

文章编号: 1674-8190(2024)01-176-06

# 电路参数对石墨加热元件发热特性的影响规律研究

李军鹏, 李世平, 王振亚, 丛琳华, 吴敬涛

(中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 西安 710065)

**摘要:** 电路参数是石墨加热元件发热性能的决定性因素, 对电路参数的影响规律研究是高性能、高可靠性石墨加热器设计的基础。对石墨加热装置的失效过程进行研究, 确定发热元件可靠性量化指标——温度均匀度; 在此基础上, 确定对加热元件热输出性能进行量化的四个电路参数: 加热元件厚度、发热条宽度、发热条缝隙、缝隙处的倒圆半径; 对发热电路进行参数化建模, 并采用有限元电热耦合仿真对加热元件电路参数对加热能力和可靠性的影响机理进行研究。结果表明: 加热元件的厚度决定了其热输出能力, 而其余三个电路参数决定了加热元件的可靠性。本文的研究成果对高性能石墨加热装置的研制具有重要的支撑作用。

**关键词:** 高超声速飞行器; 电路参数化; 石墨加热; 有限元仿真

中图分类号: V216

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.01.21

## Research on influence law of circuit parameters on heating characteristics of graphite heating elements

LI Junpeng, LI Shiping, WANG Zhenya, CONG Linhua, WU Jingtao

(National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Circuit parameters are the decisive factors for the heating performance of graphite heating elements, and the research on the influence of circuit parameters is the basis for the design of high-performance and high-reliability graphite heaters. The failure process of graphite heating device is investigated, and the reliability quantitative indexes of heating element, temperature uniformity are determined. Four circuit parameters to quantify the output performance are advanced, including the thickness, width of the strip, gap between the strips and radius of the gap rounding. The mechanism of influence of circuit parameters on heating capability and reliability is investigated through coupled thermal electric finite element method analysis. The results show that the thickness can determine the heat output capability, while the remaining three circuit parameters can determine the reliability. The advancements in this paper play an important role in the development of high performance graphite heating device.

**Key words:** hypersonic vehicle; circuit parameterization; graphite heating; finite element simulation

收稿日期: 2023-06-04; 修回日期: 2023-12-17

通信作者: 李军鹏(1975-), 男, 博士, 高级工程师。E-mail: skyeaglecn@qq.com

引用格式: 李军鹏, 李世平, 王振亚, 等. 电路参数对石墨加热元件发热特性的影响规律研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(1): 176-181.

LI Junpeng, LI Shiping, WANG Zhenya, et al. Research on influence law of circuit parameters on heating characteristics of graphite heating elements[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(1): 176-181. (in Chinese)

## 0 引言

极端严酷的高温热环境使用条件,使得热防护和热强度问题成为高超声速飞行器研制成败的关键<sup>[1-5]</sup>。高温在显著降低材料强度极限和结构承载能力的同时,还将在结构内部产生额外的热应力和热变形,提高结构内部的应力水平、破坏气动外形,对飞行器的结构安全和效能带来不利影响。为保证安全,对高超声速飞行器材料和结构进行静、动态的气动模拟试验与热强度试验是高超声速飞行器研制中必不可少的环节<sup>[6]</sup>。目前,热试验中广泛采用的石英灯加热器最大热输出能力约为1 200 kW/m<sup>2</sup>,结构最高温度约为1 500 °C<sup>[7-9]</sup>。对于头锥和前缘部位来说,由于所需的热流密度很大,石英灯的热输出能力相对不足。石墨是一种广泛应用于冶金、化工和晶体制造领域的加热元件<sup>[10-12]</sup>,通电后能模拟2 000 °C的高温环境。与石英灯相比,石墨加热器的热输出能力较强。NASA Langley研究中心对一种高电压大电阻的石墨加热器进行了研究<sup>[13]</sup>,虽然这种石墨加热装置具有较高的热输出能力,但由于其采用的石墨丝很细,汇流电路和石墨热变形释放机构比较复杂,加工、制造和安装的难度都较大。

