

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.03.07

# 粉末挤出成形制备 WC-10Ni 叶轮的工艺与性能研究

谭鑫<sup>1,2</sup>, 赵雪岑<sup>1\*</sup>, 程灵钰<sup>3</sup>, 杨佳明<sup>1</sup>

1. 中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室, 四川 成都 610213
2. 核能增材制造四川省重点实验室, 四川 成都 610213
3. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245

**摘要:** 为提升磨蚀-腐蚀复合工况下运行泵的使用寿命, 采用兼具高耐磨性与高耐腐蚀性的碳化钨(WC)材料制备叶轮是关键。以 WC-10Ni 为研究对象, 采用粉末挤出成形(PEP)增材制造技术, 系统研究了工艺参数对生坯成形精度的影响规律, 以及烧结工艺对材料微观组织的调控机制。结果表明, 更高的生坯成形精度能有效减少内部缺陷, 经分布脱脂与 1 520 °C 低压烧结后, 所得 WC-10Ni 合金微观组织晶粒细小、分布均匀, 致密度高, 其综合力学性能显著优于传统粉末冶金方法制备的对比样件。基于上述方法, 完成了尺寸为  $\varnothing 233 \text{ mm} \times 93 \text{ mm}$  的高致密度 WC-10Ni 叶轮制备。本研究可为高性能、复杂结构碳化钨零部件的制备提供指导。

**关键词:** 碳化钨; 粉末挤出成形工艺; 力学性能; 叶轮

中图分类号: TF124 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)03-0054-06

## Process and Properties of WC-10Ni Impellers Fabricated by Powder Extrusion Printing

TAN Xin<sup>1,2</sup>, ZHAO Xuecen<sup>1\*</sup>, CHENG Lingyu<sup>3</sup>, YANG Jiaming<sup>1</sup>

1. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China
2. Nuclear Power Additive Manufacturing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610213, China
3. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer, Shanghai, 200245, China

**Abstract:** To enhance the service life of pumps operating under combined erosion-corrosion conditions, the fabrication of impellers using tungsten carbide (WC), known for its exceptional wear and corrosion resistance, is crucial. This study employs Powder Extrusion Printing (PEP), an additive manufacturing technology, to fabricate WC-10Ni components. The work systematically investigates the influence of process parameters on the forming accuracy of green bodies and the effect of sintering parameters on the microstructure of the material. The results indicate that higher green body forming accuracy effectively minimizes internal defects. After distributed debinding and low-pressure sintering at 1 520 °C, the resulting WC-10Ni alloy exhibits a fine and uniform microstructure, high density, and mechanical properties significantly superior to those of samples prepared by conventional powder metallurgy methods. Based on the optimized process, a high-density WC-10Ni impeller measuring  $\varnothing 233 \text{ mm} \times 93 \text{ mm}$  was successfully fabricated. This study provides valuable guidance for the manufacturing of high-performance tungsten carbide components with complex geometries.

**Keywords:** WC; powder extrusion printing; mechanical properties; impeller

引用格式: 谭鑫, 赵雪岑, 程灵钰, 等. 粉末挤出成形制备 WC-10Ni 叶轮的工艺与性能研究[J]. 电焊机, 2026, 56(3): 54-59.

Citation: TAN Xin, ZHAO Xuecen, CHENG Lingyu, et al. Process and Properties of WC-10Ni Impellers Fabricated by Powder Extrusion Printing [J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(3): 54-59.

收稿日期: 2025-12-15 修回日期: 2026-02-11

作者简介: 谭鑫(1994—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事泵阀设计。E-mail: tanxin@npc.ac.cn.

