

文章编号:1673-9981(2017)01-0034-05

金属注射成形水气联合雾化 316 不锈钢性能的研究^{*}

翁 廷, 罗 浩, 宗 伟, 周晚珠, 刘可英, 曾克里

广东省材料与加工研究所, 广东 广州 510650

摘 要:通过对水雾化、水气联合雾化和气雾化 316 不锈钢粉末喂料的流动性及其烧结性能进行研究, 探讨了水气联合雾化粉末用于粉末注射成形的可行性. 结果表明, 水气联合雾化粉末颗粒呈近球形, 以此制备的喂料粘度低, 熔体流动速率达 1108.5g/10min. 在 1365℃保温 3 h 的条件下, 水气联合雾化 316 不锈钢粉末样品的致密度达到 98.13%, 抗拉强度达 505 MPa、屈服强度达 193MPa、伸长率达 55%、硬度为 78HRB, 超过美国 MPIF 对 316L 不锈钢 MIM 制品的相应标准, 优于传统水雾化粉末的烧结性能. 水气联合雾化 316 不锈钢粉末适合用于 MIM 的批量生产.

关键词:金属注射成形;水气联合雾化;316 不锈钢粉末

中图分类号:TF122.1

文献标识码:A

金属注射成形(Metal Injection Molding, 简称 MIM)是一种适于低成本、大批量生产形状复杂、难切削加工材料的金属零部件的近净成形技术^[1-4]. MIM 制备的产品具有高的烧结密度、均匀的微观组织和优异的力学性能^[5]. 目前, 注射成形 316 不锈钢已用于生产手机、手表、工具等零部件, 具有广阔的市场应用前景^[6]. 在 MIM 的生产过程中, 粉末粒度及形貌等特性直接影响注射成形以及烧结性能, 而这些粉末特性与雾化方法直接相关. 目前, 生产用粉末主要通过雾化法制得, 按雾化介质不同, 分为气雾化、水雾化和水气联合雾化三种粉末. 水气联合雾化制备工艺是近几年兴起的一种综合粉末制备方法, 该法结合了气雾化和水雾化的优势, 能一定程度地降低粉末粒径及改善粉末颗粒形貌, 同时大大降低生产成本^[7]. 其机理是钢液在经过保温中间包流下的过程中, 超高压水及低压气体两种雾化介质由喷嘴射出, 将钢液强力破碎成大量细小液滴后迅速冷却成金属粉末.

关于金属注射成形用水雾化及气雾化 316L 不

锈钢粉末已研究较多, 而对水气联合雾化不锈钢粉末用于金属注射成形鲜有报道. 本文作者通过对水雾化、气雾化以及水气联合雾化 316L 不锈钢粉末喂料的流动性及其烧结性能进行对比, 研究水气联合雾化 316L 不锈钢粉末用于 MIM 工艺的可行性, 以为实际生产应用提供一定的理论指导.

1 试验部分

1.1 试料

试验用 316L 不锈钢粉末有 3 种: 气雾化粉末 316G(英国 Osprey 公司)、水气联合雾化粉末 316W-G(广东省材料与加工研究所)和水雾化粉末 316W(北京兴荣源公司), 其特性列于表 1, 粉末形貌如图 1 所示. 由图 1 可知, 气雾化粉末呈规则的球形, 水雾化粉末呈不规则的树枝状, 水气联合雾化粉末呈近球形, 并且粉末的粒度较细. 说明雾化介质不同, 粉末的颗粒形貌也有所不同.

收稿日期:2016-11-25

^{*} 基金来源:广东省科技计划资助项目(2013B010403019)

作者简介:翁廷(1960-), 男, 广东揭阳人, 工程师, 本科.

表 1 316 不锈钢粉末特性

Table 1 Characteristic of 316 stainless steel powder

粉末种类	D10 / μm	D50 / μm	D90 / μm	振实密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	氧含量 $w/\%$
316W	4.36	12.79	26.47	3.77	0.4729
316W-G	3.36	10.61	25.66	4.65	0.2936
316G	3.79	10.88	26.24	5.16	0.0625

