

## 激光与光电子学进展

## 天然鳞片石墨选择性激光烧结成形工艺研究

吴海华\*, 贺俊超, 李亚峰, 钟磊

三峡大学机械与动力学院, 水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002

**摘要** 研究不同的酚醛树脂加入量、不同粒径的石墨粉末以及包覆预处理次数对石墨成形件的抗弯强度和成形精度影响,分析其变化规律,揭示石墨增材制造成形机理。研究发现:石墨成形件的抗弯强度、成形误差随着酚醛树脂粉末加入量的增加而增大;与-325目、-200目和-150目相比,用-100目天然鳞片石墨粉末与酚醛树脂粉末按6:4的质量比制备的混合粉末,其成形件的抗弯强度最佳,达到1.93 MPa;对石墨粉末进行包覆预处理,既有助于提高石墨成形件的力学性能,又可以降低粉末的导热系数,从而提高成形件的成形精度,当包覆次数为2时,其抗弯强度达到2.976 MPa,X、Y和Z方向的尺寸相对误差分别为8.42%、8.45%和13.05%。此外,快速制造出类金刚石结构的多孔石墨骨架,实现了强度与精度的协同。

**关键词** 激光光学; 选择性激光烧结; 石墨成形件; 成形精度; 抗弯强度; 成形机理

中图分类号 TN249;TB321

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0914005

## Selective Laser Sintering of Natural Flake Graphite Prototype Forming Process Research

Wu Haihua\*, He Junchao, Li Yafeng, Zhong Lei

College of Mechanical & Power Engineering, Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China

**Abstract** Herein, the effects of phenolic resin addition amount, graphite powder with different particle sizes, and coating pretreatment time on the bending strength and forming accuracy of graphite parts were investigated. The variation law was obtained, and the formation mechanism of graphite additives was revealed. Results show that the bending strength and forming error of graphite parts increase with an increase in the phenolic resin addition amount. Compared with -325, -200, and -150 mesh, when the mass ratio of -100 mesh natural flake graphite powder to phenolic resin powder is 6:4, the bending strength of the formed parts is optimal, reaching 1.93 MPa. The coating pretreatment of graphite powder not only helps to improve the mechanical properties of the graphite molded parts, but also reduces the thermal conductivity of the powder, thereby improving the forming accuracy of the molded parts. When the coating time is doubled, the bending strength of the formed parts reaches 2.976 MPa and the relative dimension errors of the X, Y, and Z axes are 8.42%, 8.45%, and 13.05%, respectively. In addition, a porous graphite skeleton with a diamond-like carbon structure can be quickly manufactured, realizing the synergy of strength and precision.

**Key words** laser optics; selective laser sintering; graphite molded parts; forming accuracy; bending strength; forming mechanism

**OCIS codes** 140.3390; 160.3380; 140.3500; 260.2160

收稿日期: 2020-09-07; 修回日期: 2020-09-27; 录用日期: 2020-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(51575313)、湖北省技术创新专项重大项目(2019AAA164)

\*E-mail: wuhaihua@ctgu.edu.cn

## 1 引言

石墨在耐高温、耐酸、柔韧性等方面具有独特的理化性质,被广泛应用于钢铁冶炼、航空、航天等领域,是不可或缺的战略物资<sup>[1]</sup>。目前石墨制成品如石墨电极、石墨模具、石墨铸型、石墨喷管和石墨换热器等多由高强度、高密度的人工合成石墨坯体加工而成,此工序的周期长、成本高,对环境污染严重。我国天然鳞片石墨矿产资源储量丰富,使用成本低,天然鳞片石墨粉末具有与人工合成石墨类似的理化性质,如果直接将其作为原材料制备石墨成形件,不仅可以缩短工艺流程,降低生产成本,而且减轻了人工合成石墨生产时所带来的环境污染压力。然而,天然鳞片石墨粉末是一种典型的不加工不成型的矿产资源,质轻易脆、成形工艺性不佳<sup>[2-3]</sup>。选择性激光烧结(SLS)成形技术的出现给鳞片石墨粉末成型提供了全新的工艺方法,也给快速制备石墨成形件提供了可能<sup>[4]</sup>。Chen等<sup>[5-7]</sup>以天然鳞片石墨/热固性酚醛树脂混合粉末为原材料,利用SLS技术快速制备出质子交换膜燃料电池用石墨复合双极板,其成形机理为:在一定的激光能量密度作用下,热固性酚醛树脂粉末受热熔融,并在石墨片铺展、固化,将石墨粉末“连接”在一起,获得石墨成形件。

为了保证石墨成形件几何结构的完整性,避免在后续粉末清理过程中某些细小的特征结构被折断,其抗弯强度应不低于2 MPa。Chen<sup>[5]</sup>对比研究了石墨/酚醛树脂混合粉末组成对石墨成形件抗弯强度的影响,研究发现石墨成形件的抗弯强度随着石墨粉末粒径减小而降低,随着酚醛树脂加入量的增加而增强。Guo等<sup>[6]</sup>和Bourell等<sup>[7]</sup>进一步研究发现,添加短切碳纤维会显著提高石墨成形件的抗弯强度,当加入的短切碳纤维体积分数达到26%时,抗弯强度增加了1倍,达到4.0 MPa,然而,短切碳纤维的加入会影响混合粉末的流动性,提高导热系数。研究表明,当前工艺措施如提高混合粉末堆积密度、添加短切碳纤维等均有助于提高石墨成形件的抗弯强度,改善成形件的工艺性,但混合粉末的导热系数和次级烧结区也会随之增加,石墨成形件的成形精度不佳。

