

GH4169高温合金粉末注射成型技术应用研究

时晓钊, 卢一玮, 杨华桥, 龙强, 韩淇文*

四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州

收稿日期: 2026年4月9日; 录用日期: 2026年5月22日; 发布日期: 2026年6月1日

摘要

采用粉末冶金注射成型技术制备了GH4169高温合金火工品零件半精毛坯, 对坯料进行了尺寸检测、外观检测、金相分析及拉伸试验。试验结果表明: 粉末注射成型生产的毛坯尺寸收缩数据满足零件生产精度要求, 试验件经金相分析内部存在一定空隙; 烧结炉中不同位置制备的毛坯试验件之间的抗拉强度与在炉中的位置存在一定关系, 所有位置的抗拉强度均低于棒料均值, 平均降幅为21.7%, 试验件延伸率整体低于棒料均值; 装配后的成品结构强度及发火指标满足设计要求范围, 且包络于历史范围, 粉末冶金注射成型技术具备在火工品应用的基本条件。

关键词

GH4169高温合金, 注射成型, 火工品, 力学性能

Research on Application of GH4169 Superalloy Powder Injection Molding Technology

Xiaozhao Shi, Yiwei Lu, Huaqiao Yang, Qiang Long, Qiwen Han*

Sichuan Aerospace Chuannan Pyrotechnic Technology Co. Ltd., Luzhou Sichuan

Received: April 9, 2026; accepted: May 22, 2026; published: June 1, 2026

Abstract

GH4169 superalloy semi-finished blanks for initiating explosive devices were fabricated by powder metallurgy injection molding technology. Dimensional inspection, visual examination, metallographic analysis and tensile tests were carried out on the blanks. The experimental results show that the dimensional shrinkage data of the blanks produced by powder injection molding meets the

*通讯作者。

文章引用: 时晓钊, 卢一玮, 杨华桥, 龙强, 韩淇文. GH4169 高温合金粉末注射成型技术应用研究[J]. 冶金工程, 2026, 13(2): 44-52. DOI: 10.12677/meng.2026.132006

precision requirements for part manufacturing. Metallographic analysis reveals the presence of certain internal voids in the test specimens. The tensile strength of blank specimens prepared at different positions in the sintering furnace exhibits a certain correlation with their locations within the furnace. The tensile strength at all positions is lower than the average value of the bar stock, with an average reduction of 21.7%. The elongation of the test specimens is generally lower than the average value of the bar. The structural strength and initiation performance of the assembled finished products meet the design requirements and fall within the historical range. Therefore, powder metallurgy injection molding technology possesses the basic conditions for application in initiating explosive devices.

Keywords

GH4169 Superalloy, Injection Molding, Initiating Explosive Devices, Mechanical Properties

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

GH4169 高温合金在室温至 650℃ 范围内兼具高强度、良好塑韧性及优异的抗蠕变、抗疲劳性能，组织稳定，已逐步应用于航天航空零部件制造[1]-[3]。高温合金材料在航天零件的应用带来了高质量、高可靠性的同时，也给零件的加工增加了难度[4]-[6]：该合金属于典型难加工材料，切削抗力大、加工硬化显著、导热性差，切削区温度高，易造成刀具磨损；材料中硬质相多，高温下易产生黏结与扩散磨损，刀具寿命低；加工硬化与热变形耦合作用，零件尺寸及形位精度控制难度大，对刀具、切削参数及加工工艺均提出严苛要求。

目前，我厂部分小尺寸壳体选用 GH4169 高温合金制造，其工艺路线仍沿用传统的棒料车铣加工方式。该方法材料去除率大、加工效率低、生产周期长，导致制造成本居高不下。鉴于 GH4169 高温合金切削加工性差、刀具磨损严重，其单件加工成本可达普通材料的数十倍。随着 GH4169 类高温合金在航天火工品领域的应用呈逐年上升趋势，开展此类材料零件高效生产工艺研究已迫在眉睫。

