

熔丝打印多孔钨的组织及孔隙特性研究

王 杰¹, 李志瑶¹, 樊峰嵩¹, 徐海峰¹, 秦运璞¹, 吴昊阳^{1,2}, 秦明礼^{1,2,3}, 曲选辉¹

(1. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083)

(2. 北京科技大学 北京基因工程高精尖创新中心, 北京 100083)

(3. 辽宁材料实验室 材料智能技术研究所, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 采用熔丝制造 (fused filament fabrication, FFF) 技术制备多孔钨构件, 研究和表征了FFF打印的各阶段组织形貌以及最终多孔钨的孔隙特性。结果表明, 采用FFF技术成功制备了层间结合紧密、无缺陷的多孔钨构件。3 μm 商业钨粉的最大装载量可达到56%, 混炼后的喂料表现出良好的流变性能。此外, 研究了打印参数对生坯致密度的影响, 得到了最佳的打印参数: 喷嘴直径为0.6 mm, 层厚为0.1 mm, 打印速度为30 mm/s。FFF打印制备的多孔钨表现出均匀的孔隙分布。随着烧结温度的升高, 多孔钨孔径减小, 孔隙复杂程度增加, 硬度和抗压缩强度升高。

关键词: 多孔钨; 熔丝打印; 孔隙特性

中图分类号: TB383

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)11-2794-08

1 引言

金属钨由于其高熔点、高硬度、低膨胀系数以及低的饱和蒸气压等优异特性而被广泛应用于航天、军工和核工业等高温领域^[1-2]。内部具有多孔孔隙的钨(多孔钨)由于兼具金属钨的本征特性以及多孔金属材料的高比表面、高渗透性等特点,在微型卫星、微电子设备等新兴技术领域发挥着不可替代的作用,如场发射推进器(field emission electric propulsion, FEEP)的发射极以及光刻机光源系统的液态金属过滤器等^[3-4]。在这些新兴领域应用的同时,对多孔钨部件的形状提出了更高的要求,即形状结构的微型化和复杂化。如何满足日益复杂的多孔钨形状结构需求,已成为推动其实际应用发展的关键挑战。

金属钨硬度高、脆性大,其多孔构件无法直接通过机械加工制备。传统工艺是先采用粉末冶金的方法制备出可加工的钨铜合金,加工成所需形状构件后,再将铜去除。该方法不仅工艺复杂、材料利用率低,而且易造成构件的残铜污染。增材制造技术是按照设定的三维模型,采用逐层打印的方式直接得到目标形状构件,无须再次加工^[5-7],是目前制备复杂构件的主要方法之一。根据能量的输入,增材制造主要可分为直接打印和间接打印。直接打印是采用高能束对金属粉末进行快速融化和凝固,打印结束后即可得到最终成形件。已有大量研究围绕打印参数、合金化元素、粉末粒度以及杂质含量等对成形性能的影响展开探讨^[8-10]。然而,由于金属钨具有高导

热性和高的韧脆转变温度,在快速凝固过程中易产生较大的残余应力,从而诱发微裂纹的产生和扩展,这严重限制了其直接打印的可行性^[11]。此外,直接打印设备昂贵,且对粉末颗粒要求严格^[12]。相比之下,间接打印则是通过粘结剂辅助构建预成形体,并经后续脱脂、烧结等步骤获得最终产品。该方法通过烧结的方式实现致密化,可有效减轻热应力的影响,同时还具备成本低、粉末适应性强等优势。此外,与目前广泛应用的注射成形技术相比,间接打印无需定制昂贵模具,并规避了脱模过程对复杂几何结构设计的限制。基于此,间接打印技术是目前最有望解决复杂形状多孔钨构件制备难题的方法之一。间接打印技术目前应用较广,主要有粘结剂喷射成形技术、光固化成形技术和材料挤出成形技术。材料挤出成形技术又可分为粉末挤出打印(powder extrusion printing, PEP)和熔丝制造(fused filament fabrication, FFF)技术。两者技术原理相同,区别在于输入原料的差异(颗粒和丝状)^[13-15]。

FFF作为一种新兴的间接3D打印技术,其制备过程主要可以分为制丝、打印、脱脂和烧结四个部分,具有设备简单、成本低、材料适用范围广以及适合多材料界面设计等特点^[16-20]。FFF打印的基本原理为:熔融的丝材(丝形喂料)经高温喷嘴挤出后,按照计算机辅助设计(CAD)模型以逐层方式在基板上沉积,直至搭建出所需几何形状样品,打印过程如图1所示。在FFF打印的过

收稿日期: 2025-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(52131307, 52130407)

作者简介: 王 杰, 男, 1993年生, 博士, 北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083, 电话: 010-82377286, E-mail: wangjie03@126.com

程中, 喂料流变性能和打印参数是影响打印效果的关键因素。流变性能会影响喂料的挤出及沉积过程, 差的流变性可能会导致挤出困难、垂料和层间结合不良等问题。而层厚、路径宽度和打印角度等打印参数的不同则会直接改变打印件的构建方式, 进而影响打印件的质量。Caminero 等^[21]研究发现大的喷嘴直径会显著降低 FFF 打印件的尺寸精度、表面粗糙度和孔隙率。Hassan 等^[22]研究了打印参数对 316L 不锈钢烧结特性的影响, 结果表明打印速度是调控样品孔隙的关键参数, 孔隙随着挤出速度的升高而增加。因此, 研究喂料的流变行为及打印参数的影响对于减少打印缺陷、提高构件质量具有重要意义。