通讯作者: 赵雪岑, zhaoxuecen1983@sina.com。

## 0 引言

叶轮是泵类设备的核心部件,其主要作用是将电机的机械能转化为液体的能量,从而获得动能或压力能,因此叶轮的性直接影影响泵设备的工作效率和性能。叶轮的性主要受结构、材料及制造工艺的影响,特别是在结构设计固化的前提下,开展耐磨性、耐腐蚀性、抗疲劳性能高的材料研究,开展先进的制造技术研究,对保持叶轮的工作状态、延长叶轮使用寿命具有重要意义。

碳化钨具有高强度、高硬度、高耐磨、高耐腐蚀性等特点,被广泛地应用在刀具、模具、钻井、采矿等领域。但碳化钨材料脆性大、易碎裂,传统加工工艺通常采用粉末烧结工艺制备获得碳化钨制品,但粉末烧结工艺需要模压成形,受限于模具的结构,难以制备具有复杂形状的碳化钨叶轮等零部件。

增材制造技术是一种将复杂三维结构转换为二维图形、并层层叠加的制造方式,适用于加工传统工艺难加工材料及成形复杂结构。目前,国内外众多学者开展了碳化钨增材制造研究<sup>[1-12]</sup>,按照成形过程中是否涉及后续烧结工艺,可分为直接成形法与间接成形法。直接成形法中一般采用高强能量束直接熔化材料及凝固,无需后续烧结,碳化钨材料由于自身特性(脆、熔点高),直接成形热应力较大,容易开裂。间接成形工艺是将热加工过程转移至烧结工序,烧结温度低于直接增材制造中所需的完全熔化温度,热量施加更加均匀,从而有效减小热应力,抑制开裂。

粉末挤出成形工艺(Powder Extrusion Printing, PEP)是以熔融沉积成形(FDM)技术为基础,深度结合粉末冶金工艺形成的创新金属/陶瓷3D打印方法,通过“先成形、后致密化”的工艺逻辑,实现了难熔金属、陶瓷等特殊材料复杂结构件的高效制备,属于典型的间接3D打印技术体系。本文基于PEP技术开展WC-10Ni硬质合金制造,深入研究挤出成形工艺、脱脂温度及烧结工艺对WC-10Ni硬质合金成形精度、致密度及性能的影响,完成高致密度、高性能WC-10Ni叶轮制备,为磨蚀、腐蚀环境下碳化钨叶轮的制备提供基础。

## 1 叶轮制备要求

### 1.1 叶轮尺寸要求

研究对象为轴流式叶轮,其尺寸为 $\varnothing 233\text{ mm} \times 93\text{ mm}$ ,叶轮模型如图1所示。

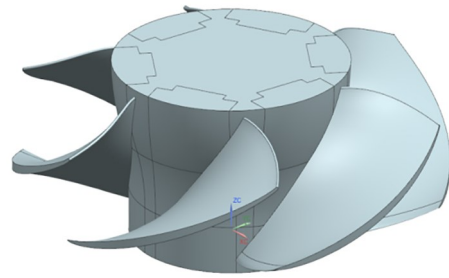


图1 叶轮模型

Fig. 1 The model of Impeller

### 1.2 试验原料

试验原料为WC-10Ni硬质合金,实测化学成分如表1所示。试验所用WC-10Ni粉末采用球磨法制备,粉末粒径范围为1~9 $\mu\text{m}$ ,颗粒呈不规则形状,具体形貌如图2所示。

表1 WC-10Ni化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of WC-10Ni (wt. %)

| W    | Ni    | 总碳Ct | 游离碳Cf | O     | Fe     |
|------|-------|------|-------|-------|--------|
| Bal. | 10.16 | 5.22 | 0.06  | 0.099 | 0.0085 |

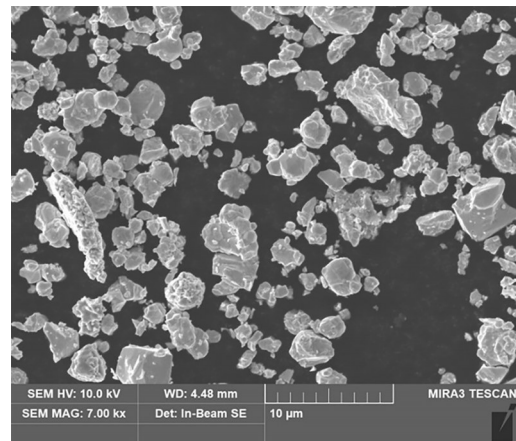


图2 WC-10Ni粉末形貌

Fig. 2 Powder morphology of WC-10Ni

### 1.3 样品制备

图3为PEP的具体流程,主要分为四个步骤:密炼喂料、打印初坯、脱脂、烧结。基于粉末挤出成形设备,通过选择合适的参数(喷嘴直径、成形层厚、喷嘴移动速度、成形路径)将密炼的喂料通过螺杆