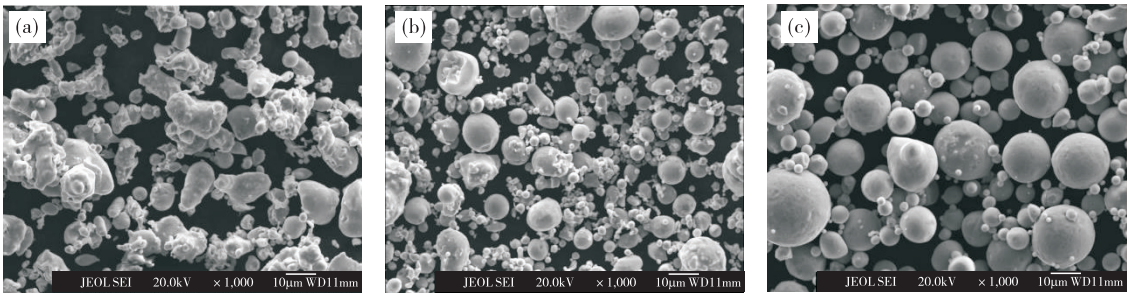


图 1 316L 不锈钢粉末 SEM 形貌

(a) 316W 粉末;(b) 316W-G 粉末;(c) 316G 粉末

Fig. 1 SEM morphology photographs of 316L stainless steel powder

(a) 316W powder;(b) 316W-G powder;(c) 316G powder

粘结剂为聚甲醛基体系,主要包括聚甲醛(POM)、高密度聚乙烯(HDPE)、乙酸-乙酸乙烯共聚物(EVA)、硬脂酸(SA)和聚乙烯蜡(PE-Wax)等.粉末装载量均为 62%.

1.2 试验方法

使用 1L 的加压式密炼机制备喂料,先将金属粉末加入密炼腔预热至 190 ℃,然后加入粘结剂一起密炼 50 min,再经造粒机造粒制备出粒状喂料.使用 JPH80 型注塑机将喂料注射成生坯,然后在 110 ℃脱脂,脱脂时间 7 h.最后在 JUTA 300 型真空烧结炉中进行烧结,烧结温度为 1365 ℃,保温 3 h.

1.3 性能测试

用 A/2-70591 千分尺测量试样的高度和直径,用 LAL4 电子分析天平(精度为 0.0001g)测量试样质量,计算生坯密度.采用排水法测量试样的烧结密度;用 HDI-1875 型布洛维硬度计测量烧结样品的 HRB 硬度;用 CEAST rheological 5000 型毛细管流变仪测定喂料的粘度.用 Leica-II 金相显微镜观察腐蚀前后烧结样品的微观组织,用 Instron 万能试验机测量烧结样品的力学性能.

2 试验结果与讨论

2.1 流动性能

在粘结剂相同的条件下,粉末的流动性能直接影响喂料的流动性能^[8].分别将 3 种粉末以相同配比与粘结剂混合制成喂料,在 190 ℃条件下测得三种喂料的粘度与剪切速率的关系曲线如图 2 所示.由图 2 可见,三种喂料的粘度均随剪切速率的增大而降低,呈现假塑性流体的特性.在同一剪切速率下,粘度值由大到小顺序为 316W>316W-G>316G,即三种喂料对应的流动性由好到差依次为 316G>316W-G>316W.这是因为粉末颗粒形状越不规则,颗粒之间以及颗粒与粘结剂之间的摩擦就越大,导致金属粉末不易与高分子聚合物沿着流动方向旋转、重排.

熔体流动速率 MFI(Melt Flow Index)是指在一定温度和压力下,喂料在一定时间内(一般 10 min)通过标准毛细管流出的熔料克数,单位为 g/10 min.表 2 为不同载荷下喂料的 MFI 值.由表 2

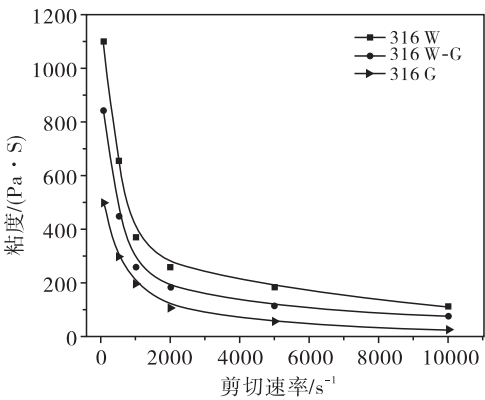


图2 剪切速率对喂料粘度的影响

Fig. 2 Effect of shear speed on viscosity of feedstock

可知,在载荷相同的条件下,喂料的熔体流动速率MFI数值由大到小顺序为:316G>316W-G>316W;在载荷为200 N的条件下,316W-G喂料的熔体流动速率为1108.5 g/10min,而市售BASF生产的316不锈钢喂料的MFI值为960 g/10min,说明用316W-G粉末制得的喂料的流动性完全可满足注射成形生产的要求,可用于生产薄壁、微小的MIM零件。

