

TC4 钛合金粉末注射成形喂料性能研究 *

崔 珊, 张恩耀, 石 芬

西安航空职业技术学院 航空材料工程学院, 陕西 西安 710089

摘要: 金属粉末注射成形技术作为一种先进的钛及钛合金加工方法, 得到广泛研究与应用, 注射成形产品的质量与喂料性能、注射成形工艺及烧结工艺密切相关。文章采用显微形貌分析及熔融指数分析等方法, 研究了 TC4 钛合金粉末形状对注射成形喂料性能的影响。结果显示, 喂料中粉末与黏结剂的结合方式与合金粉末形状及比表面积有关, 粉末比表面积越高, 颗粒表面黏结剂含量越高, 喂料中粉末与黏结剂结合越牢固; 此外, 非球形粉末喂料在流动过程中颗粒间摩擦作用加剧, 流动性降低; 温度升高对非球形粉末喂料流动性的改善不明显, 说明非球形粉末喂料具有更好的温度稳定性。

关键词: TC4 钛合金; 金属粉末注射成形; 喂料

分类号: TG146. 2⁺³

钛合金具有密度小、比强度高、无磁性、抗腐蚀以及生物相容性好等优点, 在航空航天、石油化工、医疗等领域得到广泛的应用, 受到世界各国的高度重视, 被誉为继钢铁、铝材之后处于发展中的“第三金属”和“战略金属”^[1]。目前, 使用最广泛的钛合金是 Ti-6Al-4V (TC4)、Ti-5Al-2.5Sn (TA7) 等。其中, TC4 钛合金具有高硬度、高抗拉强度和良好的高温抗蠕变性能等优异的综合性能^[2], 已成为医疗、航空航天等重要领域的热门材料, 其用量占钛合金总产量的 50%, 占全部钛合金加工件的 95%。但钛合金的熔点和硬度高, 加工、成型及切削性能差, 采用传统机加工方法加工时的效率低、材料浪费大, 因此其应用范围受到了一定限制^[3]。为了降低钛及钛合金产品的成本, 国内外大力发展无切削、少切削的近净成形工艺。金属粉末注射成形技术 (metal powder injection molding,

MIM) 成为一种理想的钛及钛合金加工工艺^[4], 同时它也是一种可制造出复杂形状与几何特征的近净形零件成形工艺, 该工艺实现了注塑成型和传统的粉末冶金技术的有机结合, 制造出的零件的力学性能与铸锻材料生产的零件接近。MIM 技术工艺通常包含喂料制备、注射成形、脱粘、烧结等几个关键工序^[5]。研究认为, MIM 零件的组织不均匀、内部缺陷及尺寸精度控制问题与喂料性能密切相关^[6-7]。对于高效的注射成形过程, 一般要求喂料应具有良好的均匀性, 也就是粉末和黏结剂之间是易黏结的, 且具有良好的流变性能^[8]。目前, 关于金属粉末注射成形技术的研究多集中于注射成形工艺参数和黏结剂溶剂脱粘行为, 而关于喂料制备及性能的研究相对较少^[9-10]。已有关于喂料的研究也多集中于寻找合适的金属粉末与黏结剂组成^[11], 文章将探讨 TC4 钛合金粉末形状对注射成形喂料显微形貌及流动性能的影响。

1 试验过程

此试验采用的球形 TC4 钛合金粉 (S-Ti) 和不规则氢化脱氢 TC4 钛合金粉 (HDH-Ti) 由江苏金物新材料有限公司生产, 粉末粒度在 0 ~ 35 μm , 粉末纯度均大于 99%, 粉末特性如表 1 所示。黏结剂为石蜡基多组元黏结剂, 主要由 65 wt% 固体石蜡 (PW)、20 wt% 聚乙烯 (PE)、10 wt% 的乙烯-醋酸乙烯共聚物 (EVA) 和 5 wt% 硬脂酸 (SA) 组成。两种 TC4 钛合金喂料的粉末装载量分别为 64 vol% 和 49 vol%, 将两种 TC4 钛合金粉分别和黏结剂在 BD-8875-D 型密炼机中混炼 1 h, 混炼温度为 150 ~ 160 $^{\circ}\text{C}$, 待冷却后破碎得到 TC4 钛合金粉末注射成形喂料。采用 TES-CAN MIRA4 型扫描电子显微镜观察 TC4 钛合金粉末及 MIM 喂料的微观形貌; 采用 WKT-400TC 型熔体流动速率仪测试喂料的熔融指数 (melt flow index, MFI), 模口为 $\Phi 2.095\text{ mm} \times 8.0\text{ mm}$, 加载重量为 21.6 kg, 测试温度分别为 150 $^{\circ}\text{C}$ 、160 $^{\circ}\text{C}$ 、170 $^{\circ}\text{C}$ 。