金属注射成型技术将粉末冶金与塑料成型工艺相结合，能够近净成形结构复杂、尺寸精度高的高温合金零件。该工艺可以大幅减少材料消耗与后续机加工余量[7]，有效解决了传统切削加工中刀具磨损严重、加工效率低及成本高昂的难题；同时，该技术能够高度自动化地一次成型具有复杂几何结构的微小零件，显著缩短生产周期，为高温合金小尺寸壳体零件的低成本、高效率、批量化生产提供了创新路径。

2. 注射成型的工艺流程

金属粉末注射成型方案工艺流程见图 1 所示，金属粉末注射成型工艺主要包括雾化制粉、混炼造粒、注射成型、脱脂及烧结等关键工序。首先，在保护气体中熔炼棒料(锭料)并经喷嘴雾化，分级收集冷却凝固的金属粉末，随后取样检测其化学成分；其次，按比例将金属粉末与胶接剂进行混炼，使胶接剂均匀分布以保证烧结坯机械性能的均一性，考虑到过细粉末流动性差易导致充模不均等问题，需通过干燥、加胶接剂将粉料制成直径约 0.1 mm 的颗粒以改善成型性；接着，通过加热料筒提升颗粒流动性，利用注射机压力将颗粒注入模具，冷却后得到与型腔一致的坯；之后依次进行催化脱脂与热脱脂，其中催化脱脂利用聚醚树脂在酸性气体下的界面催化分解实现无气体脱脂以精准控制尺寸，热脱脂则通过高温使

有机物完全挥发裂解,为后续烧结做准备;最后,将生坯加热至其基本组元熔点 70%~80%的温度并保温,使粉末颗粒结合致密化,伴随均匀尺寸收缩以获得预期性能与尺寸的烧结坯。

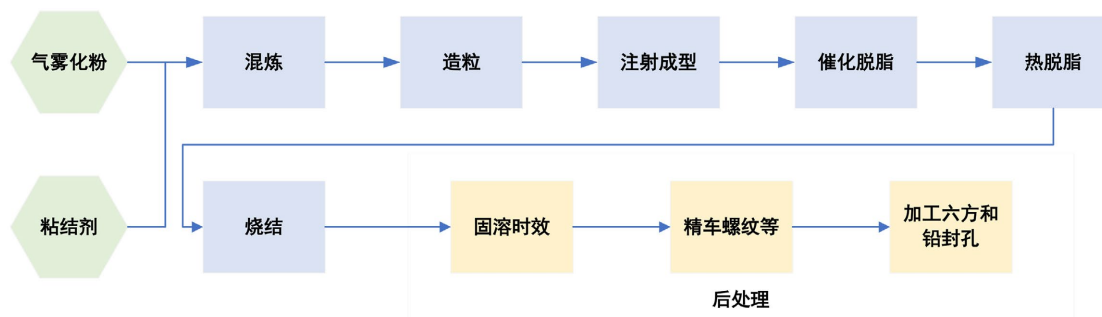


Figure 1. Flow chart of injection molding process
图 1. 注射成型工艺流程图

3. 注射成型材料的测试

3.1. 尺寸精度的测试

为系统性评估注射成型工艺的尺寸控制能力,本研究选取多个烧结坯尺寸作为典型特征进行详细分析。试验件选取的测量特征包括内孔孔径、外圆直径、台阶深度、总长尺寸以及相应的形位公差指标,测量结果见表 1 所示。由于烧结过程是各向均匀收缩的过程,试验件形位公差控制优异,线性尺寸精度能保证在 0.6%以内。由此可知,金属粉末注射成型工艺在保证尺寸精度的同时,能够有效控制形位公差,制品具有良好的几何精度一致性。

Table 1. Measured range and accuracy analysis of typical characteristics
表 1. 典型特征实测范围及精度分析

测量项目	实测值范围(单位 mm)	实际精度	备注
孔径 $\phi 8.6$	$\phi 8.644 \sim \phi 8.660$	0.19%	线性尺寸
外径 $\phi 19$	$\phi 18.86 \sim \phi 18.91$	0.26%	线性尺寸
台阶深度 28.2	28.03~28.19	0.57%	线性尺寸
总长 47.7	47.57~47.74	0.36%	线性尺寸
$\phi 8.6$ 内孔圆度	0.0014~0.0069	—	形位公差
$\phi 19$ 外圆圆度	0.0017~0.0083	—	形位公差
$\phi 8.6$ 外圆与 $\phi 19$ 外圆同轴度	0.009~0.014	—	形位公差