尽管 FFF 技术已成功应用于生产陶瓷^[23-24]、高速钢^[25]和 WC-Co^[26-27]合金等材料, 但其在钨和其他高性能金属材料中的应用仍未得到充分探索。本文采用低成本的商业钨粉作为原料粉末, 采用 FFF 打印技术制备了无缺陷的特定形状多孔钨构件, 并着重关注了制备过程中工艺参数的影响以及组织和孔隙特性的变化。

2 实验

本研究所使用的 3 μm 商业钨粉购自厦门钨业有限公司, 纯度≥99.9%。粉末形貌及其粒度分布如图 2 所示。从图 2 中可以看出商业粉末存在着团聚现象, 且粒度分布较宽, 这是由于粉末粒度较细造成的。一般认为, 粒度低于 10 μm 的粉末都会存在着团聚问题。

FFF 打印制备多孔钨的工艺流程为: (1) 钨粉和粘结剂在密炼机(185 ℃)中混合 1 h, 制备得到混合均匀的喂料。其中粘结剂的成分及密度如表 1 所示。(2) 喂料通过挤出机挤出, 得到打印用丝材。(3) 按照 CAD 切片模型打印得到特定形状生坯。(4) 采用环己烷对打印生坯进行溶剂脱脂 12 h 后, 于脱脂烧结炉中在氢气氛围下进行热脱脂和烧结以得到最终产品。脱脂烧结曲线如图 3 所示, 多段的热脱脂工艺是为了保证粘结剂的完全去除以及坯体形状的保持。

采用 SU-8100 扫描电镜对粉末、喂料和多孔钨的显

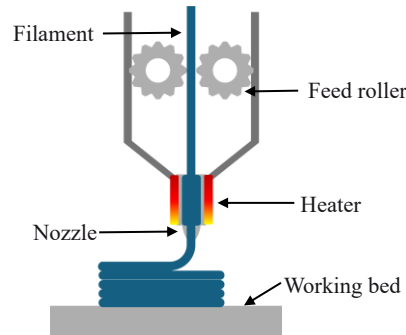


图 1 FFF 打印示意图
Fig.1 Schematic diagram of FFF printing process

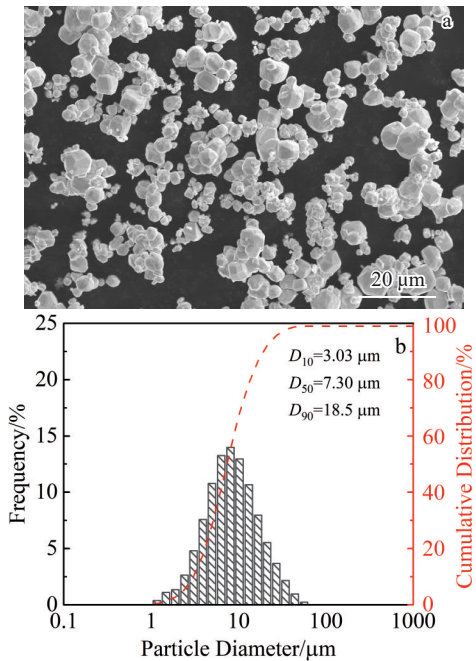


图 2 钨粉末形貌及粒度分布
Fig.2 Morphology (a) and particle diameter distribution (b) of tungsten powder

表 1 粘结剂组成及密度		
Table 1 Composition and density of binder		
Composition	Content/wt%	Density/g·cm ⁻³
PW	30	0.90
SEBS	35	0.91
SA	10	0.95
HDPE	25	0.96

Note: PW: paraffin wax; SEBS: styrene-ethylene-butylene-styrene; SA: stearic acid; HDPE: high density polyethylene

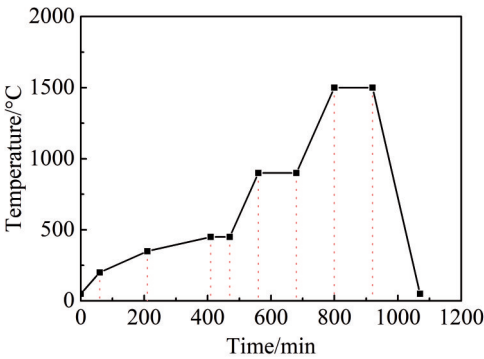


图 3 脱脂烧结曲线
Fig.3 Debinding and sintering curves

微组织进行表征。通过 HELOS-OASIS 激光粒度分析仪测试粉末的粒度及其分布。采用 ZJL-200 转矩流变仪对不同装载量喂料进行混合, 混合温度和转子速度分别设定为 185 ℃ 和 60 r/min。记录混合扭矩与时间的关系, 以评估混合过程。采用 RH2000 毛细管流变仪对不同温度

下的喂料进行粘度测试。使用配备有 0.98 N 负载的 MH-6 显微硬度计在抛光横截面上测量维氏显微硬度,持续时间为 15 s。以 0.5 mm/min 的应变率在万能材料试验机 (Instron 5982) 上进行室温压缩试验。采用 AutoPore 9500 全自动压汞仪对烧结多孔钨的孔隙特性进行表征。孔隙的分形维数是根据 MIP 分形模型推导计算得到的,满足关系如式(1)所示:

$$\ln\left(\frac{W_n}{r_n^2}\right) = D \ln\left(\frac{V_n^{\frac{1}{3}}}{r_n}\right) + C_0 \quad (1)$$

$$W_n = \sum_i^n P_i \Delta V_i \quad (2)$$

式中, W_n 为累计进汞做功, V_n 为累计进汞量, r_n 为样品中汞可进入的最小孔隙直径, D 为分形维数, C_0 为常数, P_i 为最大进汞压力, V_i 为各阶段累计进汞量, n 为进汞阶段数。通过式(2)可得到 W_n 的值。对式(1)进行线性拟合,拟合直线的斜率则为多孔孔隙的分形维数。