* 基金项目: 陕西省教育厅青年创新团队建设科研项目 (21JJP055); 西安航空职业技术学院科研项目重点项目 (19XHZK005)

作者简介: 崔珊, 女, 硕士, 讲师, 研究方向为金属粉末注射成形。

表 1 钛合金粉末特性

粉末	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	粉末振实密度 $\rho_p/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	粉末比表面积 $S/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
S-Ti	12.86	20.83	30.26	2.72	0.298
HDH-Ti	11.18	22.47	37.37	2.21	0.347

注: D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别为累计百分含量为 10%、50%、90% 时对应的颗粒粒度值。

2 结果与讨论

2.1 显微形貌分析

S-Ti 粉和 HDH-Ti 粉的显微照片如图 1 所示, 可以看到两种 TC4 钛合金粉末的分散度较好, 均有少量偏聚现象。其中, S-Ti 粉颗粒呈球形且表面光滑, 颗粒大小均匀。HDH-Ti 粉则呈明显不规则形状, 棱角多且粉末表面较为粗糙, 两种粉末粒度分布类似, 形状差异大, HDH-Ti 粉个别大颗粒某方向尺寸较大。

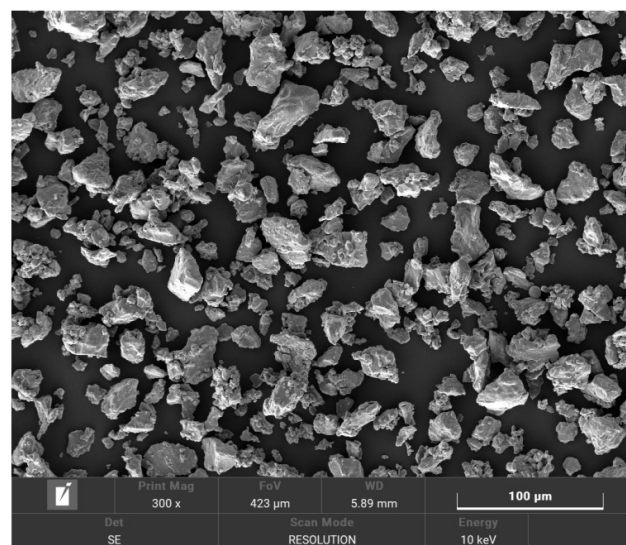
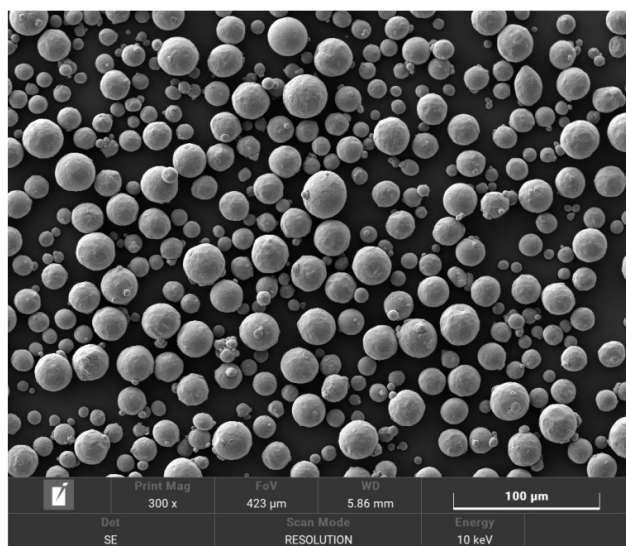