具有较宽s形发热回路的小电阻大电流石墨加热元件目前得到了广泛使用,其加工、制造和安装的技术难度较低,但由于电流趋肤效应的存在导致加热元件内部的电流强度不再是严格的均匀分布,进而对加热元件的热输出特性产生了一定影响。

本文采用基于有限元的电热耦合分析方法,通过对发热电路的参数化建模,研究加热元件发热电路参数对其加热能力的影响,以期为提高石墨加热元件的性能和可靠性奠定基础。

## 1 石墨加热元件电路参数化

由于趋肤效应的存在,电流在s形发热电路的拐弯处,出现了聚集现象<sup>[14-15]</sup>,为了对聚集效应进行研究,在电路参数化时,拐弯处增加了一个半径参数。本文中,具有s形发热回路的参数化石墨发热电路如图1所示,其中 $D_1$ 为发热条的宽度, $D$ 为发热条缝隙宽度, $R_1$ 为缝隙处的倒圆半径, $T$ 为石墨片的厚度。

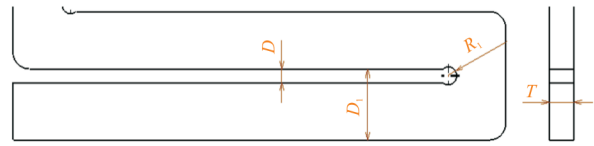


图1 参数化石墨片发热电路

Fig. 1 Parameterized graphite sheet heating circuit

## 2 石墨加热装置的可靠性量化指标

石墨加热装置的失效是指石墨失去部分或者全部热输出能力。根据文献[13]中的试验验证,在大热流输出状态下,石墨加热装置中石墨的温度很高,当温度达到华氏5 300 °F(约2 926.7 °C)时,石墨将开始升华和气化,由此导致发热电路的形态发生改变,热输出能力降低或者丧失。升华后的石墨蒸汽漂浮或附着在发热电路、冷却系统上,均会导致石墨加热装置的失效。对于由单一石墨加热元件构成的石墨加热装置,局部高温导致的石墨升华是致使其失效的主要因素。而对于有多个发热单元的石墨加热装置,极端高温下石墨片的变形量较大,如果相邻发热片的间隙控制不合理,也可能导致严重的短路,进而引发加热装置失效。

石墨发热单元的加热能力受限于到达温度限制区域的面积大小,即当石墨发热片表面温度均匀,同步达到温度限制点时,其热输出能力达到最大。发热电路参数的设计目的是减小石墨片上的冷区和热区面积,使得温度分布尽可能均匀。本文采用温度均匀度系数 $\eta$ 对加热装置的可靠性进行。

$$\eta = \frac{\sum_i^n T_i \Delta V_i}{T_{\max} V} \quad (1)$$

式中: $T_{\max}$ 为石墨发热片的最高温度,当 $T_{\max}$ 超过石墨升华温度时,加热装置可能出现失效; $V$ 为发热元件的体积; $T_i$ 为单元的温度; $\Delta V_i$ 为单元体积。

## 3 发热电路参数对热输出能力的影响机理

为了研究加热元件发热电路参数对加热能力的影响机理,本文采用有限元电热耦合仿真对参数化的石墨片发热过程进行研究,石墨发热片大小约为120 mm×(105±2) mm,有限元模型如图2所示。