3.2. 力学性能的测试

为对比与现有棒材的性能差异,本研究随机选取 10 个批次的高温合金棒材,在棒材上各下取一节材料加工成为拉力试验件进行对比测试。棒料原材料执行标准为 GH4169 GJB713A,主要采集抗拉强度、延伸率两个关键指标,取均值作为后续对比组,结果见表 2 所示。

本研究采用同炉试验件的方式进行机械性能检测,以确保检测结果能够真实反映产品的实际性能水平。同炉试验件是指采用同批原材料、相同工艺参数制作的生坯试样,这些试样与产品生坯一同经历脱脂、烧结等关键工序,从而保证试验件与产品在工艺历程上的一致性。

Table 2. Test results of specimens from 10 random batches of bar material
表 2. 随机 10 个批次棒料试验件测试结果

序号	抗拉强度	延伸率	序号	抗拉强度	延伸率
1	1372 MPa	17%	6	1287 MPa	17%
2	1154 MPa	19%	7	1359 MPa	21.5%
3	1368 MPa	17%	8	1367 MPa	20%
4	1418 MPa	17.5%	9	1308 MPa	24%
5	1398 MPa	16.5%	10	1302 MPa	23.5%
均值	1333.3 MPa	19.3%			

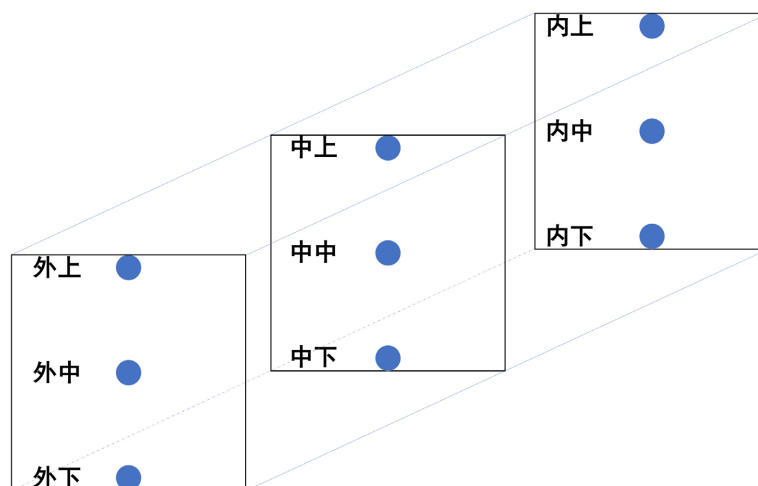


Figure 2. Schematic diagram of the specimen position in the furnace
图 2. 试验件在炉中位置示意图

Table 3. Mechanical property test data of three furnace specimens (density in g/cm³, tensile strength in MPa)
表 3. 三炉试验件力学性能测试数据(其中, 密度单位为 g/cm³, 抗拉强度单位为 MPa)

位置	密度	抗拉强度	延伸率	位置	密度	抗拉强度	延伸率	位置	密度	抗拉强度	延伸率
第一炉											
外上	8.005	1076.3	13.7%	中上	8.015	1057.2	13.7%	内上	8.060	992.2	12.0%
外中	7.960	1097.1	14.1%	中中	8.025	1105.2	15.7%	内中	8.090	1108.6	16.1%
外下	8.075	1070.4	12.5%	中下	8.035	1053.2	11.7%	内下	8.070	1128.5	20.8%
第二炉											
外上	8.080	1051.0	20.9%	中上	8.055	1025.1	19.8%	内上	8.120	943.5	11.1%
外中	8.025	968.2	17.3%	中中	8.065	1074.9	22.3%	内中	8.120	1050.3	17.3%
外下	8.125	999.4	11.4%	中下	8.080	1062.9	20.6%	内下	8.130	994.6	15.6%
第三炉											
外上	8.070	1066.0	20.1%	中上	8.100	1089.8	19.9%	内上	8.085	954.9	11.2%
外中	8.060	999.0	11.4%	中中	8.080	1062.5	14.9%	内中	8.065	1091.7	16.1%
外下	8.095	933.6	11.7%	中下	8.040	1069.1	20.9%	内下	8.095	1061.2	18.7%