与有机物、陶瓷粉末相比,天然鳞片石墨粉末的导热性能较佳,以其为主要原料制备的石墨/酚醛树脂混合粉末的导热系数也较高,这使得在利用

SLS技术快速制备石墨成形件过程中,抗弯强度和成形精度不协同的问题更加突出<sup>[8]</sup>。闫春泽等<sup>[9-10]</sup>研究发现在粉末SLS成形过程中存在次级烧结现象,成形件的成形精度会受到较大影响,当激光烧结能量密度一定时,次级烧结区面积与混合粉末的导热系数正相关。王丹妮<sup>[11]</sup>研究了加工工艺参数对成形件翘曲变形的影响。为此,本文通过分析不同的石墨粉末粒径、不同的酚醛树脂加入量以及包覆预处理次数对石墨成形件抗弯强度和成形精度的影响规律,进一步揭示石墨粉末增材制造成形机理,即散落在天然鳞片石墨片层之间的酚醛树脂在激光能量的作用下熔融固化,将石墨片层层粘接,其有效黏接力受到激光功率、酚醛树脂含量以及粉末粒径大小等因素的影响。同时,本研究也实现了抗弯强度与成形精度的协同,最终快速制造出类金刚石多孔石墨骨架。

## 2 实验方法及材料

### 2.1 实验材料及其配比

将含碳量(质量分数)为99.5%的天然鳞片石墨粉(购自宜昌新成石墨有限公司)与2123-4型酚醛树脂粉末(200目,购自河南新乡伯马实业有限公司)分批加入GQM型干法球磨机(购自咸阳金宏通用机械有限公司)中,混合2~4 h,随后将其取出并转移到HK S500粉末烧结快速成形系统中(购自武汉华科三维科技有限公司),完成试样3D打印。工艺参数如下<sup>[12-13]</sup>:激光功率为17 W,填充速率为 $1900 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,填充间距为0.1 mm,分层厚度为0.1 mm,预热温度为40 °C,采取轮廓扫描方式成型。

实验设计主要包括三个方面:首先,选取石墨与酚醛树脂的质量比分别为80:20、75:25、70:30、65:35以及60:40五组样品(天然鳞片石墨粒径大小为-100目)分别进行石墨成形件的制备,并对其抗弯强度和成形精度进行测试,确定天然鳞片石墨与酚醛树脂的最佳质量配比;其次在确定质量比为60:40条件下研究天然鳞片石墨粒径大小对石墨成形件抗弯强度和成形精度的影响,天然鳞片石墨粒径大小选为-100目,-150目,-200目和-325目;最后基于前面两个实验,对-100目天然鳞片石墨包覆2130型酚醛树脂液(由河南新乡伯马实业有限公司提供),包覆次数分别为1次、2次和3次,将包覆后的天然鳞片石墨继续与酚醛树脂按照质量比

为 60:40 进行混合,研究包覆次数对石墨成形件抗弯强度和成形精度的影响。包覆工艺如下:将 2130 型酚醛树脂和无水乙醇按质量比 1:1 混合获得包覆溶液,每次包覆所用 2130 型酚醛树脂的质量占混合粉末总质量的 5%。首先,将天然鳞片石墨粉末放入沸腾包衣干燥机工作腔中;其次,将工作腔气密封,打开引风机,使之沸腾,待工作腔温度升至 70 °C,打开喷枪,喷洒提前制备好的包覆液,60 s 后关闭引风机;最后,待石墨粉完全烘干后取出包覆完成的粉末。重复上述工艺过程,获得包覆次数不同的天然鳞片石墨粉末。

### 2.2 性能测试

选用 JB-126B 型微控电子拉力试验机(购自上海久滨仪器有限公司)测试石墨成形件的(试样尺寸为 40 mm×20 mm×8 mm)抗弯强度,压头以 5 mm/min 的加载速度均匀且无冲击地施加载荷,按抗弯强度的计算公式求得其值,每组试样数量不少于 5 个。抗弯强度计算公式为

$$\sigma = \frac{3 \times F \times L}{2 \times h \times b^2}, \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为抗弯强度,单位为 MPa; $F$ 为拉力试验机的最大压力,单位为 N; $L$ 为跨距, $h$ 为试样高度, $b$ 为试样宽度,三者的单位均为 mm。

导热测试采用瞬态平面热源法,基于 TPS 瞬态平面热源技术,用 Hot Disk 作为探头。采用湘潭湘仪仪器有限公司生产的 DRE-III 型导热系数测量仪测量试样在室温下的导热系数。其原理基于 Healy 等<sup>[14]</sup>在 1976 年提出的理论,假设在无限尺寸的各向同性物质中放置一内部恒温的线热源,当两者达到热平衡状态时将线热源加热,根据线热源的温升,通过计算即可得到被测物体的导热系数。测试原理如图 1 所示。

选用游标卡尺测量试样(尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm)X、Y 和 Z 方向的实际尺寸,用实测

