

低导热高抗压石墨陶瓷复合型设计与快速制备

王雪岩¹ 贺俊超² 钟 磊² 钟 强² 吴海华²

(1.中国地质大学公共管理学院; 2.三峡大学机械与动力学院, 石墨增材制造技术与装备湖北省工程研究中心)

摘 要 传统的水玻璃砂型回收利用率低, 储存稳定性较差, 废弃旧砂严重污染环境。结合选择性激光烧结成形技术和浸渍强化技术, 开发了低导热高强度石墨陶瓷复合型, 以期用于替代水玻璃砂型, 减轻环保压力。基于串联导热理论模型进行石墨陶瓷复合型设计, 确定不同功能层厚与导热系数的关系, 重点研究了石墨/酚醛树脂混合粉末组成、硅溶胶浸渍强化工艺对疏松隔热层和浸渍强化层的导热系数、抗压强度的影响, 最后快速制备了导热系数小于 $2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、抗压强度高于 10 MPa 的石墨陶瓷复合型, 并进行了浇注试验, 验证了石墨陶瓷复合型替代水玻璃砂型的可行性。

关键词 石墨陶瓷复合型; 选择性激光烧结; 浸渍强化; 导热系数

中图分类号 TG241; TG244

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.2022.05.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and Rapid Preparation of High Compressive Graphite Ceramic Composite Types with Low Thermal Conductivity

Wang Xueyan¹, He Junchao², Zhong Lei², Zhong Qiang², Wu Haihua²

(1.School of Public Administration, China University of Geosciences; 2.Hubei Engineering Research Centre for Graphite Additive Manufacturing Technology and Equipment, School of Mechanics and Power, Three Gorges University)

Abstract: The traditional water-glass sand type has disadvantages of low recycling rate, poor storage stability and serious environmental pollution. A combination of selective laser sintering and impregnation reinforcement technology was adopted to develop a graphite ceramic composite type with low thermal conductivity and high strength, intending to replace the water-glass sand type and reduce the environmental pressure. The graphite-ceramic composite type was designed based on a theoretical model of tandem thermal conductivity, and the relationship between different functional layer thicknesses and thermal conductivity coefficient were determined. The effects of graphite/phenolic resin hybrid powder composition and silica-sol impregnation reinforcement process were investigated on the thermal conductivity coefficient and compressive strength of the sparse thermal insulation layer and the impregnation reinforced layer. Finally, graphite-ceramic composite types with thermal conductivity coefficient less than $2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ and compressive strength higher than 10 MPa were rapidly prepared, and pouring was conducted, verifying the feasibility of replacing water-glass sand types with graphite-ceramic composite types.

Key Words: Graphite Ceramic Composite, SLS, Impregnation Reinforcement, Thermal Conductivity Coefficient

水玻璃砂型具有低导热、低膨胀、高透气性、耐高温、化学性质稳定等特点, 在铸钢件生产中获得广泛应用。然而, 水玻璃砂型是一种疏松多孔材料, 当残留水分分为 0.5% 时, 其抗压、抗拉强度仅为 0.8 MPa 和 0.01 MPa , 易溃散, 无法重复使用。为了消除污染源、减轻环保压力, 亟需寻找水玻璃砂型代替品^[1~3]。

人工合成石墨铸型具有低的热膨胀系数、良好的化学稳定性、优异的抗热震性及可重复使用等特点, 已在铸钢、铸铁及有色合金生产过程中获得广泛应用, 但其生产周期长、能耗高、成本高, 且导热系数 $[60 \sim 100 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 与水玻璃砂型的导热系数 $[< 2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 不匹配^[4,5]。本课题组前期以天然鳞片石墨/热固性酚

收稿日期: 2022-02-26; 修改稿收到日期: 2022-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575313)

第一作者简介: 王雪岩, 男, 2001 年出生, 本科生, 武汉(430070), E-mail: 1464076786@qq.com

通信作者: 吴海华, 男, 1970 年出生, 教授, 湖北宜昌(445002), E-mail: wuhaihua@ctgu.edu.cn

引用格式: 王雪岩, 贺俊超, 钟磊, 等. 低导热高抗压石墨陶瓷复合型设计与快速制备[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(5): 636-642.

WANG X Y, HE J C, ZHONG L, et al. Design and rapid preparation of high compressive graphite ceramic composite types with low thermal conductivity[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5): 636-642.

醛树脂混合粉末为原材料,利用选择性激光烧结技术(Selective laser sintering,简称 SLS)快速制备了石墨件,其内部疏松多孔,Z 轴方向导热系数为 $0.789 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,是潜在的水玻璃砂型替代品^[6]。然而,其抗压强度仅为 $2 \sim 3 \text{ MPa}$,有待进一步提高。

目前改善 SLS 石墨件的力学性能主要通过添加强化相或后期浸渍强化实现。BOURELL D L 等^[7]在天然鳞片石墨/酚醛树脂混合粉末中添加了直径为 $7 \sim 8 \mu\text{m}$ 、长度为 $70 \sim 150 \mu\text{m}$ 的碳纤维,发现当其添加量达 26% 时,石墨件抗弯强度由 25 MPa 增至 50 MPa 。GUO N 等^[8]研究发现,向天然鳞片石墨/酚醛树脂混合粉末中添加 10% 的短切碳纤维后,SLS 石墨件抗弯强度达到 40 MPa 。上述工作仅涉及复合材料的力学性能,未涉及导热性能,对如何实现低导热、高抗压等多目标协同尚缺乏有效的工艺技术手段。