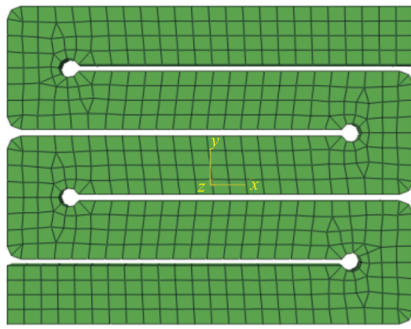


图2 有限元模型  
Fig. 2 Finite element model

电热耦合仿真分析的边界条件为电压边界条件和辐射边界条件,如图3所示。

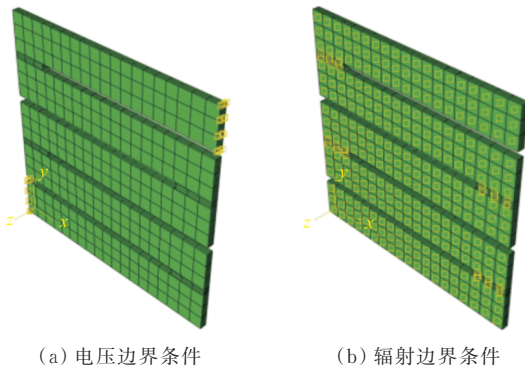


图3 电热耦合仿真的边界条件  
Fig. 3 Boundary conditions of thermal electrical coupling simulation

通过在发热电路的回路两端施加 100 V 电压边界条件,模拟石墨发热片在电压作用下的发热过程;通过在石墨片的上下表面施加辐射边界条件,模拟石墨发热片的加热效应,辐射背景温度为室温 27 °C(300 K)。仿真模型是对石墨加热过程的简化,忽略了对流的影响和真实石墨加热装置中的水冷反射屏、电极等热传导效应的影响。仿真模型采用时长 1 000 s 的瞬态分析,当石墨发热片达到动态热平衡状态时,可以对石墨发热片的极限热输出能力进行预测。

在进行有限元仿真时,石墨的性能参数如表 1 所示。

参数	数值	参数	数值
密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$2.1\times 10^3$	电阻率/( $\Omega\text{m}$ )	$1\times 10^{-5}$
热导率/[ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K}^{-1})$ ]	129	比热/( $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	710

在仿真中,各电路参数的取值如表 2 所示。在表 1 中,当  $D$  的取值为 3 mm 时,  $R_1$  最小值取为 1.5 mm。

表 2 电路参数取值  
Table 2 Circuit parameter values

序号	$T/\text{mm}$	$D_1/\text{mm}$	$D/\text{mm}$	$R_1/\text{mm}$
1	2	14.3	1	1(1.5)
2	4	16.7	2	2
3	6	20.0	3	3

三种发热条宽度的有限元模型如图 4 所示。

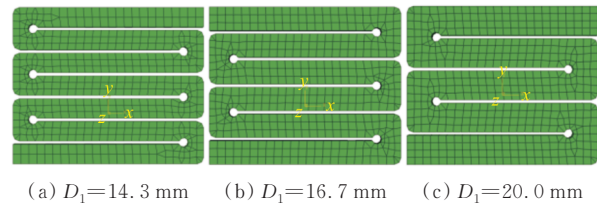
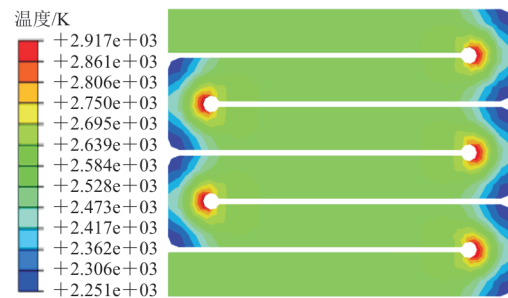