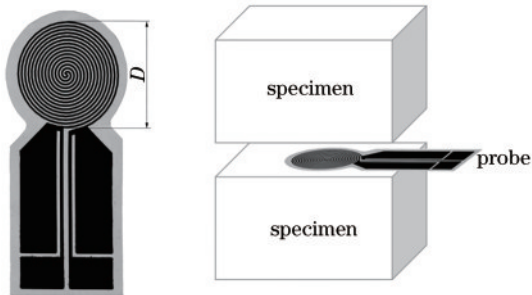


图 1 瞬态平板热源法测试原理图

Fig. 1 Schematic of transient plate heat source method

尺寸减去基本尺寸求得尺寸偏差,尺寸偏差除以基本尺寸求得尺寸相对误差值,每组试样数量不少于 5 个。约定 X 方向为与铺粉辊运动方向一致的方向,即试样长度方向,Y 方向为与铺粉辊运动方向垂直的方向,即试样宽度方向,Z 方向为材料累加成型方向,即试样高度方向。

混合粉末的堆积密度测试过程如下:先准确称取量筒(容积为 100 mL)的质量  $W_0$ ,精确到 0.01 g,再将混合粉末通过漏斗倒入量筒,径向轻微振动量筒使粉末填实,用直尺沿接收器口刮平粉末试样,准确称取装满试样的量筒质量  $W_1$ ,精确到 0.01 g。堆积密度的计算公式为

$$\rho = \frac{W_1 - W_0}{V}, \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为粉末密度,单位为  $g/cm^3$ ;  $W_0$ 、 $W_1$ 分别为混合粉末添加前和添加后量筒质量,单位为 g; $V$ 为通过量筒测得的粉末体积,单位为  $cm^3$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 酚醛树脂加入量对石墨成形件抗弯强度和成形精度的影响

图 2 所示为酚醛树脂加入量对石墨成形件抗弯强度的影响,可见,当加入的酚醛树脂质量分数从 20% 增加至 40% (stage ①代表酚醛树脂质量分数从 20% 增加至 25% 这一阶段,对应图 2 中的 ①; stage ②代表酚醛树脂质量分数从 25% 增加至 30% 这一阶段,对应图 2 中的 ②; stage ③代表酚醛树脂质量分数从 30% 增加至 35% 这一阶段,对应图 2 中的 ③; stage ④代表酚醛树脂质量分数从 35% 增加至 40% 这一阶段,对应图 2 中的 ④),石墨成形件 X、Y 方向

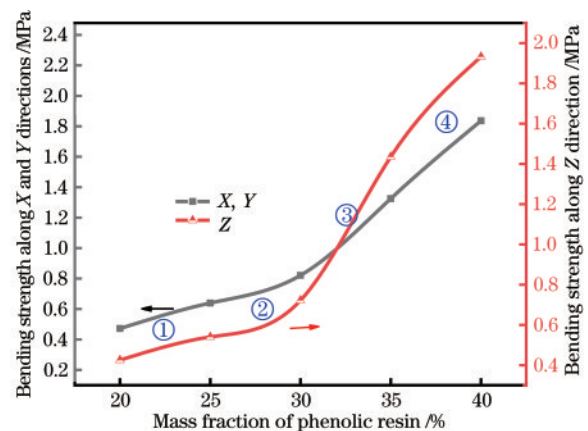


图 2 酚醛树脂加入量对石墨成形件抗弯强度的影响

Fig. 2 Effect of phenolic resin addition amount on the bending strength of graphite molded parts

的抗弯强度从 0.472 MPa 增加到 1.836 MPa, Z 方向的抗弯强度从 0.425 MPa 增加到 1.932 MPa, 且抗弯强度增加幅度均呈现先增大后减小的趋势 (图 3)。这是因为在激光的照射下酚醛树脂受热融

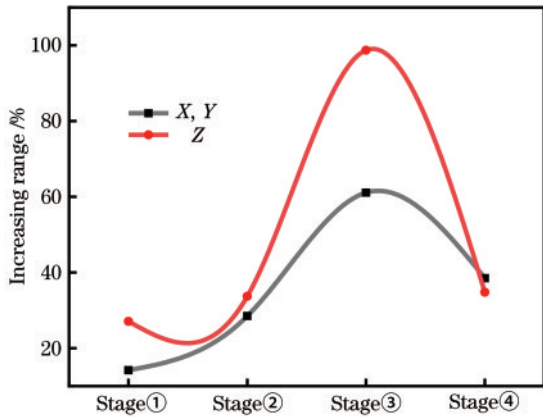


图 3 石墨成形件抗弯强度增幅变化曲线

Fig. 3 Curves of increasing range in bending strength of graphite molded parts

化,在天然鳞片石墨片间流动,将其连接在一起,当酚醛树脂加入量太少时,石墨片间的连接点数量非常有限,石墨片间结合力较弱,此时石墨原型件抗弯强度不高;当加入的酚醛树脂质量分数从 30% 增加到 35% 时,酚醛树脂液开始填充到孔隙中,构筑成三维网络骨架,将石墨片包裹起来,此时石墨成形件的抗弯强度大幅度增加,继续增大酚醛树脂的质量分数,三维网络骨架变得更加粗大,但连接点的数量和层间结合力增大有限,故抗弯强度增幅不大。从图 4 所示的天然鳞片石墨 SLS 成形件沿 X、Y 方向和 Z 方向的断面微观形貌可以清楚地看到酚醛树脂加入量的变化对石墨片连接状态的影响:当加入酚醛树脂的质量分数为 20% 时,内部孔隙较多,石墨片间主要依靠连接点粘结在一起,如图 4(a)、(b) 所示;当加入酚醛树脂的质量分数为 35% 时,由于酚醛树脂的加入量增加,大量的酚醛树脂熔融、固化、填充于石墨片层之间,将石墨片粘接在一起,如图 4(c)、(d) 所示。