表2 喂料在不同载荷条件下的熔体流动速率MFI

Table 2 Melt flow index of feedstock

粉末种类	熔体流动速率 MFI/(g·10min ⁻¹)				
	40N	80N	120N	160N	200N
316W	23.4	61.3	140.5	292.6	577.8
316W-G	47.2	145.8	264.0	589.0	1108.5
316G	85.3	263.2	408.1	712.3	1376.4

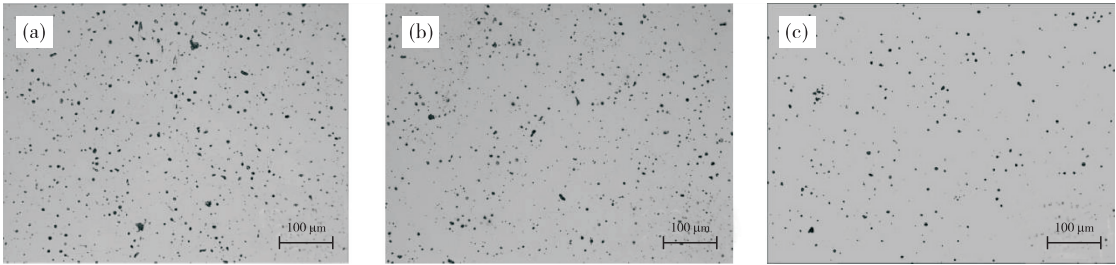


图3 种粉末烧结样品的表面形貌

(a) 316W 粉末;(b) 316W-G 粉末;(c) 316G 粉末

Fig. 3 Morphologies of sintered samples of three powders

(a) 316W powder;(b) 316W-G powder;(c) 316G powder

2.2 烧结性能

3种粉末烧结样品的密度列于表3。从表3可知,316G粉末制品的烧结密度最高,为7.961 g/cm³,316W粉末制品的烧结密度最低,为7.620 g/cm³,仅为理论密度的95.25%。原因是水雾化粉末的形状不规则且粉末氧含量高,粉末烧结活性低,不利于烧结颈的长大;而气雾化粉末颗粒呈球形,同时氧含量低,可显著提高粉末的烧结活性。316W-G粉末为近球形,氧含量也较316W粉末低,因此其烧结密度明显高于水雾化粉末,为7.85 g/cm³。3种粉末烧结样品的线收缩率由大到小依次为:316G>316W-G>316W。可见,随着烧结密度升高,线收缩率增大。

表3 粉末的烧结密度和线收缩率

Table 3 Sintering density and shrinkage of sintered sample

粉末种类	烧结密度/(g·cm ⁻³)	致密度/%	线收缩率/%
316W	7.62	95.25	14.16
316W-G	7.85	98.13	15.63
316G	7.96	99.51	16.25

图3为3种粉末烧结样品的表面形貌。由图3知,316W粉末烧结样品表面的孔隙较多、较大,且分布不均匀,这与其较低的烧结密度相对应。316W-G粉末烧结样品表面的孔隙较少、较小,且均匀,总孔隙率低于316W粉末烧结样品。316G粉末烧结样品表面不存在316W粉末烧结样品中的连续孔隙,且孔隙率最低,其致密度最高,达99.51%。说明粉末颗粒规则、接触面积大,烧结活性高,有助于烧结致密化。

2.3 力学性能

3 种粉末烧结样品的力学性能列于表 4. 由表 4 可知,316W-G 粉末烧结样品的力学性能明显优于 316W 粉末烧结样品的力学性能,其抗拉强度、屈服强度和硬度与 316G 粉末烧结样品的比较接近,延伸率达到 55%,表明 316W-G 粉末烧结后的综合力学性能较好. 对于粉末注射成形零件,其抗拉强度、屈服强度和硬度不仅与材料性质有关,还与零件的烧结密度有关,抗拉强度、屈服强度和硬度随着烧结密度的提高而增大. 由前面分析数据可知,316W-G 粉末试样的烧结密度高于 316W 粉末试样烧结密

度,所以 316W-G 粉末烧结样品的力学性能更优于 316W 粉末烧结样品.