挤出并按预定轨迹堆积在工作台上,层层叠加形成零件生胚;随后通过溶剂脱脂、干燥、热脱脂等步骤清除生胚中的粘结剂;最后通过高温烧结,使得合金组织进一步致密化,最终得到致密化的WC-10Ni硬质合金样件。

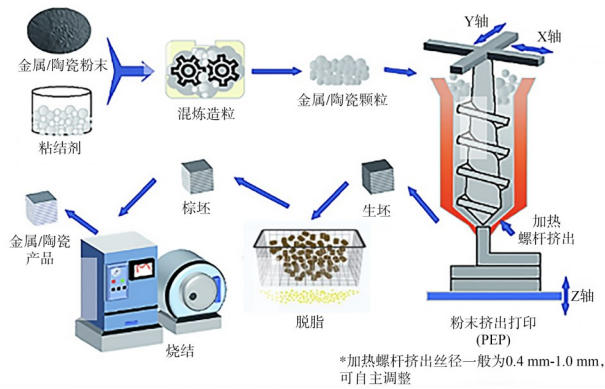


图3 PEP工艺流程

Fig. 3 Technological process of PEP

## 2 结果与讨论

### 2.1 工艺参数对WC-10Ni叶轮成形精度的影响

在整个工艺流程中,螺杆挤出打印是保证合金WC-10Ni叶轮成形的关键部分。打印层厚、喷嘴直径、喷嘴移动速度等参数直接决定生坯的尺寸精度。在打印过程中,当喷头温度低于120℃时,挤出丝出现明显挤出膨胀效应,打印部分尺寸将偏大<sup>[6]</sup>,因此,基于喷头温度175℃、平台温度100℃的打印条件,在不产生翘曲变形、分层等缺陷的工艺参数窗口范围内,对层厚、喷嘴直径、喷嘴移动速度的影响开展分析。基于实际样品尺寸与设计尺寸的偏差统计(见表2)发现,层厚越厚,偏差越大,这是因为打印坯体是由打印材料堆叠形成,在堆叠过程中可能出现打印体堆叠孔隙,同一层相邻打印线条、上下相邻两层之间都可能存在堆叠孔隙;线宽是喷嘴直径的直接体现,试验结果表明,线宽越大,尺寸偏差越大,这说明喷嘴直径越大,偏差越大,这是因为较宽的线宽可能导致表面粗糙度增加,导致实际尺寸偏大;打印速度对x方向的影响较另外两个方向的影响更大。

### 2.2 脱脂工艺对脱脂率的影响

WC-10Ni生胚材料中粘结剂的脱除是至关重

表2 粉末挤出成形工艺参数与WC-10Ni生坯尺寸误差

Table 2 PEP process parameters and dimensional error of WC-10Ni green body

| 序号 | 线宽/mm | 打印层厚/mm | 打印速度/(mm·s <sup>-1</sup> ) | 试样尺寸误差 |      |      |
|----|-------|---------|----------------------------|--------|------|------|
|    |       |         |                            | Δx/%   | Δy/% | Δz/% |
| 1  | 0.6   | 0.15    | 60                         | 0.38   | 4.27 | 3.06 |
| 2  | 0.8   | 0.15    | 60                         | 0.38   | 5.12 | 7.58 |
| 3  | 0.9   | 0.15    | 60                         | 2.0    | 5.4  | 8.65 |
| 4  | 0.8   | 0.20    | 70                         | 1.8    | 5.85 | 6.95 |
| 5  | 0.8   | 0.25    | 70                         | 2.3    | 6.30 | 9.12 |