图4 三种有限元模型  
Fig. 4 Three finite element models

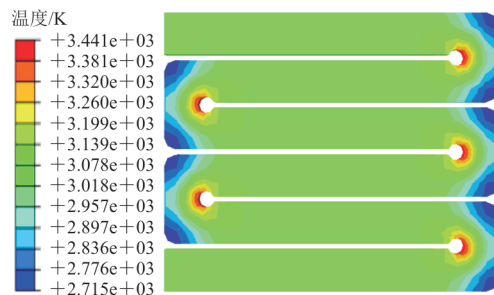
### 3.1 厚度对热输出能力的影响

为了研究厚度的影响,令  $D_1$  为 16.7 mm,  $D$  为 2 mm,  $R_1$  为 3 mm。

三种厚度分别为 2、4、6 mm 下的温度响应如图 5 所示。



(a)  $T=2\text{ mm}$



(b)  $T=4\text{ mm}$

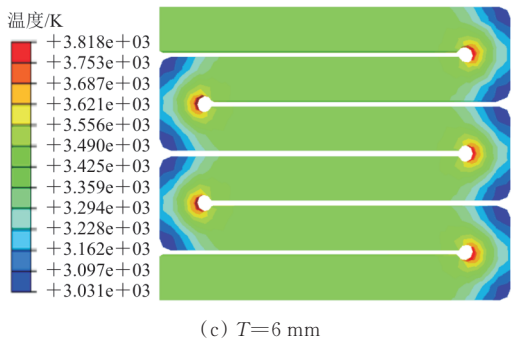


图 5 不同厚度下的温度云图

Fig. 5 Temperature field of different thickness

通过图 5 的云图数据计算得到,  $T=2$  mm 时,  $\eta=0.772$ ;  $T=4$  mm 时,  $\eta=0.789$ ;  $T=6$  mm 时,  $\eta=0.794$ 。随着厚度的增加, 均匀度系数得到了一定程度的改善, 三种厚度下的温度云图形态趋于一致, 其差异主要在于达到热动态平衡状态时石墨发热片表面的温度。如果不考虑石墨升华的限制, 温度越高的发热片热输出能力越强。

与石英灯相比, 石墨加热装置的热惯性较大。三种厚度下的温度—时间曲线如图 6 所示。

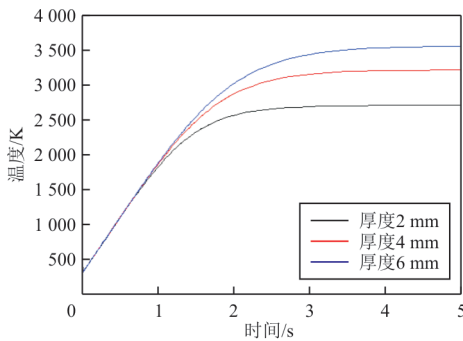


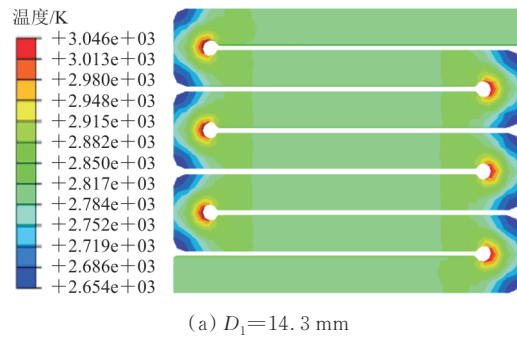
图 6 不同厚度石墨片的升温曲线

Fig. 6 Heating curves of graphite sheet with different thickness

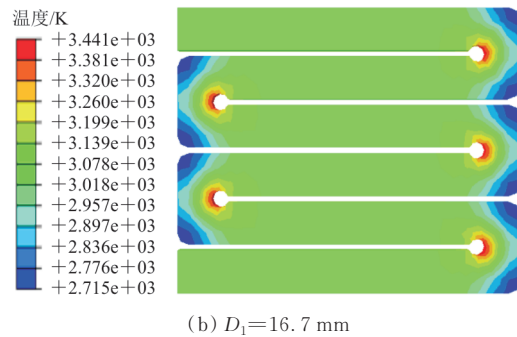
从图 6 可以看出: 三种不同厚度下, 石墨发热片的温升率接近。在实际使用中, 为了防止  $T=6$  mm 的石墨片由于石墨升华导致的失效, 其施加的最大电压会适当调低, 这将导致其升温速度降低, 热惯性的影响加剧。