材料的宏观硬度主要取决于材料的孔隙度,因而孔隙较多的 316W 粉末烧结样的硬度明显低于其它 2 种粉末烧结样的硬度. 316W-G 粉末烧结样品的相对密度大于 98%,达到了理想的 MIM 用细粉的高密度范围^[9],其拉伸强度、屈服强度和硬度都超过美国 MPIF 中 316L 不锈钢粉末注射成形烧结件的相应标准,表明 316W-G 粉末完全适合用于生产粉末注射成形不锈钢件.

表 4 粉末烧结样品的力学性能
Table 4 Mechanical properties of sintered samples

粉末种类	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	延伸率/ %	硬度(HRB)
316W	397	151	43	65
316W-G	505	193	55	78
316G	542	212	64	83
MPIF 标准	455	140	40	67

3 结 论

(1)用水气联合雾化法制备的 316W-G 粉末颗粒呈近球形,以此粉末制备的喂料的粘度低,熔体流动速率达 1108.5 g/10min(200N 载荷),其流动性优于传统水雾化粉末,与气雾化 316G 粉末性能接近,可用于生产薄壁、微小的 MIM 零件.

(2)在 1365 ℃保温 3 h 的条件下,水气联合雾化 316 不锈钢粉末烧结样品的致密度达 98.13%,其抗拉强度、屈服强度、延伸率和硬度分别为 505 MPa、193 MPa、55%和 78HRB,优于传统水雾化粉末的烧结性能,超过美国 MPIF 中 316L 不锈钢细粉末注射成形烧结件的相应标准. 综合考虑生产成本和产品性能,水气联合雾化 316 不锈钢粉末可广泛用于 MIM 的实际生产.

参考文献:

[1] 刘斌,余磊,骆接文. 316L 不锈钢粉末注射成形喂料流变性能的研究[J]. 粉末冶金工业,2011,21(03): 36-39.
[2] 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,2004:12-14.
[3] 徐小明,李笃信,吴渭. 改进型催化脱脂型粘结剂及其应用研究[J]. 粉末冶金工业,2015,25(5):36-41.
[4] 贺毅强,胡建斌,张奕. 粉末注射成形的成形原理与发展趋势[J]. 材料科学与工程,2015,33(1):140-142.
[5] 蒋阳,仲洪海. 注射成形 316L 不锈钢粘结剂热脱脂行为和工艺[J]. 合肥工业大学学报,2001,24(6):1072-1075.
[6] 朱盼星,张少明,徐骏. 气雾化参数对 316L 不锈钢粉末粒度的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2010,15(4):388-393.
[7] 赵同春,麻洪秋,金成海. 金属注射成形用水雾化不锈钢粉末的制备与应用[J]. 粉末冶金工业,2013,23(3): 26-31.
[8] Pacific Metals Co Ltd. Method and apparatus for production of metal powder by atomizing: US, 6254661B1[P]. 2001-07-03.
[9] THAVANAYAGAM G, PICKEING L, SWAN J E. Analysis of rheological behaviour of titanium feedstocks formulated with a water-soluble binder system for powder injection molding [J]. Powder Technology,2015(269): 227-232.

Properties of injection molded and sintered water-gas joint atomized 316L stainless steel powder

WENG Ting, LUO Hao, ZONG Wei, ZHOU Wanzhu, LIU Keying, ZENG Keli

Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangzhou 510650, China

Abstract: The flow properties, sintering densification and mechanical properties of water atomized, water-gas joint atomized and gas atomized 316L stainless steel powder were discussed. The feasibility of water-gas joint atomized powder used in powder injection molding was also studied. The results show that the MFI (melting flow index) of water-gas joint atomized powder can be reached up to 1108.5 g/10 min. The sintering experiment results indicate that the sintering activity of water-gas joint atomized powder is much higher than conventional water atomized powder. The sintered density, tensile strength, yield strength, elongation and hardness of the water-gas joint atomized powder attained at 98.13 %, 505 MPa, 193 MPa, 55% and HRB78, respectively, the values of which are also superior to the MPIF standard. Taking into account the properties and cost comprehensively, water-gas joint atomized 316 stainless steel powder can be widely used in the practical production of the metal injection molding.

Key words: metal injection molding; water-gas joint atomization; 316 stainless steel powder