在试制过程中，考虑到烧结时不同批次烧结炉温度波动可能对烧结质量产生影响[8]，本研究将试制工作分为三个炉批号进行烧结。同时，考虑到烧结炉内不同区域可能存在温度差异，对同一炉试验件根据其炉中的分布位置进行标记。如图 2 所示，试验件位置标记分为外层(外上、外中、外下)、中层(中上、中中、中下)和内层(内上、内中、内下)三个区域共九个位置点，以便分析炉内温度场分布对制品性能的影响规律。采用尺寸相同规格扁平试样，在万能材料试验机上进行拉伸性能测试，试验结果如表 3 所示。

通过对表 2 和表 3 数据的对比分析，绘制形成图 3 所示柱状图。从图中可以清晰地观察到，抗拉强度呈现出明显的空间分布特征：1) 内层上部位置(内上)的抗拉强度较低，三炉平均值仅为 963.5 MPa，显著低于其他位置，这一现象可能与炉膛内层温度分布、气氛流动等因素有关；2) 从整体趋势来看，中层位置的抗拉强度相对较高且稳定，中中位置平均抗拉强度达到 1080.9 MPa，为所有位置中的最高值；3) 外层位置的抗拉强度介于内层和中层之间，但波动较大，外中位置的标准差达到 67.3 MPa，表明该位置的工艺稳定性有待提高。同时，所有位置的抗拉强度均低于棒料均值 1333.3 MPa，平均降幅为 21.7%，这反映了注射成型工艺相对于传统锻造工艺在力学性能方面的固有差距。

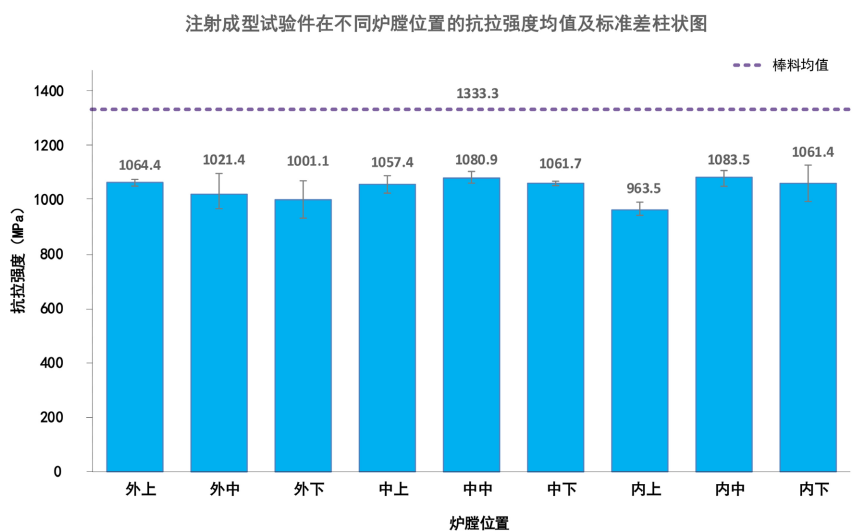


Figure 3. Tensile strength distribution of injection-molded specimens at different furnace positions
图 3. 注射成型试验件在不同炉膛位置的抗拉强度分布