要的步骤,既要保证溶剂脱脂率高,又要保证样件形貌不发生变化。溶剂脱脂可以保证低分子量粘结剂成分快速、高效脱除,热脱脂可脱去高分子量粘结剂成分并保证形貌。

溶剂脱脂以正庚烷为溶剂,在50℃恒温条件下进行。将试样放入正庚烷中,每隔12h将试样取出、烘干、称重,再放入正庚烷中,直至试样重量不再发生变化。脱脂率随溶剂脱脂时间变化如图4所示,可以发现,在溶剂脱脂前24h,由于试样和正庚烷中可溶性粘结剂浓度梯度差较大,脱脂速率达45.7%;随着浓度差的逐渐减小,脱脂速率逐渐放缓,溶剂脱脂率在60h时为74.6%;到120h时,浓度差基本平衡,溶剂脱脂率为80.8%。溶剂脱脂完后的试样未出现鼓泡、开裂等缺陷且试样形状及颜色未出现明显变化。剩余可溶性粘结剂为高分子量粘结剂,无法通过溶剂脱脂法去除。

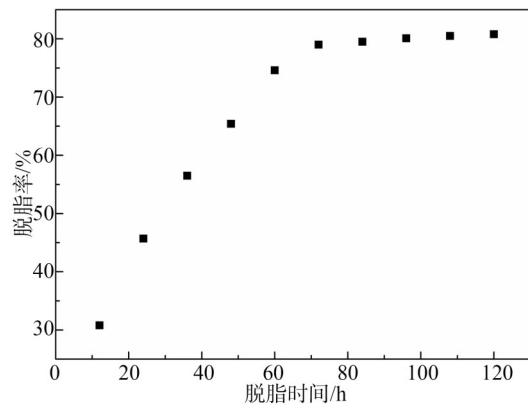


图4 脱脂率随溶剂脱脂时间的变化

Fig. 4 Variation of degreasing rate with solvent degreasing time

高分子量粘结剂主要包含填充剂、相容剂、骨架、副骨架等,考虑不同粘接剂对温度的敏感程度不同,对粘结剂进行热重分析。不同粘接剂热重分析结果表明(见表3),高分子量粘结剂的热解温度均

超过 210 °C,在 513 °C前可实现完全热解,并且各组分的热解温度区间均有较宽的重叠范围。为避免样件在脱脂过程中因剧烈分解而导致开裂、缺陷,建议采用低升温速率。

表3 不同粘结剂热分解温度

| Table 3 Different adhesive thermal decomposition temperatures |                |                                     |               |               |
|---|----------------|-------------------------------------|---------------|---------------|
| 组成  | 热分解温度<br>区间/°C | 最大失重区间<br>/°C                       | 最快失重<br>温度/°C | 最佳失重温<br>度/°C |
| 填充剂   | ≥200           | 210.3~252.7                         | 250           | 230           |
| 相容剂   | ≥232           | 210.3~252.7                         | 350           | 320           |
| 骨架  | 237~513        | 237~513                             | 400           | 380、420、500   |
| 副骨架   | 320~400        | 237~286、287~410、<br>410~430、430~513 | 402           | 350           |

### 2.3 烧结工艺对 WC-10Ni 微观组织的影响

脱脂完后的 WC-10Ni 试样致密度一般在 60%,其余 40% 为孔洞,试样强度较低,需通过烧结提高致密度和强度。本研究探究真空、5 MPa 低压两种烧结气氛,以及 1 500 °C、1 520 °C、1 530 °C 三种烧结温度对合金致密度和微观组织的影响,结果如表 4、图 5 所示。从显微组织来看,所有烧结工艺下 WC-10Ni 合金的  $\alpha$  相晶粒尺寸均稳定在 1.6  $\mu\text{m}$ ,晶

粒细小且分布均匀,无明显晶粒长大现象,液相( $\beta$ 相)分布均匀,说明本研究的烧结温度区间未引发 WC 晶粒的异常长大,可保证合金的细晶强化效果。烧结温度对密度的影响较大,真空气氛下的温度从 1 500 °C 升至 1 530 °C,合金密度从 14.58  $\text{g}/\text{cm}^3$  增至 14.63  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,但温度升高对致密度的提升影响逐渐减弱。烧结气氛对孔隙度影响较大,在真空烧结气氛下存在明显的 B 级孔隙,在 5 MPa 低压烧结的气氛下,B 级孔隙消失。烧结温度对脱碳相( $\eta$ 相)影响较大,与烧结温度 1 530 °C 相比,烧结温度 1 520 °C 无脱碳相产生。