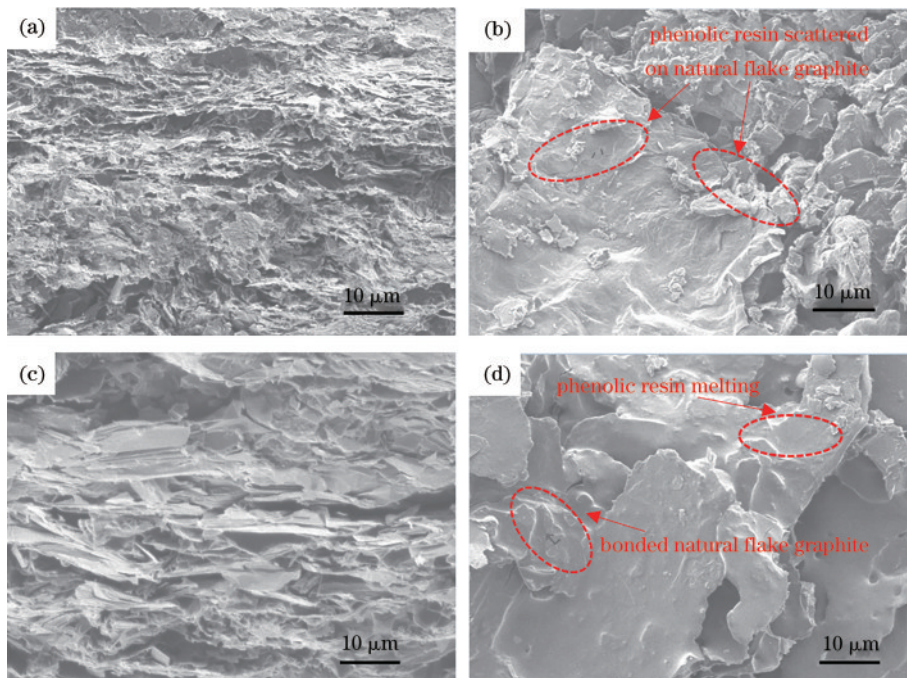


图 4 加入的酚醛树脂质量分数为 20% 和 35% 时天然鳞片石墨 SLS 成形件沿 X、Y 方向和 Z 方向的断面图。(a) 20%, X、Y 方向; (b) 20%, Z 方向; (c) 35%, X、Y 方向; (d) 35%, Z 方向

Fig. 4 Cross-sectional view of natural flake graphite SLS molded parts along the X, Y, and Z directions when the mass fraction of phenolic resin is 20% and 35%. (a) 20%, X and Y directions; (b) 20%, Z direction; (c) 35%, X and Y directions; (d) 35%, Z direction

图 5 所示为酚醛树脂加入量对石墨成形件 X、Y 和 Z 方向尺寸成形精度的影响。可见,随着酚醛树脂加入量的增加, X 轴、Y 轴和 Z 轴尺寸相对误差也在增大。这是因为混合粉末所吸收的能量除一部

分散失到四周的空气以外,一部分能量以热传导方式传导至周围松散粉末,当非选择区的混合粉末达到熔融固化温度,在选择区周围粘结了一层非理想的烧结层,即次级烧结区域。混合粉末的导热系数

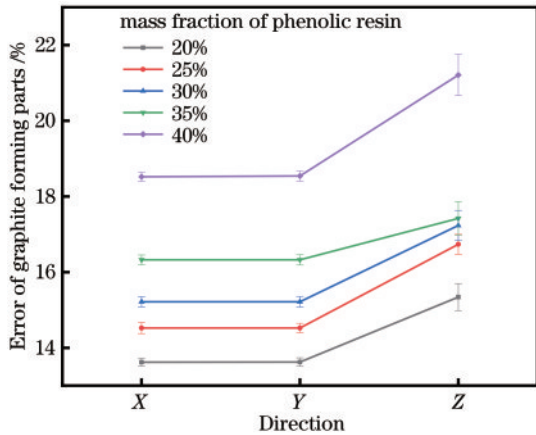


图 5 酚醛树脂加入量对石墨成形件成形精度的影响  
Fig. 5 Influence of the phenolic resin addition amount on the forming accuracy of graphite molded parts