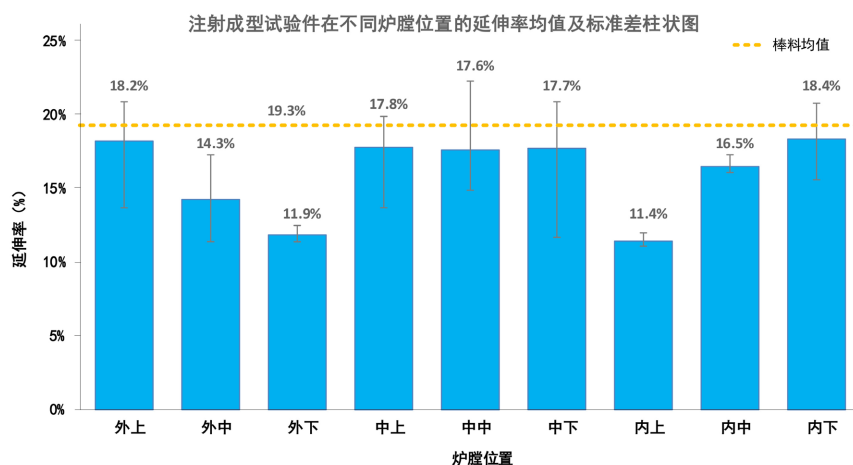


Figure 4. Elongation distribution of injection-molded specimens at different furnace positions
图 4. 注射成型试验件在不同炉膛位置的延伸率分布

图 4 展示了延伸率的空间分布情况,内下位置的延伸率较高,平均值为 18.4%,接近棒料均值 19.3%。而内上和右下位置的延伸率最低,分别为 11.4%和 11.9%,仅为棒料均值的 60%左右。金属粉末注射成型 GH4169 试验件的延伸率整体低于棒料均值,主要原因是烧结坯内部存在微孔隙,降低了材料的塑性变形能力。

3.3. 外观及金相的测试

由于金属粉末注射成型的原理,制品不可避免地会存在一定比例的孔隙。现在国内市场主流能将致密度控制到 94%以上,如果增加热等静压工艺还能进一步提高致密度,高温合金材料能达到 99.9%致密度。本研究加工试验件未采用热等静压工艺,试验件注射成型(未进行机械加工)表面如图 5 所示,经过电抛光后,10 倍 T 视下可见凹坑。对试验件进行车削处理,经过电抛光后,表面未见明显凹坑。

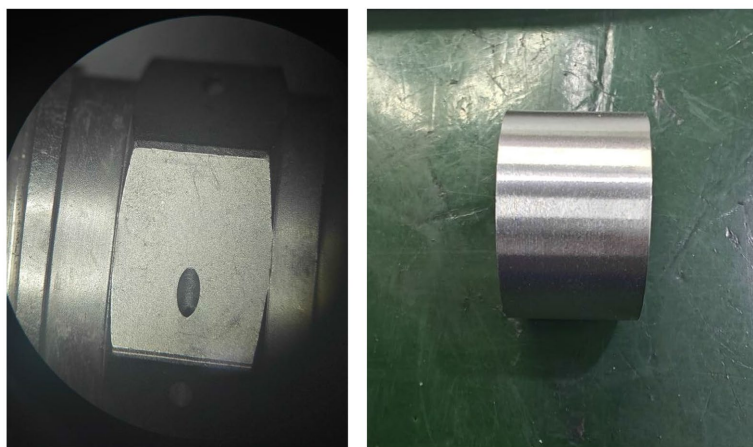


Figure 5. Surface appearance of the injection-molded specimen (left) and the surface appearance after turning and polishing (right)

图 5. 注射成型试验件表面外观(左)与车削抛光后表面外观(右)

为研究孔隙在材料内部的分布规律,采用 50 倍光学显微镜对试验件的轴向和径向截面进行对比观察。图 6 分别展示了两个方向截面孔隙的分布情况,图中白色亮点代表孔隙位置。根据图示研究结果表明:轴向截面与径向截面的孔隙分布特征基本一致,未发现明显的各向异性差异。

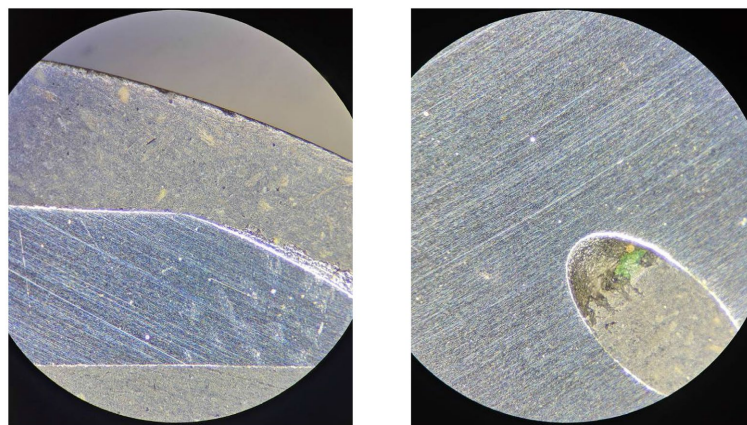


Figure 6. Pores in the axial (left) and radial (right) cross-sections of injection-molded specimens