3 结果与讨论

3.1 装载量

与传统的全部由热塑性聚合物构成的丝材不同, FFF 打印用丝材是由粉末和粘结剂均匀混合后挤出得到的。固相粉末的引入带来了丝材负载的问题。虽然高的装载量有助于抑制脱脂与烧结过程中可能出现的结构坍塌、高收缩及尺寸公差失控等问题^[27],但过高的粉末含量会导致喂料黏度增大,挤出困难,并可能引发开裂缺陷等。因此,选择合适的装载量是打印高质量构件的前提。

根据 Hausnerova^[28]、Mukund^[29]和 Park^[30]等的研究报道,扭矩测试可以作为一种确定喂料均匀性和临界装载量的有效方法。扭矩反映了喂料对剪切的抵抗,扭矩的值越稳定,则喂料组分越均匀。图 4 为扭矩随时间和装载量的变化。在所有装载量下,伴随着粉末的加入以及混合的进行,喂料的扭矩表现出先升高后降低的趋势。粉末装载量在 50%~56% 区间内,扭矩随时间的增加迅速下降并趋于稳定。这表明在该装载量下粘结剂的量足够

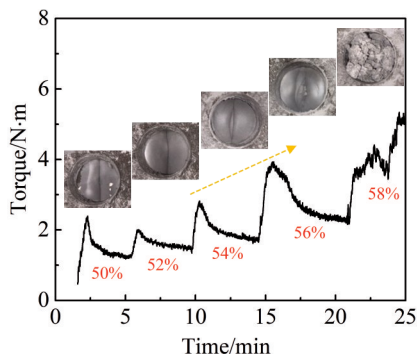


图4 扭矩随时间和装载量的变化

Fig.4 Variations of torque with time and solid loading

包裹粉末和填充粉末间的空隙,通过持续的混合实现了组分的均匀分布。此外,还发现装载量越高,扭矩的稳定值越大,这是由于喂料粘度的增大所导致的。装载量的增加意味着提供流动性的粘结剂的占比减少,喂料粘度增大,抵抗剪切的力增加。当装载量提高至 58% 时,扭矩短暂下降后迅速提升且无法达到稳定状态。这是因为所有粘合剂都被锁定在颗粒空隙中,粉末颗粒直接接触摩擦,进而导致扭矩迅速升高且剧烈波动。从宏观形貌中可以直接观察到喂料的混合状态。与其它装载量所表现出的光滑表面不同,装载量 58% 的喂料出现明显开裂,这再次表明了粘结剂的不足。上述结果表明,装载量 58% 已超过该体系所能容纳的极限,喂料的临界负载量为 56%。

高的装载量意味着低的收缩,因此选择装载量 56% 的喂料进行后续的挤出制丝。图 5a 为丝材的显微形貌,可以看出在该装载量下,粉末与粘结剂间结合良好且均匀分布,未发现明显孔洞。丝材表面光滑且表现出高的尺寸一致性,这得益于合适装载量和均匀的组分分布促进了挤出时喂料的稳定流动。此外,丝材表现出较好的韧性,这对于丝材的存放、运输和打印环境的适应具有积极的作用。

3.2 流变性能

粘度是衡量熔体流变行为的最重要指标,表征了熔体抵抗外力引起流动变形的能力,受剪切速率和温度的影响。图 6a 为不同温度下粘度随剪切速率的变化关系。可以看出,粘度随着剪切速率的增加而降低,表现出明显的剪切稀化行为。剪切稀化是打印过程中所期望的,它有助于获得低粘度的喂料,这对于打印中的连续挤出具