图 5 中呈多边形的灰色部分为 WC 硬质相,呈无规则形状的黑色部分为粘结相,其主要成分为 Ni 及固溶于其中的 W 和 C。真空烧结条件下,随着温度的升高,更多的金属 Ni 熔化,形成液相,提高了颗粒间的润湿效果,B 级孔隙数量减小,烧结体的相对密度也相应提高,强度随之提高。真空烧结时,由于不存在氢气,只能依靠硬质合金中的碳来脱氧,烧结体中会发生脱碳反应,形成尺寸约为 50  $\mu\text{m}$  的  $\eta$  相(即脱碳相),脆性增大。1 530 °C 加压烧结时,脱

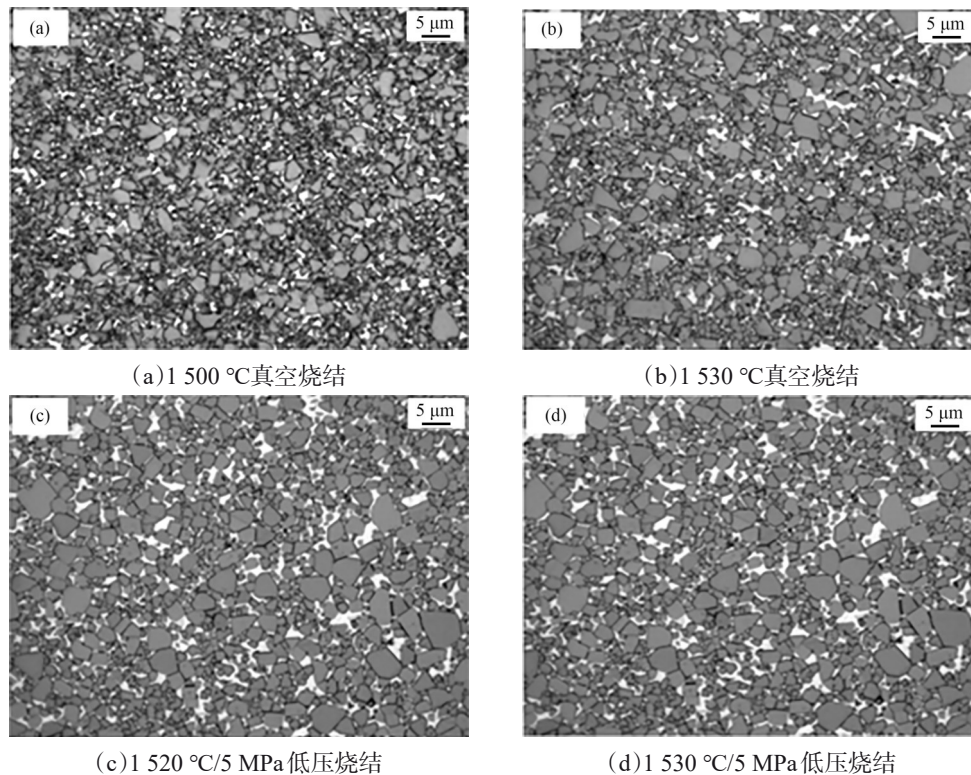


图5 不同烧结工艺下 WC-10Ni 的金相组织

Fig. 5 Metallographic structure of WC-10Ni alloy under different sintering processes

表4 不同烧结工艺下WC-10Ni的致密度及显微组织

Table 4 Density and microstructure of WC-10Ni alloy under different sintering processes

| 烧结气氛      | 烧结温度/°C | 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 100×孔隙度   | α相尺寸/μm | β相分布 | η相  | γ相 |
|-----------|---------|--------------------------|-----------|---------|------|-----|----|
| 真空        | 1 500   | 14.58                    | A02B04C00 | 1.6     | 1    | E50 | —  |
|           | 1 530   | 14.63                    | A02B02C00 | 1.6     | 1-2  | E50 | —  |
| 加压, 5 MPa | 1 530   | 14.64                    | A02B00C00 | 1.6     | 1-2  | E50 | —  |
|           | 1 520   | 14.63                    | A02B00C00 | 1.6     | 1-2  | E00 | —  |