图 1 S-Ti 粉和 HDH-Ti 粉的显微形貌

前期试验通过密度法测得 S-Ti 粉喂料和 HDH-Ti 粉喂料临界装载量分别为 67 vol% 和 52 vol%。一般认为在临界装载量下, 喂料流动性较差, 后期成形过程较为困难, 所以最佳装载量一般要比临界装载量略低, 文章选取 64 vol% 和 49 vol% 分别为 S-Ti 粉喂料与 HDH-Ti 粉喂料的最佳装载量。S-Ti 粉喂料和 HDH-Ti 粉喂料在最佳装载量下的自然断面形貌如图 2 所示。可以看到, S-Ti 粉喂料中颗粒呈均匀分布, 在喂料自然断裂过程中, 由于黏结剂和颗粒分离, 使得部分颗粒表面裸露, 部分黏结剂呈球壳状留在断面; 在 HDH-Ti 粉喂料中, 颗粒表面的黏结剂含量明显增多, 颗粒几乎被黏结剂完全包裹, 且没有发生明显脱落。

分析认为, 粉末形状及粉末比表面积不同是导致上述形貌差异的主要原因。由表 1 可知, S-Ti 粉的比表面积比 HDH-Ti 粉的比表面积小约 14.1%, 说明不规则 HDH-Ti 粉表面需要更多黏结剂来进行包裹, 使得喂料中 HDH-Ti 粉与黏结剂之间结合得更为牢固, 较少发生脱落现象。此外, 两种喂料最佳装载量的差值 (15%) 与比表面积差值接近, 说明球形钛合金粉比不规则钛合金粉喂料装载量高的主要原因是其粉末比表面积小, 因此降低粉末比表面积有利于提高喂料的装载量, 但提高装载量的同时会降低喂料中粉末和黏结剂的结合强度。

2.2 流动性能分析

MIM 喂料是合金粉末与黏结剂的混合物, 所以颗粒形状、粒度分布、粉末与黏结剂的结合方式、喂料混炼技术等均会影响喂料的流动性能^[12]。熔融指数 (MFI) 是测量喂料熔体流动性能, 确保喂料能够顺利充型的重要指标。最佳装载量下 S-Ti 粉喂料和 HDH-Ti 粉喂料在不同温度下的熔融指数如图 3 所示。

从图 3 中可以看到, 与 HDH-Ti 粉喂料相比, S-Ti 粉喂料具有更高的粉末装载量, 但在相同温度下, 其喂料的熔融指数反而更高, 也就是 S-Ti 粉喂料的流动性能优于 HDH-Ti 粉喂料。说明喂料的流动性能受到粉末粒形的显著影响。分析认为, HDH-Ti 粉的不规则形状及棱角, 会使得喂料在流动过程中局部颗粒间

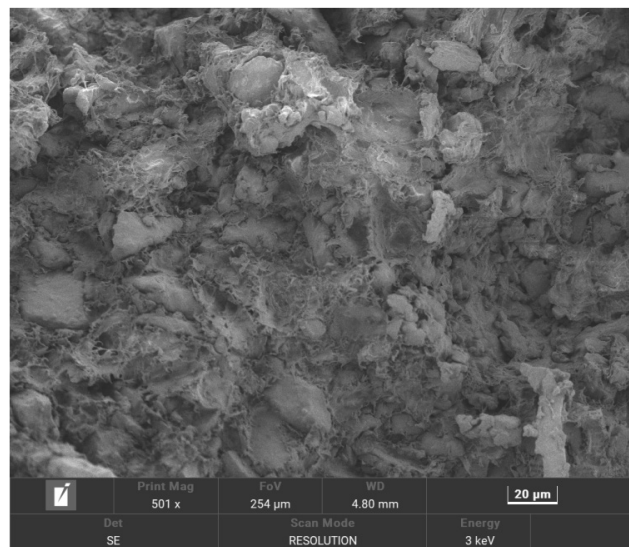
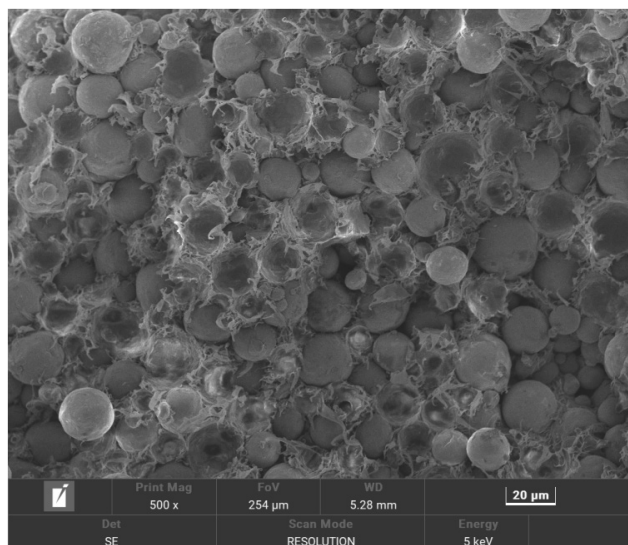