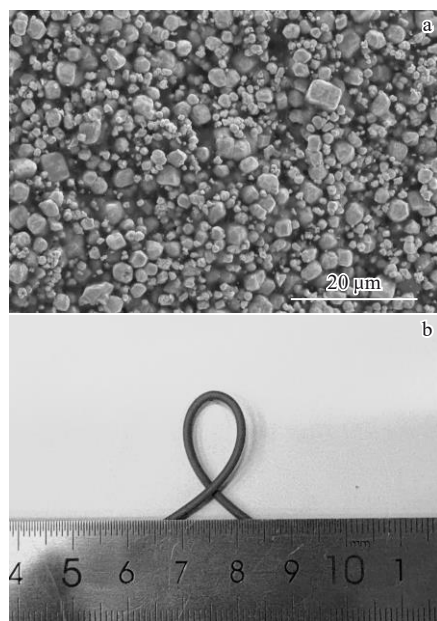


图5 丝材的显微形貌及实物图

Fig.5 Microstructure (a) and appearance (b) of the filament

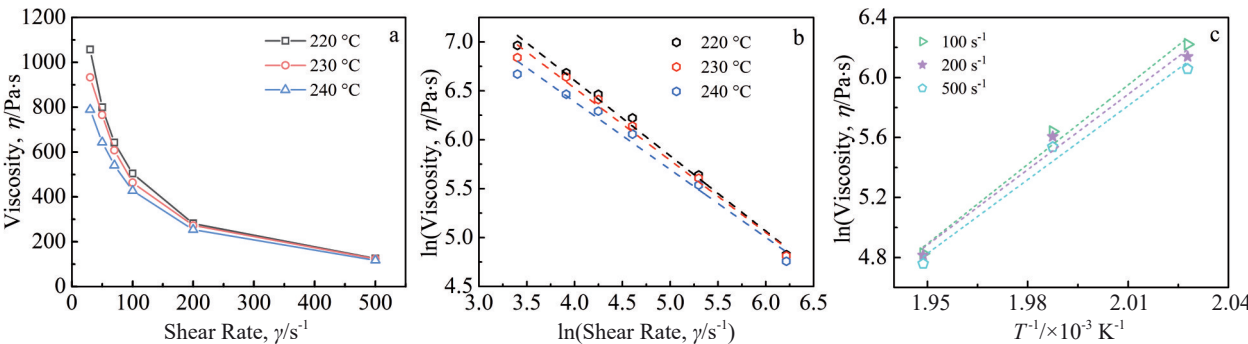


图6 粘度随剪切速率和温度的变化
Fig.6 Variations of the viscosity with shear rate and temperature

有积极的作用^[31-33]。此外,在相同剪切速率下,粘度随温度的升高而降低,这是由于高温下粘结剂分子间吸引力减弱所引起的。

为了量化喂料粘度与剪切速率之间的关系,引入了流动行为指数 n 。 n 值表示喂料对剪切速率的敏感性, n 值越小,剪切稀化能力越强。对于假塑性流体,在给定温度下喂料粘度和剪切速率之间的关系可以用公式(3)来描述^[34]:

$$\eta = K\gamma^{n-1}$$

(3)

式中, η 是喂料的粘度, K 是常数, γ 是剪切速率。通过对公式(3)两端取对数后(如图6b所示),可求得流动行为指数 n 。表2给出了不同温度下喂料的 n 值,可以看出 n 值都较小,未超过0.3。这表示喂料对剪切速率具有高的敏感性,有利于后续打印中通过改变打印速度来调整喂料的流动和挤出。此外,喂料在不同温度下都表现出强的剪切稀化能力,表明该喂料能够适应不同打印温度的需求。

流动活化能 E 反映了喂料粘度对温度的敏感性,较高的 E 值意味着温度敏感性高,易通过改变温度来得到低粘度的喂料。假塑性流体满足 Arrhenius 方程^[35]:

$$\eta = \eta_0 e^{E/RT}$$

(4)

式中, η_0 是参考粘度, R 是气体常数, T 是温度。 E 值可以通过 $\ln\eta-1/T$ 的斜率计算得出,如图6c所示。不同温度下的 E 值较大且相近,表明喂料在不同剪切速率下都具有较高且稳定的温度敏感性,这意味着在不同的打印速度下都可以通过改变打印温度来调控喂料的流动和挤出。

表2 丝材的流动行为指数(n)和活化能(E)

Table 2 Flow behavior index (n) and flow activation energy (E) of the filament at different temperatures

Temperature/ °C	n	$E_{100\text{ s}^{-1}}/kJ\cdot\text{mol}^{-1}$	$E_{200\text{ s}^{-1}}/kJ\cdot\text{mol}^{-1}$	$E_{500\text{ s}^{-1}}/kJ\cdot\text{mol}^{-1}$
220	0.23			
230	0.26	146.7	139.2	136.5
240	0.30			

基于高的剪切稀化能力以及温度敏感性,制备的喂料表现出良好的流变性能,能够满足FFF打印的要求,这也在后续的打印过程中得到了验证。

3.3 打印参数

构件的打印易受多种因素干扰,除保证优异的流变性能之外,选择合理打印参数同样至关重要^[36-37]。为了量化打印参数对构件生坯的影响,选择了相对密度作为衡量的指标。较低的坯体致密度通常意味着内部存在孔隙及宏观缺陷,这类结构缺陷会显著劣化最终烧结件的力学性能及使用可靠性。

打印坯体的相对密度是通过实际密度与理论密度之比计算得到的。实际密度采用阿基米德排水法直接测得,理论密度可以通过式(5)计算得出:

$$\rho_t = \phi\rho_p + (1 - \phi)\rho_b$$

(5)

式中, ρ_t 为喂料的理论密度, ϕ 为粉末装载量, ρ_p 为钨粉的理论密度,为19.3 g/cm³, ρ_b 为粘结剂的理论密度,可通过式(6)计算得出:

$$\rho_b = \frac{100}{\sum \frac{W_i}{\rho_i}}$$

(6)

式中, ρ_b 为0.923 g/cm³, W_i 为100 g粘结剂中某组元所占的质量; ρ_i 为某粘结剂组元的密度。粘结剂的组成和密度如表1所示。喂料的装载量 ϕ 为56%,经计算打印生坯的理论密度为11.24 g/cm³。

图7为不同打印参数(层厚、喷嘴直径和打印速度)对打印坯体相对密度的影响。可以看出随着层厚的增加,坯体的致密度逐渐下降。这是因为较小的层厚会显著降低层间空隙,进而提高生坯的相对密度。此外,从喷嘴直径来看,最小喷嘴直径(0.5 mm)打印的生坯反而具有最低的致密度,这可能与所需的高压强导致的挤出困难有关。采用0.6和0.7 mm喷嘴得到的坯体致密度相近,出于表面粗糙度角度考虑,优先选择直径较小(0.6 mm)的喷嘴。从打印速度上看,中等(30 mm/s)的打印速度却表现出最高的致密度。这是因为在高打印速度下增加了