注: ≤10 μm 的孔隙, 标记为 A; 1~25 μm 的孔隙, 标记为 B; 非化合碳标记为 C。α相为 WC 硬质相, β相为 Ni 粘结相, η相为脱碳相, γ相为固溶体。

碳相尺寸约为 50 μm, 这是因为烧结温度过高导致脱碳相产生, 脆性增大。

## 2.4 WC-10Ni 力学性能分析

基于最优的 PEP 工艺 (175 °C/100 °C 成形、线宽 0.6 mm/层厚 0.15 mm/速度 60 mm/s、分步脱脂、1 520 °C/5 MPa 低压烧结) 制备的 WC-10Ni 样件, 其综合力学性能如表 5 所示。

表5 PEP 制备的 WC-10Ni 样件物理性能

Table 5 Physical properties of WC-10Ni with PEP

| 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 硬度/HRC | 抗弯强度/MPa | 冲击韧性/(J·cm <sup>-2</sup> ) |
|--------------------------|--------|----------|----------------------------|
| 14.63                    | 87.6   | 2 600    | 1                          |

由表 5 可知, 基于 PEP 工艺制备的 WC-10Ni 样件密度为 14.63 g/cm<sup>3</sup> (理论密度为 14.64 g/cm<sup>3</sup>), 致密度达 99.9%, 实现近全致密化, 远高于冷等静压+真空烧结工艺制备的 WC-10Ni (致密度 99.24%), 也优于其他增材制造工艺制备的 WC 基硬质合金。力学性能方面, 样件的硬度为 87.6 HRC, 抗弯强度为 2 600 MPa, 高于采用等离子烧结工艺 (添加 VC、TaC) 制备的 WC-10Ni 硬质合金抗弯强度 2 141 MPa<sup>[10]</sup> 及冷等静压和真空烧结工艺制备的 WC-10Ni 的抗弯强度 1 126.1 MPa<sup>[11]</sup>。

## 3 叶轮打印

基于研究得到的 PEP 工艺最优参数, 进行 WC-10Ni 叶轮打印、脱脂及烧结, 叶轮尺寸为 ∅233 mm×93 mm。粉末挤出成形制造的叶轮生胚及烧结后实物如图 6 所示。叶轮表面未发现开裂、鼓包等缺陷, 轮廓清晰, 表面成形质量较好。

## 4 结论

本研究以磨蚀-腐蚀复合工况下泵用轴流式

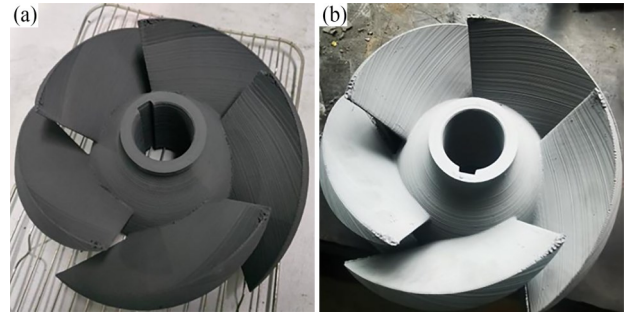


图6 粉末挤出成形制造的小叶轮生胚及烧结后实物

Fig. 6 Impeller embryo and physical object by PEP

WC-10Ni 叶轮为研究对象, 基于粉末挤出成形 (PEP) 增材制造技术, 系统探究了挤出成形工艺、脱脂温度及烧结工艺参数对精度、微观组织及力学性能的影响, 实现了 ∅233 mm×93 mm 高致密度 WC-10Ni 叶轮的无缺陷制备。主要结论如下:

(1) 采用粉末挤出成形工艺制备 WC-10Ni 合金, 打印温度为 175 °C, 基板温度 100 °C, 喷嘴直径 0.6 mm, 打印层厚 0.15 mm, 打印速度 60 mm/s, 能实现高尺寸精度生胚的成形; 基于溶剂脱脂、热脱脂相结合的分步脱脂法, 可以去除粘结剂的同时避免样件在脱脂过程中因剧烈分解而导致开裂、缺陷。