### 3.2 发热条宽度对热输出能力的影响

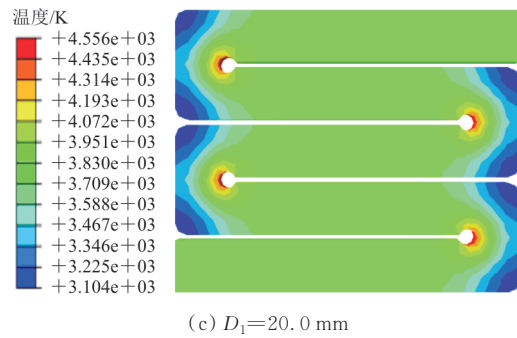
令  $D=2$  mm,  $R_1=3$  mm,  $T=4$  mm, 三种石墨条宽度下达到热动态平衡状态时的温度云图如图 7 所示。



(a)  $D_1=14.3$  mm



(b)  $D_1=16.7$  mm



(c)  $D_1=20.0$  mm

图 7 不同石墨条宽度下的温度云图

Fig. 7 Temperature field of different graphite slice width

通过图 7 的云图数据计算得到,  $T=14.3$  mm 时,  $\eta=0.871$ ;  $T=16.7$  mm 时,  $\eta=0.789$ ;  $T=20$  mm 时,  $\eta=0.681$ 。随着石墨发热条宽度的增加, 均匀度系数明显降低, 且三种厚度下的温度云图形态差距较大, 发热条宽度增加时, 石墨发热片上出现了更大范围的冷区。温度不均匀性的增加将导致石墨片局部出现升华破坏的概率增加。当宽度小于 15 mm 时, 石墨发热片的温度均匀性较好。

### 3.3 倒圆半径对热输出能力的影响

令  $D=2$  mm,  $D_1=16.7$  mm,  $T=4$  mm, 三种倒圆半径下的温度云图如图 8 所示。

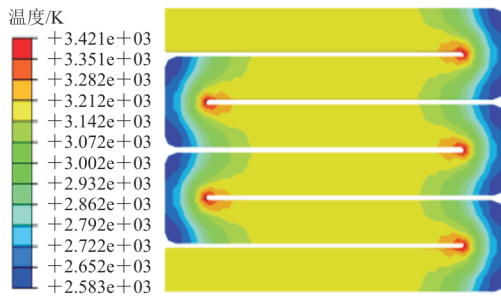
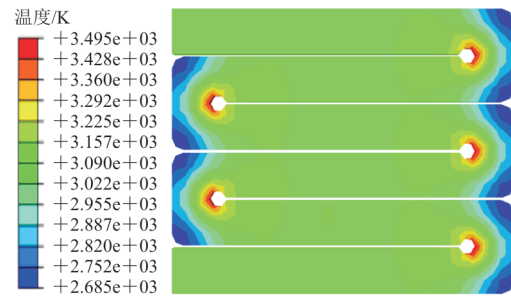
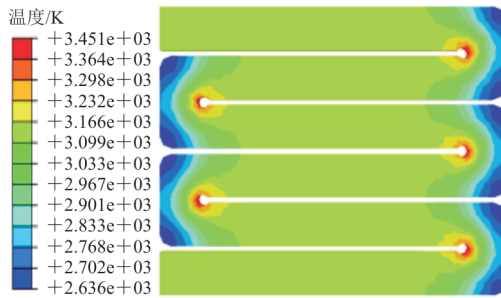
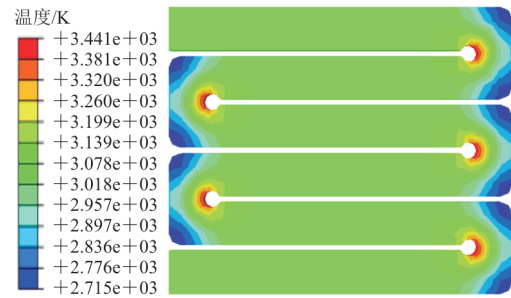
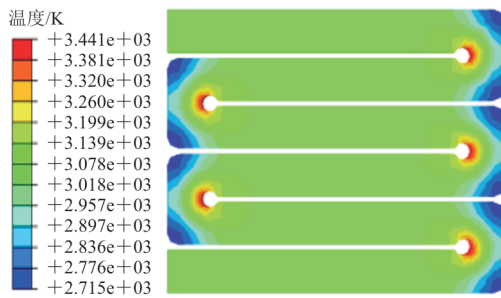
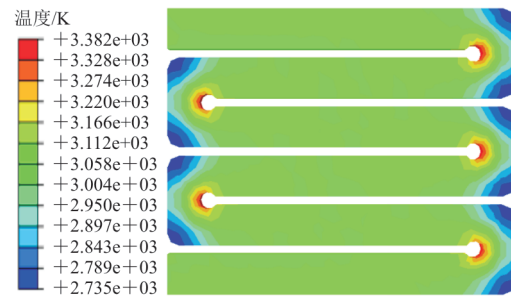
(a)  $R_1=1$  mm(a)  $D=1$  mm(b)  $R_1=2$  mm(b)  $D=2$  mm(c)  $R_1=3$  mm(c)  $D=3$  mm