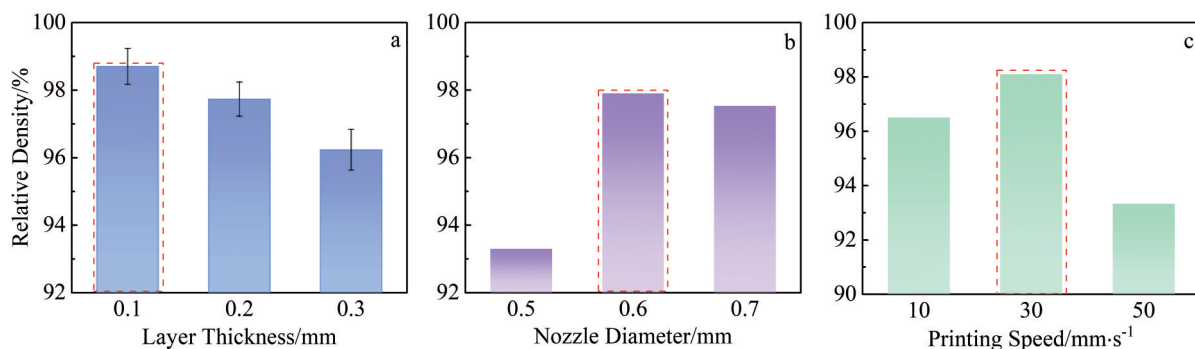


图7 打印参数对相对密度的影响

Fig.7 Influences of printing parameters on relative density: (a) layer thickness, (b) nozzle diameter, and (c) printing speed

丝间、层间结合的控制难度,易导致孔洞等缺陷的产生。而低的打印速度则意味着较高的粘度和低的打印速率。综上所述,最优的打印参数是:喷嘴直径为0.6 mm,层厚为0.1 mm,打印速度为30 mm/s。

3.4 孔隙特性

打印坯体需经脱脂烧结后才能得到最终的构件。在烧结过程中,由于原子的扩散,坯体从相对松散的堆积态转变为具有一定强度的钨骨架,在此过程中伴随着颗粒的结合长大以及孔隙的收缩。图8为坯体相对密度和晶粒尺寸随烧结温度的变化。在1500~1700 °C的温度区间内,相对密度快速升高,表明坯体处于致密化为主导的烧结阶段。该阶段大量的开放孔隙提供了较高界面能驱动力,同时对晶界迁移产生钉扎作用,致使晶粒长大缓慢。随着温度进一步升高,孔隙逐渐收缩并趋于封闭,体系界面能降低,致密化速率明显减缓。与此同时,孔隙对

晶界迁移的钉扎作用减弱,晶粒长大行为增强,晶粒尺寸显著增加。

图9为不同烧结温度下多孔钨的断口和表面形貌。可以看出所有多孔钨的孔隙都具有相对均匀的分布,无明显孔洞。在烧结温度1500 °C下,颗粒间结合相对松散,部分骨架还仍保持着原始粉末的形貌特征,孔隙大小分布较宽。在1600 °C下,烧结颈显著粗化,骨架颗粒间的结合增强。当温度到达1700 °C时,骨架颗粒结合长大明显,孔隙数量显著减少。在1800 °C时,样品致密度进一步提高,达到88.5%,孔隙连通性降低,出现大量的封闭孔隙。

为进一步探究多孔钨的孔隙特性,本研究对具有较高孔隙率的多孔钨进行了压汞法测试,对应烧结温度为1500、1600、1700 °C。图10a为不同烧结温度下多孔钨的孔隙分布图。可以看到所有多孔钨的孔隙都为单峰分布,表现出均匀的孔径分布。多孔钨的平均孔径分别为1112、1076、1052 nm(图10b)。随着烧结温度的升高,伴随着骨架颗粒的长大和孔隙的收缩,平均孔径逐渐减小。值得注意的是,在1600和1700 °C烧结的多孔钨的平均孔径分别为1076和1052 nm,两者相差不大。这是由于孔粗化机制导致的^[38-39],伴随着小孔的消失,大孔尺寸的增加导致最终平均孔径变化较小。

孔隙的复杂性是表征多孔孔隙的重要参数,对多孔钨的渗透性、吸附性能和传质性能有重要影响^[40-41]。分形维数是衡量孔隙结构复杂性和不规则性的有效指标。分形维数越大,孔隙结构越复杂,孔隙分布越不规则。图10b显示了不同多孔钨的分形维数。随着烧结温度的升高,多孔钨的分形维数增加。可以得出,多孔孔隙的复杂性随着孔隙率的减小而增加。

此外,还对多孔钨的力学性能进行了探究。图11为不同多孔钨的硬度和抗压缩强度,在不同烧结温度下,多孔钨的平均硬度(HV_{0.1})分别为87.0、111.1、162.8,抗压缩强度分别为328.5、445.2、759.8 MPa。随着烧结温度的升高,多孔钨的硬度和强度都有显著升高。多孔钨力学性