图 6. 注射成型试验件轴向(左)和径向(右)截面孔隙

再将试验件在 200 倍及 1000 倍显微镜下进一步观察金相, 见图 7 所示, 由图可知: ①为白色基体组织, 整体呈均匀等轴状; ②为强化相(NbC 等碳化物), 强化相在晶界和晶内析出, 呈弥散分布; ③为断续分布的孔隙, 其上应有部分碳化物脱落。试验件平均晶粒尺寸在 0.015~0.02 mm, 晶粒度 8 级, 优于 GJB713A-2020 要求 ≥ 5 级。

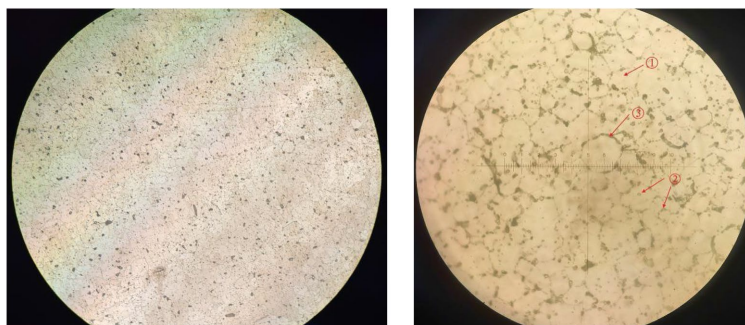


Figure 7. Metallographic image of injection molding specimens
图 7. 注射成型试验件金相图

4. 发火性能测试

Table 4. Firing test results of metal powder injection molding specimens

表 4. 金属粉末注射成型试验件发火试验结果

序号	产品状态	发火时间/ms	建压到峰压时间/ms	峰值压力/(MPa·mL ⁻¹)	备注
1	预爆	1.51	0.87	10.88	不计入统计值
2	常温发火	1.99	0.57	8.43	—
3	常温发火	1.43	0.70	7.66	—
4	常温发火	1.50	0.68	7.42	—
5	高温发火	1.08	0.59	8.06	—
6	高温发火	1.32	0.70	7.84	—
7	高温发火	1.07	0.70	8.04	—
8	低温发火	1.15	0.67	7.94	—
9	低温发火	1.22	0.72	8.14	—
10	低温发火	1.19	0.57	8.14	—
统计范围	—	1.07~1.99	0.57~0.72	7.42~8.43	—

注: 历史包络范围——发火时间: (0.48~3.22) ms; 建压 - 峰压时间: (0.55~0.78) ms; 峰值压力: (6.01~10.60) MPa/50 mL。

采用金属粉末注射成型工艺制备的壳体, 按照发火状态装配试验件, 其余参数均与设计状态保持一致。试验过程中止口卷边未出现折皱现象, 表明成型工艺稳定可靠。依据 GJB1307A-2004《钝感电起爆器通用规范》第 4.8.12.1 条的规定, 对试验件进行性能裕度试验。试验共分三组进行, 共计 10 发产品: 其中 4 发进行常温发火试验, 3 发在(107 ± 2)°C 条件下保温 2 h 后进行高温发火试验, 3 发在(-62 ± 2)°C 条件下保温 2 h 后进行低温发火试验。试验过程中通入 5 A 电流进行发火, 产品的发火性能应满足以下技术指标:

- (1) 输出压力峰值 P 应在 5~12 MPa (绝压) 范围内, 且压力 - 时间曲线应保持平稳;
- (2) 从通电到压力曲线开始上升的时间 t_1 , 在额定发火输入能量和最大发火输入能量条件下应满足 $t_1 \leq 10 \text{ ms}$, 在可靠发火输入能量条件下应满足 $t_1 \leq 50 \text{ ms}$;
- (3) 从压力曲线开始上升至第一个最大压力峰的时间 t_2 应满足 $t_2 \leq 4 \text{ ms}$ 。