本课题基于选择性激光烧结成形和浸渍强化技术,快速制造一种“三明治”结构的石墨陶瓷复合型,以替代传统的水玻璃砂型。首先利用导热理论模型对复合型的各层厚及导热系数取值范围进行设计,其次研究 3D 打印混合粉末组成、浸渍强化工艺等对疏松隔热层和浸渍强化层的导热系数和抗压强度的影响,最后快速制备导热系数 $< 2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、抗压强度 $> 10 \text{ MPa}$ 的石墨陶瓷复合型,并进行浇注试验,为其应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用天然鳞片石墨粉末(约 100 目、固定碳 $\geq 95\%$ 、水分 $\leq 0.5\%$),热固性酚醛树脂(PF)(200 目、游离酚 $< 4.5\%$),高纯硅粉(200 目、纯度 $> 99.9\%$),可膨胀石墨粉末(200 目、碳含量 $\geq 90\%$,膨胀倍率为 100),硅溶胶(密度为 $1.20 \text{ g}/\text{cm}^3$,浓度为 24%, SiO_2 粒径为 $8 \sim 15 \text{ nm}$)。

1.2 试样制备

(1)装料 将上述混合粉末分批放入 GQM 型干法球磨机中,机械混合 $3 \sim 4 \text{ h}$ 后,转移至 HK S500 型选择性激光烧结成型机,导入.stl 文件,完成素坯的制备(SLS 工艺参数:填充功率为 18 W ,填充间距为 0.1 mm ,分层厚度为 0.15 mm ,填充速度为 $1800 \text{ mm}/\text{s}$,轮廓功率为 5 W ,轮廓速度为 $900 \text{ mm}/\text{s}$,预热温度为 45°C)。

(2)素坯处理 对 SLS 成形素坯进行二次固化、碳化处理,工艺过程如下:先将素坯放入烘箱中,以 $60^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 180°C 并保温 60 min 后取出;对试样进行低温碳化,将其放入 NT/ZKTH-50-150 型真空碳化

炉,抽真空至 10 Pa 以下,通入高纯氮气,以 $60^\circ\text{C}/\text{h}$ 升温至 300°C ,随后以 $120^\circ\text{C}/\text{h}$ 升温至 800°C ,保温 $0.5 \sim 1 \text{ h}$,待其降到室温后取出,获得石墨/陶瓷复合型的疏松隔热层。

(3)强化处理 对疏松隔热层进行浸渍强化、高温烧结处理,控制浸渍时间和浸渍次数,获得浸渍强化层。选择硅溶胶(密度为 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$, SiO_2 粒径为 $12 \sim 15 \text{ nm}$,浓度为 20%)为浸渍剂,完成空浸、干燥后,转入 NT/ZKTH-50-150 型真空碳化炉,以 $150^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速率升温至 1500°C ,保温 4 h ,随炉冷却至室温,取出。

(4)试样制备 改变 PF 粉末的质量分数(加入量分别为 15%、20%、25%、30%、35%)获得 $A_1 \sim A_5$ 试样;改变高纯硅粉的质量分数(加入量与树脂相同)获得 $B_1 \sim B_5$ 试样;改变可膨胀石墨粉末的质量分数(加入量分别为 0.25%、0.5%、0.75%、1.0%、1.25%)获得 $C_1 \sim C_5$ 试样,试样尺寸为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。

1.3 性能表征

参照 GB/T24529-2009,测试试样密度和开气孔率;采用 WDW-100E 型微控电子万能试验机测定最大抗压载荷,求出抗压强度(试验时,压头以 $5 \text{ mm}/\text{min}$ 均匀且无冲击地施加载荷,每组有效个数为 5 个);采用 DRE-III 型导热系数测量仪测试合金的导热系数;采用 JSM-7500F 型冷场发射扫描电镜观察合金微观组织形貌;采用 Rigaku Ultima IV 型 X 射线衍射仪分析合金物相组成。

2 石墨/陶瓷复合型导热模型

将石墨陶瓷复合型设计成“三明治”结构,即内部为疏松隔热层,表层为浸渍强化层,见图 1。在稳定热传导过程中,若单位时间内通过各层的热流量相等,均为 ϕ ,设定铸型横截面积为 A ,各层厚度依次为 h_1 、 h_2 和 h_3 ,导热系数分别为 λ_2 、 λ_1 、 λ_3 ,不考虑界面热阻,即两接触面温度相同,各表面的温度分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 ,依次降低,石墨陶瓷复合型热流模型见图 2。遵从傅里叶热传导方程,石墨陶瓷复合型传热过程为典型的串联传

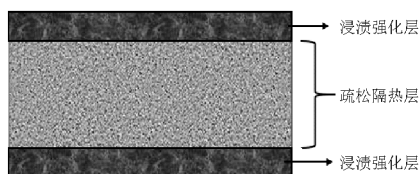


图1 石墨陶瓷复合型“三明治”结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of “sandwich” structure of graphite ceramic composite

