in Chinese))
- [2] Pritchard J. Hot-zone design for vacuum furnaces[J]. Industrial Heating, 2007, 74(9): 95–99
- [3] Peng P. Design of large aluminum vacuum brazing furnace-major specifications and heating control program[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2004(6): 75-80 (彭平. 大型真空铝钎焊装备-主要技术 参数及热工程序设计与控制 [J]. 真空科学与技术学报, 2004(6): 75-80 (in Chinese))
- [4] Zhou H J, Chen X M, Yang B, et al. Simulation of transient temperature field in vacuum alumina carbothermic reduction[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(10): 896–901 (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 (in Chinese))
- [5] Liu M J, Zhao X S. Numerical simulation of measurement of temperature uniformity in vacuum furnace[J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(3): 20-24 (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 (in Chinese))
- [6] Hao X W, Gu J F, Chen N, et al. 3-D numerical analysis on heating process of loads within vacuum heat treatment furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(14-15): 1925–1931
- [7] Wang H J. Study on high temperature vacuum furnace temperature uniformity test in AMS2750 standard based

on[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2015, 44(5): 37-41 (王宏杰. 基于 AMS2750 标准中高 温真空炉温均匀性测试的研究 [J]. 电子工业专用设备, 2015, 44(5): 37-41 (in Chinese))

- [8] Yi G. Homogeneity of temperature in vacuum heat treatment equipment[J]. Journal of Materials Engineering, 1997(4): 14-17(易光. 真空处理炉炉温均匀性探讨[J]. 材料工程, 1997(4): 14-17(in Chinese))
- [9] Chen Z W, Gao G W, Yu D J, et al. Resistivity measurement of irregularly-shaped graphite heater: A Simulation and Experimental Study[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2018, 38(9): 810–816 (空陈正 伟, 高光伟, 于德军, 等. 基于有限元仿真分析的常用石 墨材料电阻率测量方法及设备设计 [J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(9): 810–816 (in Chinese))
- [10] Shi F, Chen J, Cheng H C, et al. Numerical simulation of temperature field distribution on sapphire substrate in GaN growth reactor[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(6): 723-726 (石峰, 陈靖, 程宏昌, 等. 真空系统内一种加热器温度场分布有限元分析 [J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(6): 723-726 (in Chinese))
- [11] Xing L D, Xiao W, Bao Y P, et al. Physical modeling study for process optimization of 300-ton RH vacuum refining furnace[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2024, 10(1): 386–396
- [12] Wang C P. Obtaining high-temperature thermal conductivity of graphite fiber material simulation of temperature field in vacuum sintering furnace[D]. Shandong University, 2020 (王翠平. 石墨纤维材料高温导热系数获取及 真空烧结炉温度场模拟 [D]. 山东大学, 2020 (in Chinese))
- [13] Liu J, Li J D, Wang H J, et al. Numerical simulation to optimize heating system in vacuum carburizing furnace[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2019, 40(5): 641–646 (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 (in Chinese))
- [14] Xiong L, Zhang D C, Song S C, et al. Numerical simulation and system optimization of temperature field in silicon carbide vacuum sintering furnace[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(6): 259–265 (熊梨,张登春,宋石初,等. 碳化硅真空烧结炉温度场数值模拟与系统优化 [J]. 金属热处理, 2022, 47(6): 259–265 (in Chinese))
- [15] Yang S, Zhou L, Liu Y, et al. Simulation analysis of temperature field of sintered NdFeB vacuum sintering fur-

nace based on Fluent[J]. Metallic Functional Materials, 2023, 30(5): 38-42 (杨松, 周磊, 刘洋, 等. 基于 Fluent 烧结钕铁硼真空烧结炉温度场模拟分析 [J]. 金属功能材料, 2023, 30(5): 38-42 (in Chinese))