(2) 在低压 (5 MPa) 烧结环境、1 520 °C 烧结温度下, 制备的 WC-10Ni 试样致密度达 99.9%、硬度达 87.6 HRC、抗弯强度达 2 600 MPa, 显著优于传统方法及其他增材制造方法制造的 WC-10Ni 样件性能, 表明 PEP 工艺可以作为硬质合金的有效增材制造技术。

(3) 采用 PEP 工艺制备了 ∅233 mm×93 mm 的 WC-10Ni 叶轮, 叶轮表面未发现开裂、鼓包等缺陷, 轮廓清晰, 成形质量较好, 表明 PEP 工艺在复杂结构硬质合金零件制备具有巨大的应用潜力。

## 参考文献:

- [1] Hadi M, Morgan O, Junaid M A, et al. Process develop-

- ment for green part printing using binderjetting additive manufacturing[J]. Mech. Eng. 2018, 13(4):504-512.
- [2] Cramer C L, Aguirre T G, Wieber N R, et al. Binder jet printed WC infiltrated with pre-made melt of WC and Co[J]. Int. J. Refract. Met. Hard Mater, 2020, 87: 105137.
- [3] Ghosh S K, Das A K, Saha P. Selective laser sintering: a case study of tungsten carbide and cobalt powder sintering by pulsed Nd:YAG laser. In: Lasers based manufacturing[M]//Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering. Springer, New Delhi, 2015.
- [4] Chen J, Huang M, Fang Z Z, et al. Microstructure analysis of high density WC-co composite prepared by one step selective laser melting [J]. Int. J. Refract. Met. Hard Mater, 2019, 84, 104980.
- [5] Padmakumar M. Additive Manufacturing of Tungsten Carbide Hardmetal Parts by Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) and Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Techniques [J]. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2020, 7: 338-371.
- [6] 祝贤智,成会朝,周承商,等. 挤出式3D打印工艺制备 WC-10Co 硬质合金的显微结构与力学性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2023, 28(2): 141-150.  
ZHU X Z, CHENG H C, ZHOU C S, et al. Microstructure and mechanical properties of WC-10Co cemented carbide fabricated by extrusion-based 3D printing [J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2023, 28(2): 141-150.
- [7] 李晓峰,赵宇霞,郭子傲,等. 基于增材制造的硬质合金粉末研究现状[J]. 粉末冶金工业, 2023(33): 1-9.  
LI X F, ZHAO Y X, GUO Z A, et al. Research status of additive manufacturing-based hard alloy powders [J]. Powder Metallurgy Industry, 2023, 33(1): 1-9.
- [8] 陆腾轩,孟晓燕,李狮弟,等. 硬质合金粉末挤出打印中增材制造工艺及其显微结构[J]. 材料工程, 2022, 50(5): 147-155.  
LU T X, MENG X Y, LI S D, et al. Additive manufacturing process and its microstructure in powder extrusion printing of hard alloys [J]. Materials Engineering, 2022, 50(5): 147-155.
- [9] 倪培桑,陈少华,卢洋,等. SLM打印制备 WC-16%Co 硬质合金工艺与样品特性研究[J]. 硬质合金, 2019, 36(3): 177-183.  
NI P S, CHEN S H, LU Y, et al. Research on SLM printing process and sample characteristics of WC-16%Co cemented carbide [J]. Cemented Carbides, 2019, 36(3), 177-183.
- [10] Rong H, Peng Z, Ren X, et al. Ultrafine WC-Ni cemented carbides fabricated by spark Plasma sintering [J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 532(1): 543-547.
- [11] 薛萍,张建军,艾云龙,等. SiC掺杂 WC-10Ni 硬质合金的真空烧结及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(2): 566-572.  
XUE P, ZHANG J J, AI Y L, et al. Vacuum sintering and properties of SiC-doped WC-10Ni cemented carbides [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(2): 566-572.
- [12] 刘展赫,陈子航,王日初,等. WC-Ni 基硬质合金的光固化增材制造[J]. 稀有金属与硬质合金, 2024, 52(2): 76-88.  
LIU Z H, CHEN Z H, WANG R C, et al. Photocuring additive manufacturing of WC-Ni based cemented carbides [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2024, 52(2): 76-88.