越高,形成的次级烧结区域越大,试样的成形精度也就越差<sup>[15-17]</sup>。图 6 所示为酚醛树脂加入量对混合

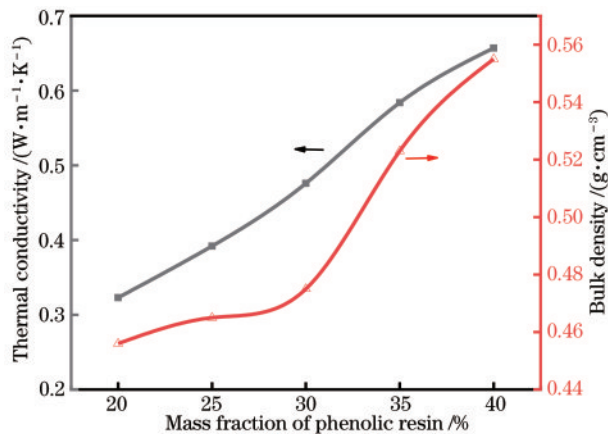


图 6 酚醛树脂加入量对粉末导热系数和堆积密度的影响  
Fig. 6 Influence of the phenolic resin addition amount on the thermal conductivity and bulk density of the powder

粉末导热系数和堆积密度的影响。可见,混合粉末的导热系数随着酚醛树脂加入量的增加而增大,这是因为酚醛树脂的加入提高了混合粉末的堆积密度(当加入的酚醛树脂质量分数从 20% 增加至 40% 时,混合粉末的堆积密度从 0.456 g/cm<sup>3</sup> 增加到 0.555 g/cm<sup>3</sup>),也就是说加入的酚醛树脂在一定程度上填充了石墨片间的孔隙,导致导热系数增大(从 0.323 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> 增加至 0.657 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>),成形误差也相应增大(X、Y 方向的相对尺寸误差从 13.62%、13.63% 增加至 18.52%,Z 方向的相对尺寸误差从 15.34% 增加至 21.21%)。与 X、Y 方向相比,Z 方向的尺寸相对误差偏大,这是因为石墨成形件 Z 方向的尺寸不仅与石墨和酚醛树脂混合粉末

的导热系数有关,而且还会受到次级烧结、激光能量密度分布不均匀、Z 轴盈余等因素的影响<sup>[18-20]</sup>。

### 3.2 天然鳞片石墨粒径对石墨成形件抗弯强度和成形精度的影响

图 7 所示为天然鳞片石墨粒径对石墨成形件堆积密度与抗弯强度(Z 方向)的影响。当加入酚醛树脂的质量分数为 40%,石墨成形件的抗弯强度和堆积密度均随着石墨粉末粒径减小而快速下降。当采用 -100 目天然鳞片石墨粉末时,石墨成形件抗弯强度为 1.932 MPa;采用 -325 目天然鳞片石墨粉末时,试样无法成型。这是因为前者的堆积密度为 0.555 g/cm<sup>3</sup>,而后者的堆积密度仅为 0.241 g/cm<sup>3</sup>,当粉末粒径较小时,由于内聚力的存在,细小粉末易团聚,难以获得高的堆积密度。如前所述,堆积密度越大,石墨成形件的抗弯强度越大。而采用 -150 目与 -200 目石墨粉末时,成形件的抗弯强度分别为 1.512 MPa 和 0.470 MPa。

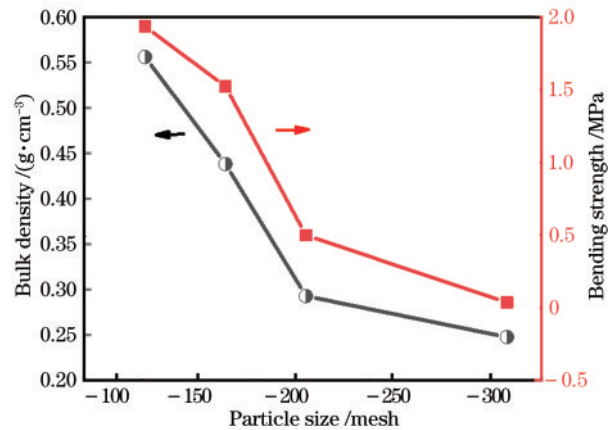


图 7 天然鳞片石墨粒径对石墨成形件堆积密度与抗弯强度(Z 方向)的影响

Fig. 7 Influence of the particle size of natural flake graphite on the bulk density and bending strength (Z direction) of graphite molded parts

图 8 所示为天然鳞片石墨粒径对石墨成形件成形精度的影响,当采用 -100 目和 -325 目的天然鳞片石墨粉末时,石墨成形件沿 X、Y 方向的尺寸相对误差分别 18.52%、18.53% 和 15.72%、15.74%,沿 Z 方向的尺寸相对误差分别为 21.21% 和 18.62%,两者相差不大。这是因为混合粉末的导热系数随着天然鳞片石墨粒径的减小而减小。从图 9 可以看到:采用 -100 目天然鳞片石墨粉末时,混合粉末的导热系数为 0.657 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>;采用 -325 目天然鳞片石墨粉末时,混合粉末的导热系数为 0.510 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>。