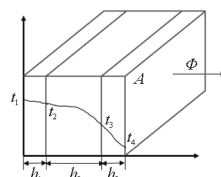


图2 石墨陶瓷复合型热流模型

Fig.2 Heat flow model of graphite ceramic composite

热过程。

$$\Phi = \Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = -\lambda \frac{t_1 - t_4}{h} \cdot A \quad (1)$$

$$\Phi_1 = -\lambda_2 \frac{t_1 - t_2}{h_1} \cdot A \quad (2)$$

$$\Phi_2 = -\lambda_1 \frac{t_2 - t_3}{h_2} \cdot A \quad (3)$$

$$\Phi_3 = -\lambda_3 \frac{t_3 - t_4}{h_3} \cdot A \quad (4)$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_2} \cdot \frac{h_1}{h_1 + h_2 + h_3} + \frac{1}{\lambda_1} \cdot \frac{h_2}{h_1 + h_2 + h_3} + \frac{1}{\lambda_3} \cdot \frac{h_3}{h_1 + h_2 + h_3}} \cdot \frac{t_1 - t_4}{h} \cdot A \quad (5)$$

$$\text{假定 } \omega_1 = \frac{h_2}{h_1 + h_2 + h_3}, \omega_2 = \omega_3 = \frac{h_1}{h_1 + h_2 + h_3} = \frac{h_3}{h_1 + h_2 + h_3} \circ$$

式中, ω_1 为疏松隔热层层厚占比; ω_2 和 ω_3 为浸渍增强层的层厚占比, 且 $\omega_1 + 2\omega_2 = 1$, 求得:

$$\lambda = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\omega_1 \lambda_2 + (1 - \omega_1) \lambda_1} \quad (6)$$

为了替代水玻璃型砂, 石墨陶瓷复合型导热系数 $\lambda \leq 2.0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 代入式(6)进一步求得各层导热系数与层厚关系:

$$(\lambda_1 - 2\omega_1) \lambda_2 \leq 2\omega_2 \lambda_1 \quad (7)$$

且疏松隔热层导热系数必须小于 $2.0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 而浸渍强化层抗压强度应大于 10.0 MPa 。

3 混合粉末组成对抗压强度与导热系数的影响

图 3 为 $A_1 \sim A_5$ 试样素坯外观。可以看出, 除试样 A_1 (未成形) 和 A_5 (误差超 5%) 外, 其余均完整无损, 这是因为提高了 PF 质量分数, 会增加混合粉末的堆积密度和导热系数, 而导热系数越高, 次级烧结热影响区越

大, 因而 SLS 石墨件成形精度变差。建议 PF 的加入量控制在 20%~30%。图 4 为 PF 加入量对 SLS 石墨件的抗压强度和导热系数影响。当 PF 加入量从 20% 提高至 25% 时, 与 A_2 相比, A_3 的抗压强度增幅达到 57.3%, 而导热系数增幅仅为 5.7%; 可以看出, 当 PF 加入量继续增至 30% 时, 与 A_3 相比, A_4 试样的抗压强度增幅仅为 6.7%, 而导热系数的增幅达到 81.0%。这是因为, 随着酚醛树脂加入量增大, 石墨片层之间的连接方式发生了变化, 酚醛树脂被填充到石墨片间孔隙, 在试样内部形成三维连接网络, 既减少了其内部孔隙数量又增加了片间的连接力。当三维连接网络形成后, 继续加大酚醛树脂粉末的加入量, 尽管连接强度仍然有所上升, 但上升幅度并不大。

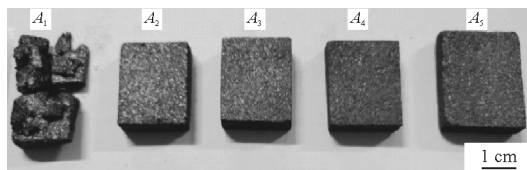


图 3 $A_1 \sim A_5$ 试样素坯外观

Fig.3 Specimens A_1 to A_5 (plain)

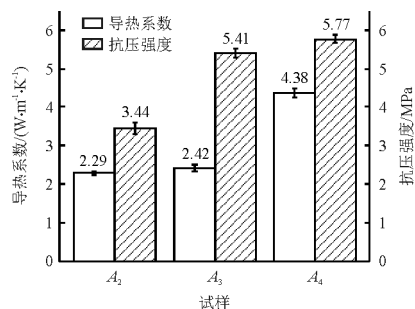


图 4 PF 加入量对 SLS 石墨件抗压强度和导热系数影响

Fig. 4 Effects of PF addition on compressive strength and thermal conductivity of SLS graphite parts

图 5 为 $A_2 \sim A_4$ 试样的微观形貌。图 6 为 PF 加入量对 SLS 石墨件气孔率的影响。可以看出, 随着 PF 的增加, 石墨件内部气孔率呈下降趋势, 而根据图 4 可知, 其导热系数随酚醛树脂加入量的增加而增加, 当 PF 加入量达到 30% 时, 气孔率下降至 67.7%, 导热系数上升