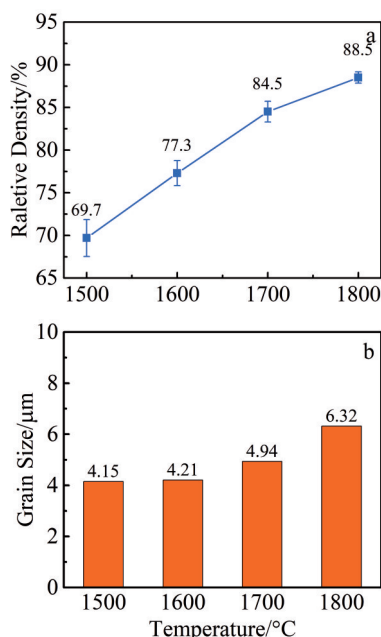


图8 多孔钨相对密度和晶粒尺寸随温度的变化

Fig.8 Variations of relative density (a) and grain size (b) of porous tungsten with sintering temperature

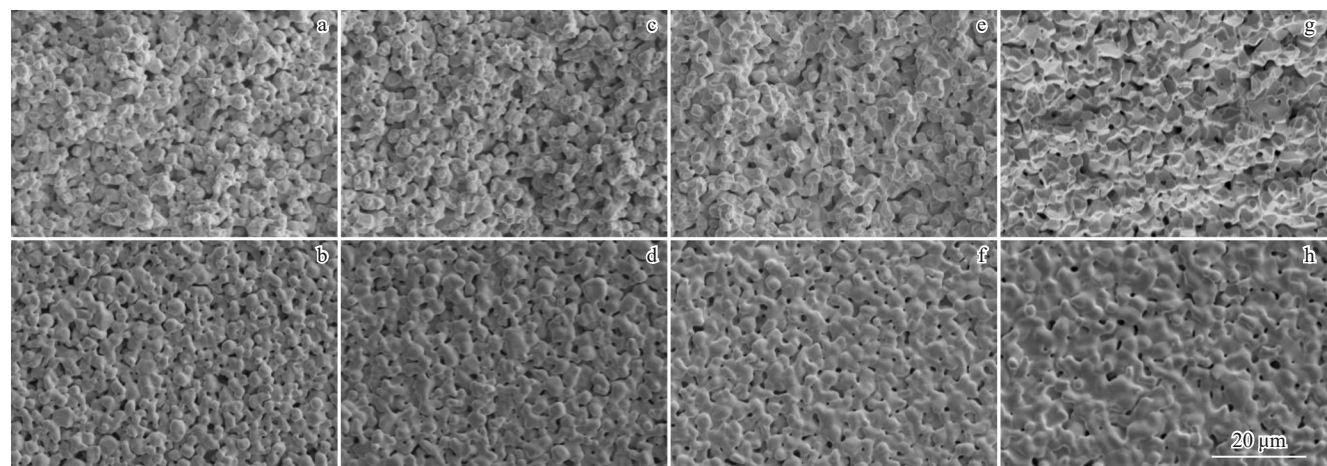


图9 不同烧结温度下多孔钨的断口和表面形貌

Fig.9 Fracture (a, c, e, g) and surface morphologies (b, d, f, h) of porous tungsten at different sintering temperatures: (a–b) 1500 °C; (c–d) 1600 °C; (e–f)1700 °C; (g–h) 1800 °C

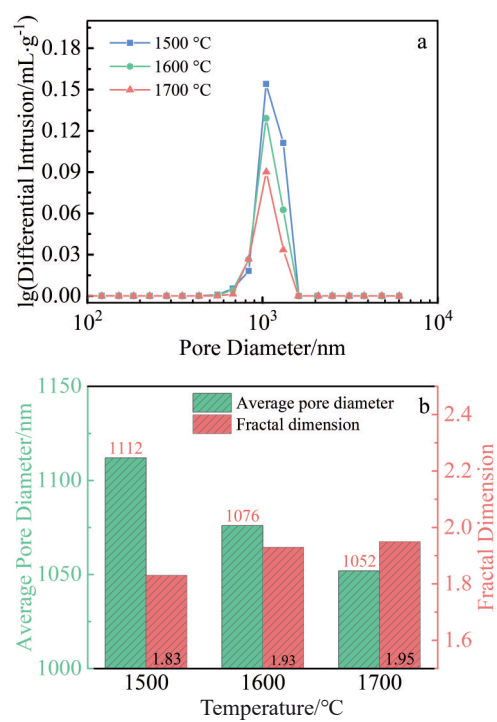


图 10 不同烧结温度下多孔钨的孔隙特性

Fig.10 Pore characteristics of porous tungsten at different sintering temperatures: (a) differential intrusion vs. pore diameter; (b) average pore diameter and fractal dimension vs. temperature

能的提升来源于孔隙的减少和骨架颗粒结合长大。针对对于不同需求的多孔钨构件,需要协调和满足力学性能同孔隙之间的关系。

打印和烧结构件(1600 °C)实物如图 12a 所示,可以看出经脱脂烧结后,构件虽发生了明显体积收缩,但其保持了良好的结构形状,无明显变形。高的烧结保形性源自于长时间热脱脂导致的粉末活性降低以及高的装载量。图 12b 为烧结构件在不同方向上的收缩,结果显示