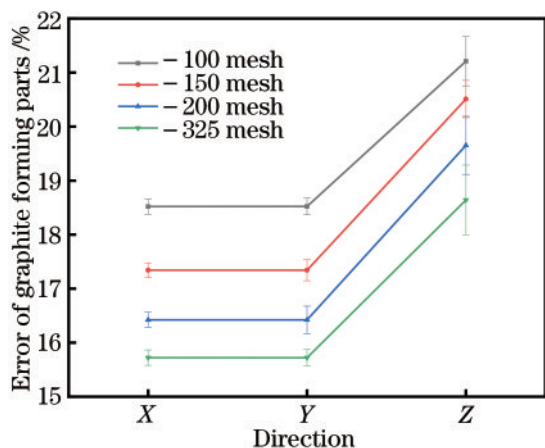


图 8 天然鳞片石墨粒径对石墨成形件成形精度的影响  
Fig. 8 Influence of the particle size of natural flake graphite on the forming accuracy of graphite molded parts

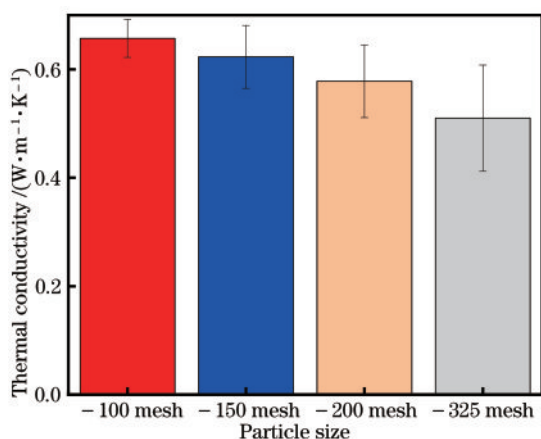


图 9 天然鳞片石墨粒径对混合粉末导热系数的影响  
Fig. 9 Influence of the particle size of natural flake graphite on the thermal conductivity of mixed powder

二者相近,这也就意味着在酚醛树脂加入量相同的条件下,天然鳞片石墨粒径对石墨成形件的成形精度影响不大。为了使石墨成形件获得较高的成形强度,同时也具备良好的成形精度,本研究建议选取-100目天然鳞片石墨粉末,其与酚醛树脂粉末的质量比为6:4。

### 3.3 包覆次数对石墨成形件抗弯强度与成形精度的影响

图 10 所示为包覆次数对粉末堆积密度以及石墨成形件抗弯强度(Z方向)的影响,可见,未经包覆处理的天然鳞片石墨粉末,其成形件的抗弯强度只有 1.932 MPa,经包覆 1 次处理后,石墨成形件的抗弯强度达到 2.392 MPa;经过 2 次包覆处理,石墨成形件抗弯强度达到 2.976 MPa,抗弯强度提高了 1.5 倍。这是因为包覆处理后,混合粉体的堆积密

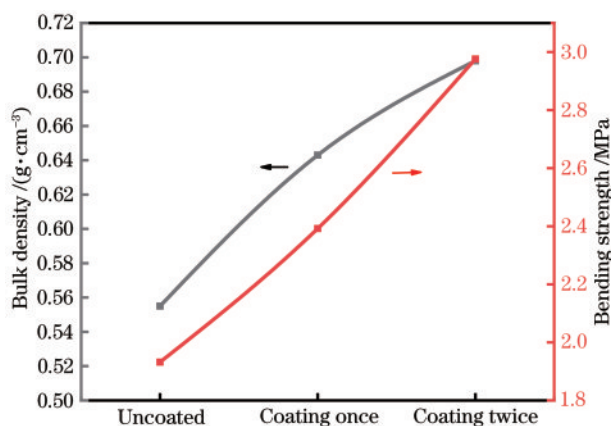


图 10 包覆次数对粉末堆积密度以及石墨成形件抗弯强度(Z方向)的影响

Fig. 10 Influence of coating times on the powder bulk density and the bending strength (Z direction) of graphite molded parts

度发生了变化,未包覆处理时,混合粉末堆积密度仅 0.555 g/cm<sup>3</sup>,1 次、2 次包覆处理后,混合粉末堆积密度分别增加至 0.643 g/cm<sup>3</sup>和 0.698 g/cm<sup>3</sup>。图 11(a)、(b)所示分别为包覆处理前、后的天然鳞片石墨粉末的 SEM 照片,观察发现,经过两次包覆处理后,天然鳞片石墨粉末已完全被酚醛树脂覆盖,表面更加光滑平整,并出现了类球形化趋势,这样在选区激光作用下,更容易粘结在一起,这对提高石墨成形件抗弯强度非常有利。

图 12 和图 13 所示分别为包覆次数对试样成形精度和导热系数的影响。可见,随着包覆次数的增加,试样沿 X、Y、Z 方向的尺寸精度得到明显改善,X、Y 方向尺寸的相对误差分别从 18.52%、18.54% 降至 8.42%、8.45%,Z 方向尺寸的相对误差从 21.21% 降至 13.05%,这与 3 种混合粉末导热系数 (0.65 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>、0.45 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>和 0.35 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>) 变化规律保持一致,这是因为经过包覆处理后,原来的石墨片与石墨片的接触变成了现在的酚醛树脂与酚醛树脂的接触,酚醛树脂的导热系数 (0.290 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>) 低于石墨粉末的导热系数 (0.789 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>),导致接触热阻增大,混合粉末的导热系数降低,因此,次级烧结区减小,成形精度有所提高。Z 方向的成形精度仍然比 X、Y 方向差,其原因如前所述。