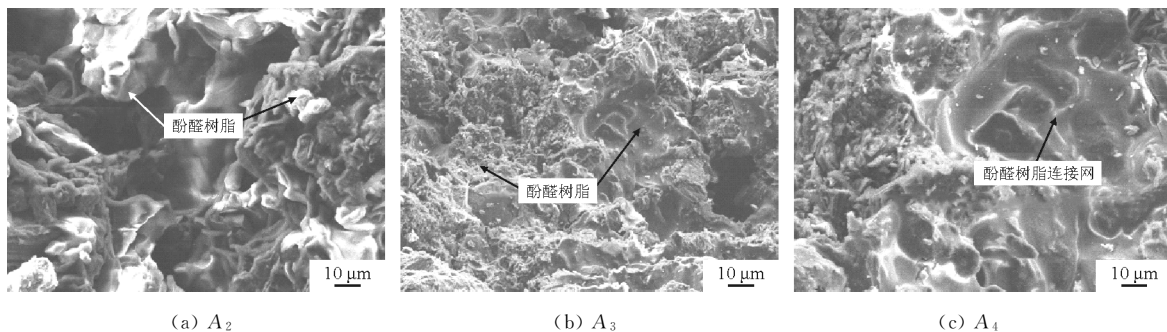


图 5 $A_2 \sim A_4$ 试样的 SEM 微观形貌

Fig.5 SEM morphologies of specimens A_2 to A_4

至 4.38 W/(m·K)。同时抗压强度最大值为 5.77 MPa,偏低,而最小导热系数为 2.29 W/(m·K),偏高,需要进一步提高其抗压强度并降低其导热系数。

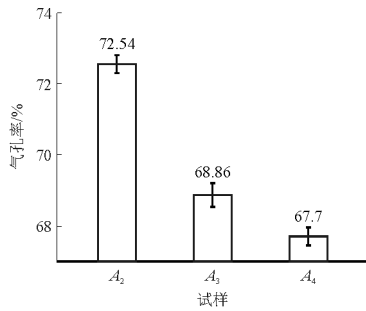


图 6 PF 加入量对 SLS 石墨件气孔率的影响

Fig.6 Effects of thermosetting PF addition on porosity of SLS graphite part

图 7 为高纯硅粉含量对 SLS 石墨试样导热系数、抗压强度、密度和开气孔率的影响。可以看出,随着高纯硅粉含量的增加,试样的抗压强度和导热系数均呈增大趋势。当硅粉加入量从 15% 增加至 35%,试样密度从 0.96 g/cm³ 上升至 1.33 g/cm³,而开气孔率从 45.24% 下降到 39.88%,见图 7b。这是因为高温下高纯硅粉与碳发生原位反应生成 SiC 晶须增强相,强化了三维连接网络结构^[9];且在生成 SiC 晶须过程中伴随着 30% 体积膨胀,使得试样内部孔隙数量和尺寸均有所降低,更加致密。图 8 为 B₁~B₅ 试样的 X 射线衍射谱图,可以看出,石墨和 SiC 衍射峰较强,且 SiC 相峰强随着硅粉加入量增加而增加,表明生成 SiC 增加。

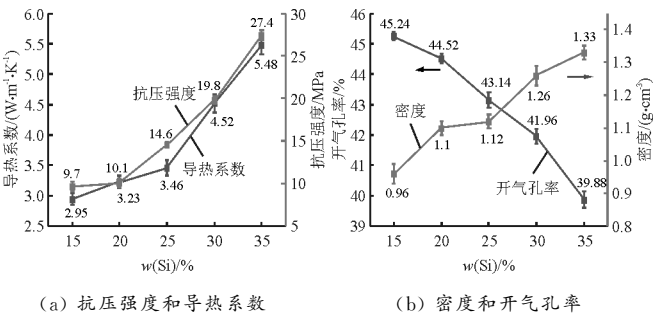


图 7 硅粉加入量对 SLS 石墨件性能的影响

Fig.7 Effect of silica powder addition on the properties of SLS graphite parts

图 9 为硅粉含量为 35% 时试样微观形貌。可以看出,高温下(1 350 ℃)高纯硅粉与碳发生原位烧结反应,在石墨件内部生成大量 SiC 晶须,这些晶须填充在石墨件内部孔隙中,提高了石墨件的致密度,使得其抗压强度大幅提高。通过测量发现,这些晶须大小长短不一,直径为 70~100 nm。

高纯硅粉加入后,试样的抗压强度和导热系数均大幅提高,起到正向调节作用,当硅粉含量为 35% (PF 含量为 30%) 时,抗压强度和导热系数分别达到 27.4 MPa

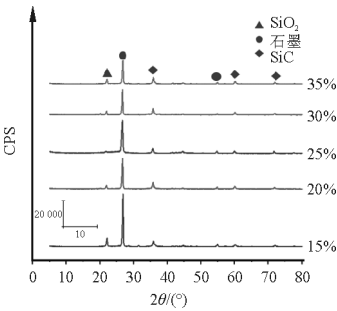


图 8 不同硅粉含量下 SLS 石墨试样 XRD 谱图

Fig.8 XRD patterns of SLS graphite specimens with different silicon powder addition