图 8 不同倒圆半径下的温度云图

Fig. 8 Temperature field of different rounding radius

通过图 8 的云图数据可以计算得到,  $R_1=1$  mm 时,  $\eta=0.755$ ;  $R_1=2$  mm 时,  $\eta=0.768$ ;  $R_1=3$  mm 时,  $\eta=0.789$ 。随着倒圆半径的增加, 均匀度系数明显改善, 三种倒圆半径下的温度云图形态差距较大, 倒圆半径增加时, 石墨发热片上的冷区范围更小, 同时, 冷区的温度得到了提升, 倒圆半径的增加有助于提升石墨发热片的热输出能力, 减小其失效概率。

### 3.4 缝隙宽度对热输出能力的影响

令  $D_1=16.7$  mm,  $T=4$  mm,  $R_1=3$  mm, 三种缝隙宽度的温度云图如图 9 所示。

图 9 不同缝隙宽度下的温度云图

Fig. 9 Temperature fields of different gap width

通过图 9 的云图数据可以计算得到,  $D=1$  mm 时,  $\eta=0.768$ ;  $D=2$  mm 时,  $\eta=0.789$ ;  $D=3$  mm 时,  $\eta=0.809$ 。随着缝隙宽度的增加, 均匀度系数得到了改善, 三种缝隙宽度下温度云图形态差距不大, 缝隙宽度的增加, 冷区的温度得到了提升。