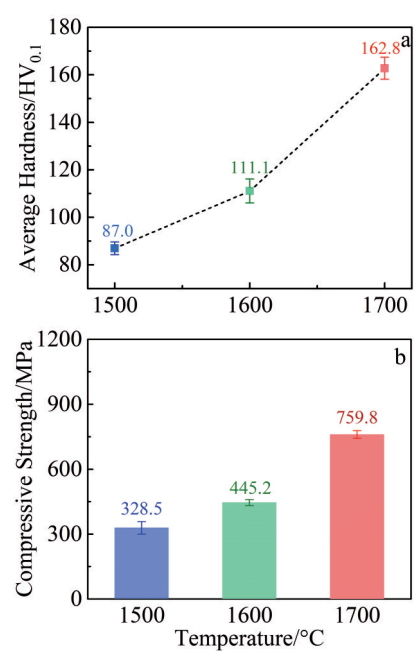


图 11 不同烧结温度下多孔钨的力学性能

Fig.11 Mechanical properties of porous tungsten at different sintering temperatures: (a) average hardness and (b) compressive strength

构件在 Z 轴方向(14.4%)较 XY 轴方向(10.2%)具有更高的收缩率,这可能是由于重力以及层间微间隙所引起的。图 13 为低倍下多孔钨构件的形貌。可以看出层与层之间整齐排列且紧密结合,层厚均匀一致,未发现下沉、孔洞等缺陷。从上表面可以看出在单打印层上,走丝均匀规则,丝间结合强。此外,打印件断口平整、组织均匀,未出现开裂、打印空洞等情况。上述结果表明采用 FFF 技术实现了表面质量良好、孔隙均匀分布、无缺陷的多孔钨构件的打印。

总体而言,本研究验证了采用 FFF 打印制备多孔钨

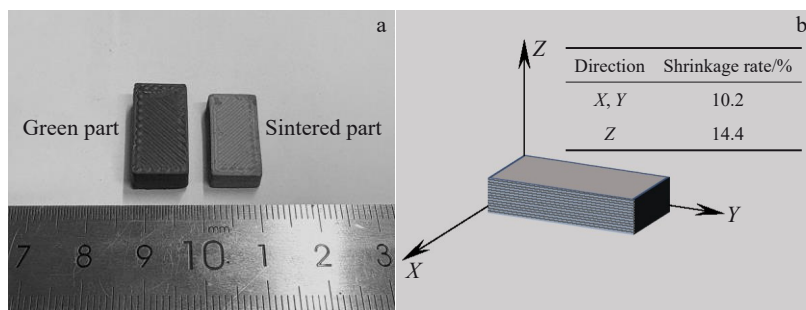


图 12 多孔钨构件的实物图和示意图

Fig.12 Appearance (a) and schematic diagram (b) of porous tungsten components

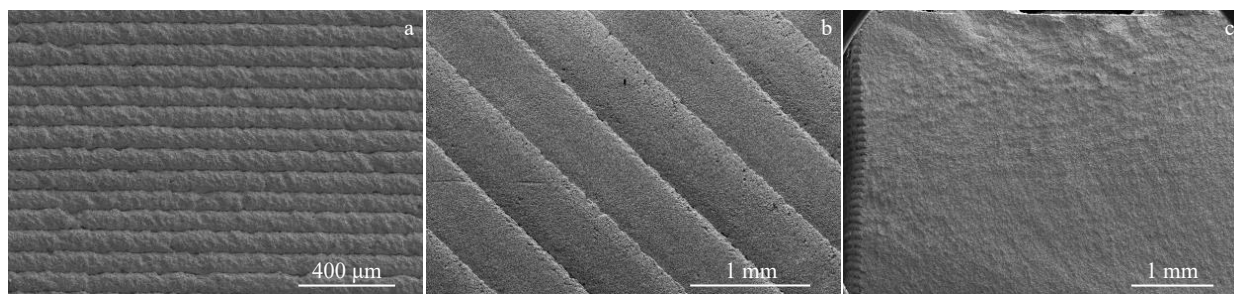


图 13 低倍下多孔钨构件形貌

Fig.13 Morphologies of porous tungsten component at low magnification: (a) side surface, (b) top surface, and (c) cross-section

构件的技术可行性。然而,在实现规模化生产方面仍面临诸多技术挑战,包括高装载量丝材的稳定制备、钨丝材流动性不足所引起的打印过程稳定性问题,以及多孔钨构件的尺寸精度控制等。因此,相关技术参数与材料(粉末和粘结剂)体系仍需进一步系统探究和优化。