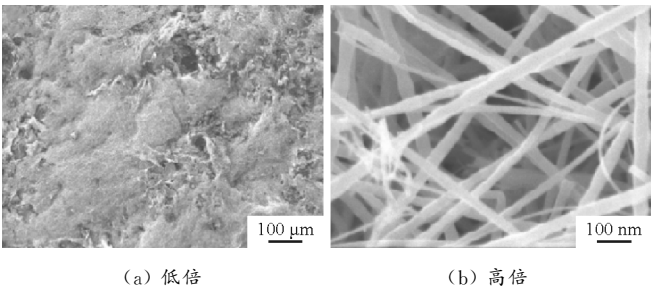


图 9 Si 含量为 35% 时 SLS 石墨试样的 SEM 形貌

Fig.9 SEM morphologies of SLS graphite specimens with 35% Si content

和 5.48 W/(m·K),超出了疏松隔热层对导热系数要求,抗压强度超过了浸渍强化层目标值。与 B₄、B₅ 相比,B₃ 的导热系数[3.46 W/(m·K)]与设计目标值更为接近,考虑到高纯硅粉成本较高,建议高纯硅粉加入量控制在 25%。

图 10 为可膨胀石墨加入量对石墨件抗压强度、导热系数、密度和闭气孔率的影响。可以看出,当可膨胀石墨加入量从 0.25% 增至 1.25% 时,试样导热系数、抗压强度和密度均呈下降趋势,分别从 2.92 W/(m·K)、12.48 MPa 和 1.20 g/cm³ 下降至 1.44 W/(m·K)、5.12 MPa 和 0.96 g/cm³,导热系数降幅达到 50.7%,抗压强度降幅达到 58.9%。这是因为可膨胀石墨作为一种特殊造孔剂,其受热膨化温度区间为 250~950 ℃,膨化时,快速释放出 CO₂、O₂ 等。高温下随着玻璃碳向微晶

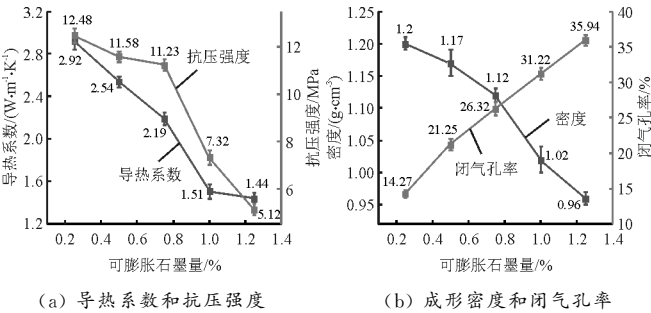


图 10 可膨胀石墨加入量对石墨试样性能影响

Fig.10 Effects of swellable graphite addition on the properties of graphite specimens

石墨转化以及 SiC 晶须生成^[10,11],试样会出现 2% 左右收缩,在其内部形成大量闭气孔,且闭气孔的数量随着可膨胀石墨加入量增加而增加(见图 11)。图 10b 表明

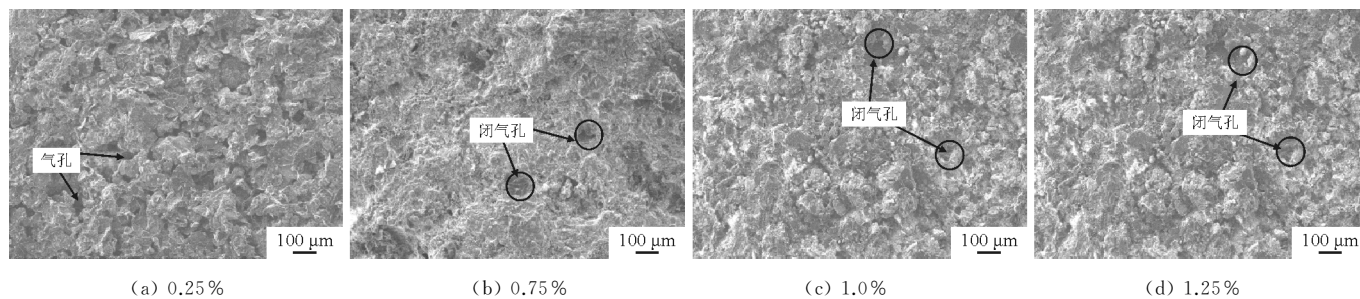


图 11 可膨胀石墨加入量对试样微观形貌影响

Fig.11 Effect of swellable graphite addition on micro morphology of specimens

综上,加入可膨胀石墨会对石墨陶瓷复合型的导热系数、抗压强度起到负方向调节作用,对导热系数的影响更为明显。通过对比可知, C_4 的抗压强度和导热系数较为合适,其导热系数为 $1.51 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,满足设计要求,而抗压强度为 7.32 MPa ,因此,建议混合粉料中天然鳞片石墨、热固性酚醛树脂、硅粉与可膨胀石墨加入量分别为 44%、30%、25%、1.0%。