## 4 结 论

1) 加热元件的厚度决定了加热元件的热输出能力, 热输出能力随着厚度的增加而增强。

2) 发热条宽度、发热条缝隙、缝隙处的倒圆半径决定了石墨发热元件的可靠性, 发热条宽度减小、缝隙宽度增加、倒圆半径增大, 可以提高石墨

片表面的温度均匀性,减小由于超温导致的失效概率。

本文的研究成果在高性能石墨加热装置的设计中具有广泛的应用价值。

### 参考文献

- [1] CHEN Fang, LIU Hong, ZHANG Shengtao. Coupled heat transfer and thermo-mechanical behavior of hypersonic cylindrical leading edges[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 122: 846-862.
- [2] GU S, HERBERT O. Capabilities and limitations of existing hypersonic facilities[J]. Progress in Aerospace Science, 2020, 113: 110607.
- [3] 吴大方, 潘兵, 高镇同, 等. 超高温、大热流、非线性气动热环境试验模拟及测试技术研究[J]. 实验力学, 2012, 27(3): 255-271.  
WU Dafang, PAN Bing, GAO Zhentong, et al. On the experimental simulation of ultra-high temperature, high heat flux and nonlinear aerodynamic heating environment and thermo-mechanical testing technique[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(3): 255-271. (in Chinese)
- [4] 段焰辉, 蔡晋生, 汤永光. 高超声速气动及激波位置快速计算方法研究[J]. 航空工程进展, 2013, 4(1): 28-36, 70.  
DUAN Yanhui, CAI Jinsheng, TANG Yongguang. Research on engineering method and shock position prediction for hypersonic aerodynamics[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(1): 28-36, 70. (in Chinese)
- [5] 李锋, 杨武兵, 王强, 等. 高超声速气动试验模拟现状与面临的新挑战[J]. 气体物理, 2016, 1(2): 1-9.  
LI Feng, YANG Wubing, WANG Qiang, et al. Status of ground test for hypersonic aerodynamics and its new challenge[J]. Physics of Gases, 2016, 1(2): 1-9. (in Chinese)
- [6] 叶友达, 张涵信, 蒋勤学, 等. 近空间高超声速飞行器气动特性研究的若干关键问题[J]. 力学学报, 2018, 50(6): 1292-1310.  
YE Youda, ZHANG Hanxin, JIANG Qinxue, et al. Some key problems in the study of aerodynamic characteristics of near-space hypersonic vehicles[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(6): 1292-1310. (in Chinese)
- [7] 任青梅. 热/结构试验技术研究进展[J]. 飞航导弹, 2012, 32(2): 91-96.  
REN Qingmei. Progress in thermal structure test[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2012, 32(2): 91-96. (in Chinese)
- [8] 吴大方, 王岳武, 高镇同, 等. 1 500 °C高温氧化环境下 C/SiC 复合材料结构的热/力联合试验[J]. 复合材料学报, 2015, 32(4): 1083-1091.  
WU Dafang, WANG Yuewu, GAO Zhentong, et al. Thermal-mechanical joint test of C/SiC composite structure in high-temperature/oxidation environment up to 1 500 °C [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(4): 1083-1091. (in Chinese)
- [9] 朱言旦, 刘骁, 曾磊, 等. 大面积气动加热的石英灯阵模拟优化设计[J]. 航空学报, 2017, 38(9): 225-232.  
ZHU Yandan, LIU Xiao, ZENG Lei, et al. Optimization design of aerodynamic heating of large area simulated by quartz lamp array[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(9): 225-232. (in Chinese)
- [10] 王顺英. 石墨加热器在真空铜钎焊炉中的应用及寿命分析[J]. 机械研究及应用, 2012, 25(4): 128-130.  
WANG Shunying. Natural life and analysis of graphite heater in vacuum brazing furnace[J]. Mechanical Research & Application, 2012, 25(4): 128-130. (in Chinese)
- [11] 戴鑫, 杜海文, 张军彦, 等. 多晶硅定向凝固工艺中石墨加热器的影响[J]. 电子工艺技术, 2012, 32(2): 106-109.  
DAI Xin, DU Haiwen, ZHANG Junyan, et al. Effect of graphite heater during directional solidification process for multi-crystalline silicon ingot[J]. Electronics Process Technology, 2012, 32(2): 106-109. (in Chinese)
- [12] 张凯. 石墨加热元件及其加热控制方法研究[D]. 北京: 中国航天科技集团公司, 2017.  
ZHANG Kai. Research on graphite heating element and its heating control methods[D]. Beijing: China Aerospace Science and Technology Corporation, 2017. (in Chinese)
- [13] BRODBECK F W, DURANT D Q, TAYLOR R D. Development of a graphite radiant heater: NASA-N71-21962 [R]. US: NASA, 1970.
- [14] 牟廷绶, 胡晓秋. 趋肤效应实验研究[J]. 大学物理, 1995, 14(11): 489.  
MOU Tingshou, HU Xiaoqi. Experimental study on skin effect[J]. University Physics, 1995, 14(11): 489. (in Chinese)
- [15] 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.  
DU Lin, ZHANG Ke, FENG Hui, et al. Loss analysis of bushing current-carrying structure considering skin effect [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2023, 38(17): 4746-4756. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)