- [16] Xie Y Q. Vacuum annealing temperature tontrol structure design of furnace and thermal field simulation[D]. Xidian University, 2016 (解永强. 高温真空炉用金属加热元件 的防变形设计 [D]. 西安电子科技大学, 2016 (in Chinese))
- [17] Sany X Y, Yuan Z H, Yu X J, et al. Research on the temperature uniformity of vacuum furnace and size optimization of working zone[J]. International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2016, 789–792
- [18] Zhang X P. Research on thermal field and structural parameters optimization of vacuum sintering furnace based on modeling and simulation[D]. Guangdong University of Technology, 2020 (张啸鹏. 基于建模仿真的真空烧结炉温度场研究与结构参数优化 [D]. 广东工业大学, 2020 (in Chinese))
- [19] Wu B X, Xu M G, Zhang J, et al. Optimized design of vacuum pyrolysis furnace with multiple homogenization temperatures[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2023, 43(9): 754–761 (武炳鑫, 许鸣皋, 张 俊, 等. 真空高温热解炉多均匀化温度优化设计 [J]. 真 空科学与技术学报, 2023, 43(9): 754–761 (in Chinese))
- [20] Wang Y F, Liu Z. Development of numerical modeling and temperature controller optimization for internal heating vacuum furnace[J]. IEEE Access, 2021, 122343– 122352
- [21] Jia J Y, Zhen X L, Chen X T, et al. Imitation analysis of cremation furnace heat transfer under the finite element simulation software[J]. Thermal Science, 2020, 24(5): 3357–3365
- [22] Zhou X Y, Zhao C L, Huang C S, et al. Effect of annealing temperature on properties of shape-memory Ti-51Ni alloy: An Experimental Study[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, 40(1): 74–78 (周晓 燕, 赵乘麟, 黄乘顺, 等. 真空电阻炉退火温度对电子设 备用 Ti-51Ni 记忆合金相变和形状行为的影响 [J]. 真 空科学与技术学报, 2020, 40(1): 74–78 (in Chinese))
- [23] Liu M H. High-temperature electric heating process simu-

lation[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008 (刘 美慧. 高温电加热过程模拟分析 [D]. 青岛: 中国海洋大 学, 2008 (in Chinese))

- [24] Zhang S R. The application research of the graphite heating elements to the vacuum furnace[J]. Industrial Heating, 2012, 41(5): 66-68 (张淑蓉. 石墨加热元件在真空炉中 的应用研究 [J]. 工业加热, 2012, 41(5): 66-68 (in Chinese))
- [25] Mukul P, Salman K, Amaresh D, et al. Critical assessment of numerical algorithms for convective-radiative heat transfer in enclosures with different geometries [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 627–644
- [26] Pei S L, Song B, Lu K, et al. Optimization simulation of temperature field in ALD pressure sintering furnace based on fluent[J]. Cemented Carbides, 2024, 41(3): 229–236 (裴善领, 宋波, 鲁凯, 等. 基于 Fluent 的 ALD 型压力烧 结炉温度场的优化模拟 [J]. 硬质合金, 2024, 41(3): 229–236 (in Chinese))
- [27] Ma X, Du J, Su G, et al. Study on strengthening mechanism and high temperature mechanical properties of TiC-Fe-HEA cemented carbide[J]. Materials Today Communications, 2024, 24(5): 1234–1242
- [28] Yao Q, Zhang L, Chen H, et al. Defect analysis during vacuum sintering of large Nd: YAG laser ceramics by FEM[J]. Journal Of Materials Science-Materials in Electronics, 2021, 32(3): 2925–2935
- [29] Fu Z L, Yu X, Shang H L, et al. A new modelling method for superalloy heating in resistance furnace using FLU-ENT[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 128: 679–687
- [30] Huang L C. Blast furnace distributed temperature modeling method research based on mechanism and data hybrid driven[D]. Zhejiang University, 2013 (黄龙诚. 基于 机理与数据混合驱动的高炉分布式炉温建模方法研究 [D]. 浙江大学, 2013 (in Chinese))
- [31] Peng L T. Soft measurement of temperature in vacuum sintering furnace based on mechanism and data-driven hybrid modeling[D]. Guangdong University of Technology, 2020 (彭刘涛. 基于机理和数据驱动混合建模的真 空烧结炉温度软测量研究 [D]. 广东工业大学, 2020 (in Chinese))