4 浸渍工艺对抗压强度和导热系数影响

图 12 为浸渍时间对试样浸渍深度、增重率以及抗压强度的影响。可以看出,在 60 s 以内,试样浸渍深度、增重率及抗压强度均随着浸渍时间的延长而增大,表明硅溶胶已渗透到试样内部,当浸渍时间为 60 s 时,试样浸渍深度、增重率以及抗压强度均达到最大值,分别为 6.51 mm、25.36% 和 15.42 MPa ,表明浸渍过程在 60 s 内基本完成,因此,选择浸渍时间控制在 60 s。图 13 为浸渍次数对浸渍深度、试样增重率以及抗压强度影响,可以看出,1 次浸渍后试样增重率达到 25%,效果明显,2 次浸渍后,增重率为 27%,3 次浸渍后增重率基本保持稳定。因此,选定硅溶胶空浸次数为 2 次。从图 13b 可以看出,在完成二次浸渍后,试样抗压强度达到

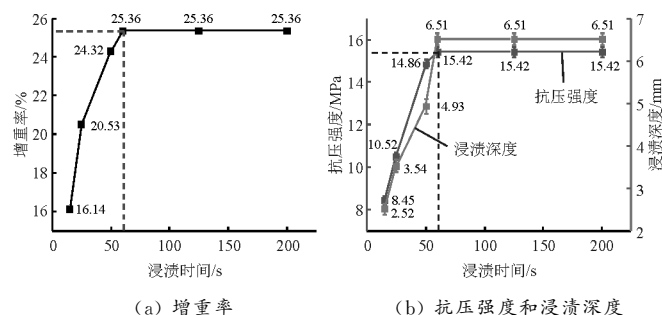


图 12 浸渍时间对试样浸渍深度、增重率以及抗压强度影响
Fig.12 Effects of impregnation time on impregnation depth, weight gain rate and compressive strength

随着可膨胀石墨的增加,虽然成形密度有所下降,但闭气孔率却从 14.27% 上升至 35.94%,闭气孔的存在提高了抗压能力,但对热传导过程有较大影响。

15.91 MPa ,导热系数有所增加,达到 $1.89 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。值得指出的是,经过两次浸渍处理后试样的抗压强度增幅明显大于导热系数增幅,原因在于硅溶胶为小分子链溶剂,能够充分填充试样内部孔隙,导致其内部更加致密,而硅溶胶在碳化后变为白色颗粒状无机物,其导热系数远低于石墨导热系数,故试样导热系数增加不明显。

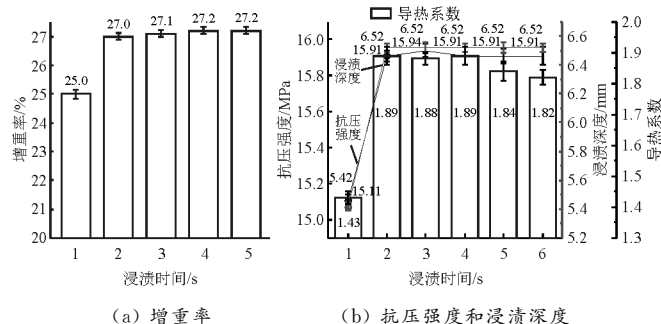


图 13 浸渍次数对试样浸渍深度、增重率以及抗压强度影响
Fig.13 Influence of impregnation times on the impregnation depth, weight gain rate and compressive strength

图 14 为空浸强化处理后的试样。从图 14a 中可以看出,灰白色部分(外)为浸渍强化层,黑色部分(内)为疏松隔热层,层间结合界面清晰可见。这是因为浸渍到石墨预制体中纳米 SiO_2 与玻璃碳发生原位烧结反应生成了 SiC 颗粒,再次增强了三维网络骨架^[12,13],使得抗压强度大幅提升,而导热系数增加不多,是因为通过高

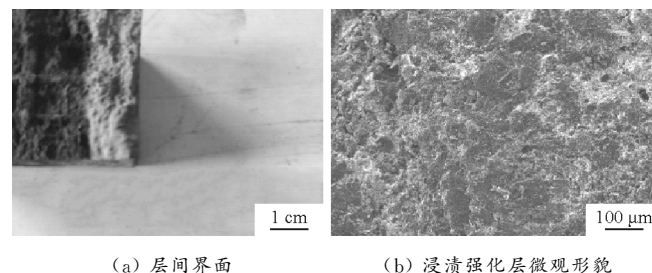
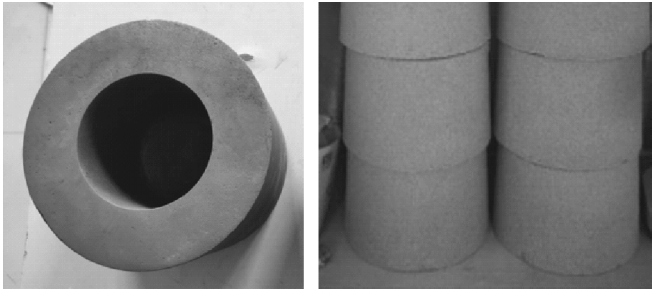