4 结论

1)采用 FFF 技术成功制备了层间结合紧密、无缺陷的多孔钨构件。

2)3 μm 商业钨粉的最大装载量可达到 56%,混炼后的喂料表现出良好的流变性能。

3)最佳打印参数为喷嘴直径为 0.6 mm、层厚为 0.1 mm 以及打印速度为 30 mm/s。

4)采用 FFF 打印制备的多孔钨表现出均匀的孔隙分布。随着烧结温度的升高,多孔钨孔径减小,孔隙复杂程度增加,硬度和压缩强度升高。

参考文献

References

- [1] Morcos P, Elwany A, Karaman I *et al. Journal of Materials Science*[J], 2022, 57(21): 9769
- [2] Wurster S, Baluc N L, Battabyal M *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2013, 442(1): S181
- [3] Sun Q, Qi H M, Wang X B *et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*[J], 2024, 73: 1
- [4] Tajmar M, Scharlemann C A, Genovese A *et al. Ultramicroscopy*[J], 2009, 109(5): 442
- [5] Gonzalez-Gutierrez J, Cano S, Schuschnigg S *et al. Materials*[J], 2018, 11(5): 840
- [6] Ligon S C, Liska R, Stampfl J *et al. Chemical Reviews*[J], 2017, 117(15): 10212
- [7] Singh A V, Ansari M H D, Wang S *et al. Applied Sciences*[J], 2019, 9(4): 811
- [8] Yamamoto T, Hara M, Hatano Y J. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2021, 100: 105651
- [9] Kim J M, Jin H H, Kwon J *et al. Materials Characterization*[J], 2022, 194: 112364
- [10] Chen Wenlian(陈文练), Yang Yihang(杨益航), Chen Xiaohong(陈晓红) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(11): 3922
- [11] Zhou Muhua(周木华), Zhao Congcong(赵聪聪). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(2): 490
- [12] Li X P, Ji G, Chen Z *et al. Acta Materialia*[J], 2017, 129: 183
- [13] Kuznetsov V E, Solonin A N, Tavitov A *et al. Rapid Prototyping Journal*[J], 2019, 26(1): 107
- [14] Gonabadi H, Yadav A, Bull S J. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2020, 111(3): 695
- [15] Fico D, Rizzo D, Casciaro R *et al. Polymers*[J], 2022, 14(3): 465
- [16] Kechagias J, Chaidas D, Vidakis N *et al. Materials and Manufacturing Processes*[J], 2022, 37(9): 963
- [17] Cuan-Urquiza E, Barocio E, Tejada-Ortigoza V *et al. Materials*[J], 2019, 12(6): 895
- [18] Wu Y X, German R M, Blaine D *et al. Journal of Materials*

- Science*[J], 2002, 37(17): 3573
- [19] Naranjo J A, Berges C, Campana R *et al. Results in Engineering*[J], 2023, 19: 101258
- [20] Zhang Lei(张 磊), Tian Dongbin(田东斌), Wu Quan(伍 权) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(11): 3909
- [21] Caminero M Á, Romero G A, Chacón J M *et al. Rapid Prototyping Journal*[J], 2022, 28(10): 2004
- [22] Hassan W, Farid M A, Tosi A *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2021, 114(9): 3057
- [23] Vozarova M, Neubauer E, Bača Ľ *et al. Journal of the European Ceramic Society*[J], 2023, 43(5): 1751
- [24] Nötzel D, Eickhoff R, Hanemann T. *Materials*[J], 2018, 11(8): 1463
- [25] Naranjo J A, Berges C, Gallego A *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2021, 11: 1534
- [26] Rubiano B J D, Gil P A F, Boyacá M L A *et al. Journal of Manufacturing and Materials Processing*[J], 2024, 8(3): 118
- [27] Yang Y K, Zhang C Q, Wang D Y *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2020, 108(5): 1653
- [28] Hausnerova B, Mukund B N, Sanetrik D. *Powder Technology*[J], 2017, 312: 152
- [29] Mukund B N, Hausnerova B, Shivashankar T S. *Powder Technology*[J], 2015, 283: 24
- [30] Park J M, Han J S, Gal C W *et al. Powder Technology*[J], 2018, 330: 19
- [31] Machaka R, Ndlangamandla P, Seerane M. *Powder Technology*[J], 2018, 326: 37
- [32] Venkataraman N, Rangarajan S, Matthewson M J *et al. Rapid Prototyping Journal*[J], 2000, 6(4): 244
- [33] Singh P, Balla V K, Tofangchi A *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2020, 91: 105249
- [34] Wang J H, Shi Q N, Wu C L *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23(9): 2605
- [35] Sotomayor M E, Várez A, Levenfeld B. *Powder Technology*[J], 2010, 200(1): 30
- [36] Sun X C, Mazur M, Cheng C T. *Additive Manufacturing*[J], 2023, 67: 103463
- [37] Ren L Q, Zhou X L, Song Z Y *et al. Materials*[J], 2017, 10(3): 305
- [38] German R M. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2020, 89: 105214
- [39] German R M. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*[J], 2010, 35(4): 263
- [40] Wang J Y, Jiang F J, Zhang C L *et al. Energy & Fuels*[J], 2021, 35(5): 3887
- [41] Tang H P, Wang J Z, Zhu J L *et al. Powder Technology*[J], 2012, 217: 383

Research on the Microstructure and Pore Characteristics of Fused Filament-Fabricated Porous Tungsten

Wang Jie¹, Li Zhiyao¹, Fan Fengsong¹, Xu Haifeng¹, Qin Yunpu¹, Wu Haoyang^{1,2}, Qin Mingli^{1,2,3}, Qu Xuanhui¹

(1. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(3. Institute of Materials Intelligent Technology, Liaoning Academy of Materials, Shenyang 110004, China)

Abstract: Porous tungsten structures were prepared by fused filament fabrication (FFF). The microstructural evolution at each stage of the FFF process and the final pore characteristics of the sintered tungsten were investigated systematically. The results show that porous tungsten components with tightly bonded layers and no defects are successfully prepared by FFF. The maximum loading of commercial tungsten powder with a particle size of 3 μm reaches 56%, and the compounded feedstock exhibits excellent rheological properties. Furthermore, the influence of printing parameters on the green density was investigated, identifying the optimal combination: the nozzle diameter of 0.6 mm, a layer thickness of 0.1 mm, and the printing speed of 30 mm/s. The porous tungsten prepared by FFF shows a uniform pore distribution. As the sintering temperature increases, the average pore size decreases, the complexity of the pores increases, and the hardness and compressive strength increase.

Key words: porous tungsten; FFF; pore characteristic

Corresponding author: Qin Mingli, Ph. D., Professor, Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-82377286, E-mail: qinml@mater.ustb.edu.cn