试验结果如表 4 所示。结果表明, 所有试验件的发火性能均满足图样设计要求, 且各项参数均包络于历史数据范围之内。发火后产品残骸保持完整, 经 15 MPa 气压保压 2 min 测试无泄漏, 完全满足产品的使用要求。

5. 效益分析

以本文研究的壳体为例, 对传统机械加工与金属粉末注射成型两种工艺方案进行效益对比分析。目前厂内采用纯机械加工工艺的生产效率为 20 件/天, 而采用金属粉末注射成型工艺方案后, 生产效率可提升至 100 件/天, 产能提升达 5 倍。两种工艺方案的加工成本对比如表 5 所示。

Table 5. Cost comparison of two processing schemes

表 5. 两种加工方案成本对比

加工方案	是否包含热处理	报价	原材料成本
纯机械加工成型	否	326 元/件	101 元/件
金属粉末注射成型 + 机械加工	是	300 元/件	16 元/件

金属粉末注射成型为近净成形, 加工余量很少, 原材料成本上能大幅度降低。同时金属粉末注射成型的模具不存在损耗, 对于大批量加工, 成本还能进一步降低。但是由于烧结坯最终尺寸是烧结、收缩后的尺寸, 为得到满足设计图样精度的模具需要多次试模。

6. 结论

粉末注射成型工艺在高温合金 GH4169 的制备中展现出显著的技术优势, 该工艺具有加工成本低、生产效率高的特点, 且制备的零件机械性能稳定, 能够满足工程应用的基本要求。然而, 该工艺仍存在一定的局限性: 一方面, 烧结坯尺寸精度需通过多次试模优化方能保证; 另一方面, 由于烧结体内部不可避免地存在微孔隙, 其机械性能相较于同状态棒材仍有一定差距。从工艺适用性角度分析, 金属粉末注射成型特别适用于批量生产、尺寸较小、三维结构复杂且具有特殊性能要求的零件近净成形。

另外, 本研究仍存在一定的局限性: 一是未考虑疲劳等动态力学性能; 二是研究仅限于单一零件, 其结论推广至其他火工品需额外验证; 三是粉末注射成型工艺的批次稳定性仍需更大规模的生产数据来验证。综上所述, 对于本研究中此类结构复杂、尺寸较小且承载要求不高的 GH4169 火工品壳体, 采用金属粉末注射成型工艺可实现稳定、低成本、高效率的批量化生产, 具有良好的工程应用前景。

参考文献

- [1] 周金华, 刘次杰, 舒爱玲, 赵超群, 任军学, 张渝. GH4169 高温合金高速切削表层微观组织分布规律研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(19): 59-66.
- [2] 张洪伟, 陈涛, 闫锡超, 史松宜, 谢明昭, 秦海龙. GH4169 蠕变本构模型建立及涡轮盘变形分析[J]. 中国表面工程, 2025, 38(6): 362-370.
- [3] 孙勇飞, 向超, 张涛, 吴文伟, 邹志航, 刘金鹏, 孙桂芳, 蒲吉斌, 韩恩厚. 选区激光熔化 GH4169 高温合金的微观组织和力学性能[J]. 金属学报. 2025, 61(12): 1829-1844.
- [4] 于钱, 张红芹, 仲益, 马提, 吴小敏, 王树林. GH4169 高温合金的加工策略[J]. 工具技术, 2023, 57(2): 65-69.

- [5] 袁盛旺, 周何情. GH4169 高温合金超声辅助切削试验研究[J]. 工具技术, 2024, 58(6): 55-60.
- [6] 徐兴伟, 李良成, 伍爱江, 陈诚, 崔俊博, 熊计, 刘俊波. 高性能涂层刀具切削 GH4169 高温合金的切削性能研究[J]. 工具技术, 2024, 58(5): 47-52.
- [7] 李亮, 柏广泉, 李勉. 金属注射成型技术及其在不锈钢制品中的应用[J]. 中国铸造装备与技术, 2023, 58(2): 84-88.
- [8] 李柳芽, 金用, 陈鹏. MIM 真空烧结炉电气系统设计[J]. 电子工业专用设备, 2026, 55(1): 49-52.