图 14 浸渍强化处理后试样
Fig.14 Specimens after impregnation strengthening treatment

温原位反应生成了 SiC 晶须和颗粒^[14,15],因无外加压力作用,复合材料致密度仍较低。

5 石墨/陶瓷复合型综合性能及浇注

图 15 为用选择性激光烧结技术和浸渍强化技术快速制备的石墨陶瓷复合型和传统的水玻璃砂型。可以看出,复合型结构形状完整、尺寸稳定,可二次机械切削加工,表面品质优良,未见裂纹、孔洞等缺陷。表 1 为两种铸型综合性能对比,其导热系数相当,但复合型的抗压强度是砂型的 3.5 倍,且其耐高温能力更强,达到 1 600 ℃。图 16 为用两种铸型进行重力浇注试验获得的铸钢件。测量中心收缩区的大小、位置,并估算面积(见表 2),两铸件中心收缩区大小及位置基本一致,说明铸型热物性相当。复合型重复使用次数达到 28 次,而水玻璃砂型仅能使用 1 次,表明复合型具有良好的抗热震能力和抗高温金属液冲刷能力。尽管复合型每吨



(a) 石墨陶瓷复合型 (b) 水玻璃砂型

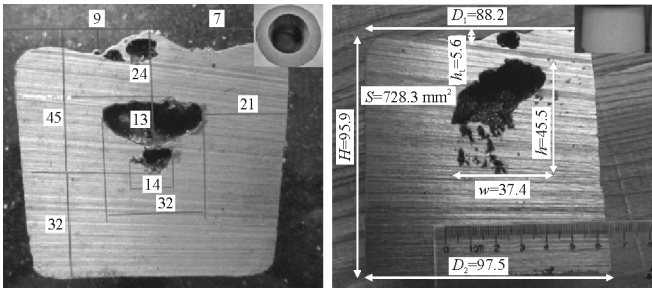
图 15 石墨陶瓷复合型和 水玻璃砂型

Fig.15 Graphite ceramic mold and water glass sand mold

表 1 石墨陶瓷复合型和 水玻璃砂型综合性能对比

Tab.1 Comparison of the overall performance of graphite-ceramic composite and water-glass sand types

铸型类型	密度/ (g·cm ⁻³)	抗压强度/ MPa	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	承受温度/ ℃	重复使用次数	单次使用成本/ 元
石墨陶瓷复合型	1.02	10.54	1.89	>1 600	28	300
水玻璃砂型	1.45	3.03	1.79	>1 400	1	600



(a) 石墨陶瓷复合型 (b) 水玻璃砂型

图 16 采用两种铸型生产的铸钢件

Fig.16 Cross-sectional view of casting steel parts by two casting mold

材料成本(8 400 元)远高于水玻璃砂型(600 元),但复合型单次使用成本仅 300 元,为水玻璃砂型的一半,同时减少了人工成本,从成本方面考虑,复合型替代水玻璃砂型是可行性的。

表 2 铸钢件收缩区测量结果

Tab.2 Measuring results of shrinkage zones in casting steel parts

铸型类型	收缩区高度 h/ mm	收缩区宽度 w/ mm	顶部收缩量 h ₁ / mm	收缩区中心位置/ mm	收缩区面积 S/ mm ²
石墨陶瓷复合型	24.0	32.0	7.0	44.0	397.4
水玻璃砂型	45.5	32.4	5.6	35.0	418.9

6 结 论

将选择性激光烧结技术和浸渍强化技术集成,快速制备了低导热高抗压石墨陶瓷复合型。通过加入混合粉末中热固性酚醛树脂、高纯硅粉,可以实现导热系数和抗压强度正向调控,而加入可膨胀石墨可以实现导热系数和抗压强度负向调控;以硅溶胶为浸渍剂,采取浸渍强化处理构建了“三明治”结构的石墨陶瓷复合型,通过改变浸渍时间和浸渍次数,实现导热性能和抗压强度主动调控,最终确定当酚醛树脂加入量为 30%,硅粉加入量为 25%,可膨胀石墨加入量为 1%,浸渍两次硅溶胶(每次浸渍 60 s)后所得密度为 1.02 g/cm³、抗压强度为 10.54 MPa、导热系数为 1.89 W/(m·K)的石墨陶瓷复合型,并成功地应用于铸钢件多次浇注试验。

参 考 文 献

[1] 朱以松,吴殿杰. 铸造旧砂资源化再生技术与创新[J]. 铸造设备与工艺, 2014(5): 1-7.

[2] GEDIK A G, LAV A H, MUSAFFA A L. Investigation of alternative ways for recycling waste foundry sand: An extensive review to present benefits[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2018, 45(6): 423-434.

[3] 樊自田,汪华方. 水玻璃砂型铸造技术研究及应用新进展[J]. 金属加工(热加工), 2011(19): 23-26.

[4] 刘丹丹. 石墨的应用及其发展前景[J]. 黑龙江冶金, 2016, 36(1): 56-57.

[5] 饶娟,张盼,何帅. 人造石墨利用现状及石墨制品综述中国科学[J]. 技术科学, 2017, 47(1): 13-31.

[6] 吴海华,李腾飞,鄢俊能,等. 石墨/酚醛树脂混合粉末选择性激光烧结成型工艺研究[J]. 应用激光, 2018, 38(2): 195-201.