图 14 所示为类金刚石结构的石墨骨架 CAD 模型,其中类金刚石键长 L 为 9 mm,键半径 R 为 1.5 mm,键角 Ψ 为 120°。该骨架的结构复杂多孔,

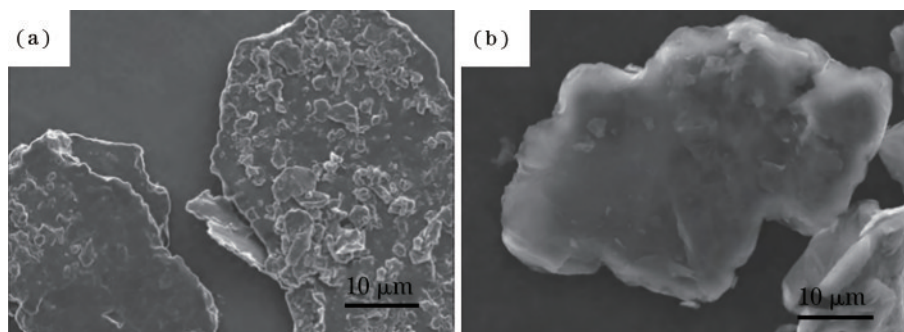


图 11 天然鳞片石墨和包覆 2 次后粉末的 SEM 图。(a)天然鳞片石墨;(b) 包覆 2 次后粉末

Fig. 11 SEM images of natural flake graphite and powder after coating twice. (a) Natural flake graphite; (b) powder after coating twice

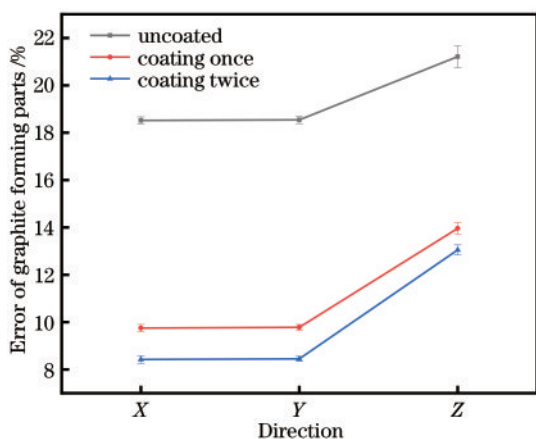


图 12 包覆次数对试样成形精度的影响

Fig. 12 Influence of coating times on the forming accuracy of the samples

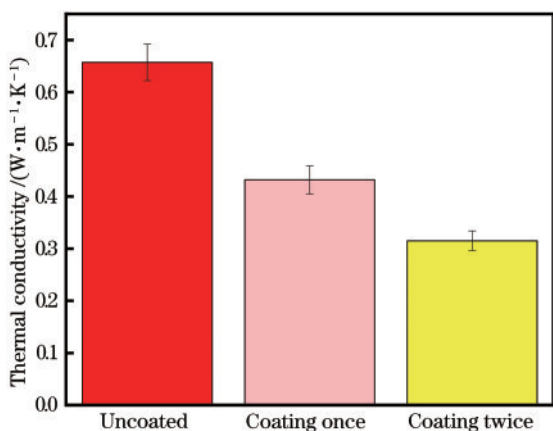


图 13 包覆次数对混合粉末导热系数的影响

Fig. 13 Influence of coating times on the thermal conductivity of mixed powder

对 SLS 成形技术要求较为苛刻。通过对酚醛树脂加入量、石墨粒径大小的选择以及包覆预处理 3 个方面的研究,用-100 目天然鳞片石墨粉末(包覆 2 次)与-200 目酚醛树脂粉末按质量比为 6:4 均匀混合后,成功制备出结构完整的类金刚石多孔石墨