图 2 S-Ti 粉喂料和 HDH-Ti 粉喂料的显微形貌

黏结剂厚度突然变小,从而增大了颗粒之间的摩擦作用,导致喂料流动性较低。

此外,随着温度由 150 ℃ 升高到 170 ℃,S-Ti 粉喂料和 HDH-Ti 粉喂料的熔融指数均升高,流动性提高。S-Ti 粉喂料的熔融指数大幅度升高,HDH-Ti 粉喂料的熔融指数升高并不明显。说明非球形粉末喂料的流动性主要由颗粒形状决定,而温度升高对流动性的改善作用并不明显。因此,非球形粉末喂料具有更好的温度稳定性。

3 结论

(1) 球形钛合金粉喂料比不规则钛合金粉喂料装载量高,主要原因是其粉末比表面积小。降低粉末比表面积有利于提高喂料的装载量,同时会降低喂料中粉末和黏结剂的结合强度。

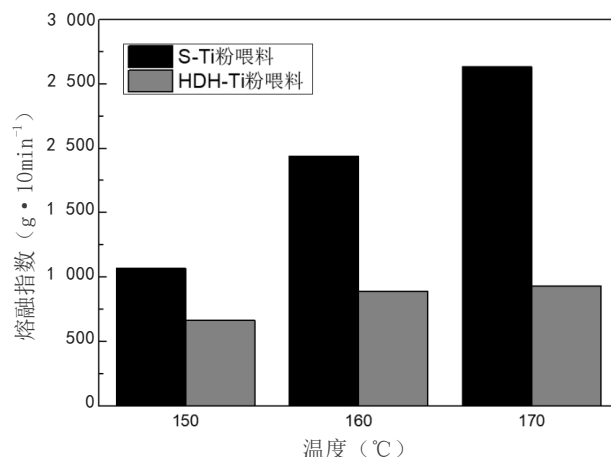


图 3 S-Ti 粉喂料和 HDH-Ti 粉喂料的熔融指数

(2) 合金粉末形状不规则有棱角时,喂料在流动过程中颗粒间摩擦作用加强,流动性降低;温度升高对非球形粉喂料的流动性改善不明显,非球形粉末喂料表现出更好的温度稳定性。

参考文献

- [1] 陈刚,路新,章林,等. 钛及钛合金粉末制备与近净成形研究进展[J]. 材料科学与工艺,2020,28(3):98-108.
- [2] 王涛,龙剑平,杨绍利,等. 钛及钛合金粉末近净成形技术研究进展[J]. 钛工业进展,2015,32(5):7-12.
- [3] 刘超,孔祥吉,吴胜文,等. 钛及钛合金金属粉末注射成形技术的研究进展[J]. 粉末冶金技术,2017,35(2):150-158.
- [4] 杨晓霞,马新武,王广春. 金属粉末注射成形钛合金工艺研究[J]. 材料科学与工艺,2021,29(2):90-96.
- [5] 郭鲤,詹浩,游玉萍,等. 钛及钛合金粉末注射成形的研究进展[J]. 机械工程材料,2018,42(6):15-21,86.
- [6] 李益民,李云平. 金属注射成形原理与应用[M]. 长沙:中南大学出版社,2004.
- [7] 杨晓霞.Ti6Al4V 合金粉末注射成形工艺研究[D]. 济南:山东大学,2021.
- [8] 郭志猛,芦博昕,杨芳,等. 粉末冶金钛合金制备技术研究进展[J]. 粉末冶金工业,2020,30(2):1-7.
- [9] 尤力,刘艳军,潘宇,等. 粉末注射成形钛合金粘结剂体系的研究进展[J]. 粉末冶金技术,2021,39(6):563-572.
- [10] THAVANAYAGAM G,SWAN J E.Optimizing hydride-dehydride Ti-6Al-4V feedstock composition for titanium powder injection moulding[J]. Powder Technology,2019,355:688-699.
- [11] 杨苏圆,吴盾,刘春林,等. 水溶性粘接剂氧化锆粉末注射成形喂料的研究[J]. 材料科学与工艺,2019,27(6):67-74.
- [12] 胡可,杨世松,邹黎明,等. 粉末粒形对钨粉末注射成形喂料流变性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2020,49(10):3472-3478.