[7] BOURELL D L, LEU M C, CHAKRAVARTHY K, et al. Graphite-based indirect laser sintered fuel cell bipolar plates containing carbon fiber additions[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 275-278.

[8] GUO N, LEU M C. Effect of different graphite materials on the electrical conductivity and flexural strength of bipolar plates fabricated using selective laser sintering[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(4): 3 558-3 566.

[9] 韩永军,李青彬,燕青芝,等. 反应烧结制备碳化硅增强石墨复合材料及其性能[J]. 新型炭材料, 2015, 30(1): 92-96.

工艺参数对 H13 钢电弧增材制造成形品质的影响

姜淑馨 李峰光

(湖北汽车工业学院材料科学与工程学院)

摘要 为确定 H13 钢丝材电弧增材制造单道单层成形的最佳工艺参数,在调质处理后的 H13 钢基板上,选取沉积电流为 80~240 A,沉积速度为 2~6 mm/s;保护气体分别为(体积分数)5%的 O₂+95%的 Ar、10%的 CO₂+90%的 Ar 以及 20%的 CO₂+80%的 Ar 等 3 种混合气体,通过余高系数和成形系数两个评价指标分析工艺参数对单道单层沉积层成形的影响。结果表明,余高系数和成形系数随着沉积电流的增大而降低,在 120 A 和 6 mm/s 的条件下余高系数最大,为 3.79;在 240 A 和 6 mm/s 的条件下余高系数最小,为 2.11。在 80 A 和 2 mm/s 的条件下成形系数最大,为 8.56;在 200 A 和 6 mm/s 条件下成形系数最小,为 3.42。沉积电流为 120 A、沉积速度为 4 mm/s、用 20%的 CO₂+80%的 Ar 混合气体保护时,得到品质优良的成形件。

关键词 电弧增材制造;丝材;余高系数;成形系数

中图分类号 TG444;TG142

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.05.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of Process Parameters on Forming Quality of H13 Steel by WAAM

Jiang Shuxin, Li Fengguang

(School of Materials Science and Engineering, Hubei University of Automotive Technology)

Abstract: In order to determine the optimal process parameters of H13 steel by WAAM single-layer and single-pass forming, the experimental combination of deposition current of 80~240 A and deposition speed of 2~6 mm/s, the experimental combination of 5% O₂+95% Ar, 10% CO₂+90% Ar and 20% CO₂+80% Ar were selected on the H13 steel substrate after quenching and tempering treatment. The influence of process parameters on the forming of single-layer single-pass layer was analyzed through evaluation indexes of reinforcement coefficient and forming coefficient. The results indicate that the reinforcement coefficient and forming coefficient are decreased with the increase of deposition current, and the reinforcement coefficient reaches the maximum of 3.79 under the experimental combination of 120 A and 6 mm/s, which reaches the minimum of 2.11 at 240 A and 6 mm/s. The forming coefficient reaches the maximum of 8.56 under the experimental combination of 80 A and 2 mm/s, which reaches the minimum of 3.42 at 200 A and 6 mm/s. Therefore, when deposition current is 120 A, deposition speed is 4 mm/s and protective gas is combination of 20% CO₂+80% Ar, forming parts with desirable quality can be obtained.

Key Words: Arc Additive Manufacture, Wire, Reinforcement Coefficient, Forming Coefficient

收稿日期:2021-11-07;修改稿收到日期:2021-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51604103);湖北省自然科学基金资助项目(2016CFB293);湖北汽车工业学院“增材制造及表面强化”校级创新团队资助项目(B05)

第一作者简介:姜淑馨,女,1991 年出生,湖北十堰(442002),E-mail:1534717309@qq.com

通信作者:李峰光,男,1987 年出生,副教授,湖北十堰(442002),E-mail:lemon2006@126.com

引用格式:姜淑馨,李峰光. 工艺参数对 H13 钢电弧增材制造成形品质的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(5):642-646.

JIANG S X, LI F G. Influence of process parameters on forming quality of H13 steel by WAAM[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5):642-646.

- [10] WU H H, CHEN K, LI Y F, et al. Fabrication of natural flake graphite/ceramic composite parts with low thermal conductivity and high strength by selective laser sintering[J]. Applied Sciences, 2020, 10(4): 1 314.
- [11] 郭晓波. 中间相沥青基炭/炭复合材料的制备及性能研究[D]. 西安:航天动力技术研究院, 2018.
- [12] 邵珠花. 高参数浸渍剂研制及浸渍工艺的研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2019.
- [13] 任海涛,贾韬,刘家臣,等. 具有三维网络结构的莫来石纤维多孔隔热材料的制备及性能研究[J]. 航空科学技术, 2018, 29(4): 73-

78.

- [14] LIN Y, LIU B, FEI C. Study on impact resistance of C/SiC ceramic matrix composites for thermal protection of the aerospace vehicle[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021: 1-10.
- [15] CHEN S, CAI W H, WU J M, et al. Porous mullite ceramics with a fully closed-cell structure fabricated by direct coagulation casting using fly ash hollow spheres/kaolin suspension[J]. Ceramics International, 2020, A46(11): 17 508-17 513.

(编辑:彭瑾)