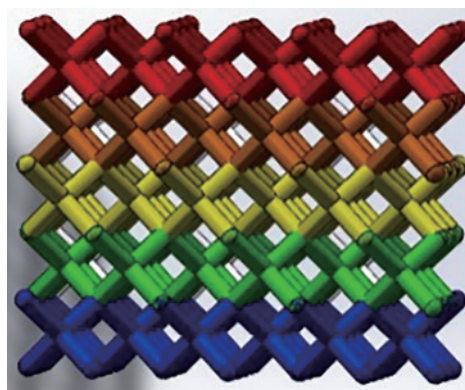


图 14 类金刚石结构的石墨骨架 CAD 模型

Fig. 14 CAD modeling of graphite skeleton with diamond-like structure

骨架,如图 15 所示。测量其 X、Y、Z 方向的尺寸相对误差分别为 8.92%、8.92% 和 13.65%,与包覆 2 次后测得的成形件精度基本一致。



图 15 类金刚石结构石墨骨架 SLS 成形件

Fig. 15 SLS molded part of graphite skeleton with diamond-like structure

## 4 结 论

石墨成形件的抗弯强度随着酚醛树脂加入量的增加而增大,随着石墨粒径的增大而增大,但其

成形精度的变化趋势则相反。当加入酚醛树脂的质量分数从 25% 增加到 40% 时,其抗弯强度呈现先增大后减小的变化趋势。适当增加酚醛树脂或者增大石墨粒径,不仅有助于提高堆积密度,还提高了混合粉末的导热系数,导致难以实现对石墨成形件抗弯强度和成形精度的协同。对天然鳞片石墨进行包覆预处理,可以在提高堆积密度的同时,减小混合粉末的导热系数。在酚醛树脂加入量相同的情况下(质量分数为 40%),采用-100 目天然鳞片石墨粉末制备的石墨成形件,其抗弯强度达到 1.932 MPa, X、Y、Z 方向的尺寸误差分别为 18.52%、18.53%、21.21%。利用经过 2 次包覆的-100 目天然鳞片石墨粉末制备得到的石墨成形件的抗弯强度达到 2.976 MPa,并成功制备出难以成形的复杂多孔的类金刚石结构石墨骨架,测试其 X、Y、Z 方向的尺寸误差分别为 8.92%、8.92% 和 13.65%,基本实现了抗弯强度和成形精度的协同。

### 参 考 文 献

- [1] Li H X, Yang B. Overview of graphite resources and industry in China [C]//Symposium on Refractory Materials, April 20, 2011, Zhengzhou, China. [S. l.][s. n.], 2011: 7-17.  
李红霞, 杨彬. 中国石墨资源和产业状况概述[C]//2011 年耐火原料学术交流会论文集, 2011-04-20, 郑州. [S. l.][s. n.], 2011: 7-17.
- [2] Liu H B. Discussion on natural flake graphite and synthetic graphite [J]. High-Technology & Industrialization, 2014(2): 44-49.  
刘洪波. 天然石墨与人造石墨刍议[J]. 高科技与产业化, 2014(2): 44-49.
- [3] The prospect of natural flake graphite [J]. Carbon Techniques, 2010, 29(2): 49.  
天然鳞片石墨的前景[J]. 炭素技术, 2010, 29(2): 49.
- [4] Christian J N. Selective laser sintering: a definition of the process and an empirical sintering model[D]. Texas: The University of Texas at Austin, 1993.
- [5] Chen S. Fabrication of PEM fuel cell bipolar plate by indirect selective laser sintering [J]. Strength of Materials, 2006, 20(10): 1356-1362.
- [6] Guo N 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): 3558-3566.
- [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, 2011, 60(1): 275-278.
- [8] Wu H H, Sun Y, Peng J H, et al. Effect of processing parameters on dimensional accuracy and bending strength of graphite flake/phenolic resin powder mixture in SLS process [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(13): 4497-4507.
- [9] Yan C Z. Preparation of polymer and its composite powders and their selective laser sintering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.  
闫春泽. 聚合物及其复合粉末的制备与选择性激光烧结成形研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [10] Zhang L. The research of the process and the key technology of selective laser sintering [D]. Jinan: Shandong University, 2007.  
张磊. 粉末激光烧结快速成型工艺及关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [11] Wang D N. Research on process parameter optimization and precision prediction model for selective laser sintering [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2019.  
王丹妮. 选择性激光烧结工艺参数优化与成型件精度预测模型研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.
- [12] Wu H H, Li T F, Xiao L N, et al. Research on forming process of flake graphite powder by selective laser sintering [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 101409.  
吴海华, 李腾飞, 肖林楠, 等. 鳞片石墨粉末选择性激光烧结成型工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 101409.
- [13] Li J C, Zhao Z, Yan R, et al. Process parameter optimization and mechanical properties of PA12/HA porous scaffold based on SLS [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1102003.  
李军超, 赵泽, 鄢然, 等. SLS 成形 PA12/HA 多孔支架的工艺参数优化及力学性能[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1102003.
- [14] Healy J J, de Groot J J, Kestin J. The theory of the transient hot-wire method for measuring thermal conductivity [J]. Physica B+C, 1976, 82(2): 392-408.
- [15] Dotchev K D, Dimov S S, Pham D T. Accuracy issues in rapid manufacturing cast form TM patterns [J]. Manufacture Engineers B, 2006, 221: 53-67.
- [16] Yang X W, Yang Y Q, Liu Y, et al. Study on



- dimensional accuracy of typical geometric features manufactured by selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0303004.
- 杨雄文, 杨永强, 刘洋, 等. 激光选区熔化成型典型几何特征尺寸精度研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303004.
- [17] Ho H C H, Cheung W L, Gibson I. Morphology and properties of selective laser sintered bisphenol A polycarbonate [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42(9): 1850-1862.
- [18] Yan C Z, Shi Y S, Yang J S, et al. Secondary sintering of selective laser sintering polymeric materials [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2008, 36(5): 86-89.
- 闫春泽, 史玉升, 杨劲松, 等. 高分子材料 SLS 中次级烧结实验 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 86-89.
- [19] Wu H H, Yan J N, Li T F, et al. Experimental study on molding precision for graphite/phenolic resin mixed powders processed by selective laser sintering [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 081405.
- 吴海华, 鄢俊能, 李腾飞, 等. 石墨/酚醛树脂混合粉末选择性激光烧结成型精度实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 081405.
- [20] Yan C Z, Shi Y S, Yang J S, et al. Application of polymeric materials in selective laser sintering ( II ): effects of polymer characteristics on forming [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2010, 26(8): 145-149.
- 闫春泽, 史玉升, 杨劲松, 等. 高分子材料在选择性激光烧结中的应用 ( II ): 材料特性对成形的影响 [J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(8): 145-149.