

CoCrMoW 合金的粉末特性及其激光选区 熔化成形性能

余伟泳, 肖志瑜, 陈莹莹, 黄传收, 朱权利

(华南理工大学 国家金属材料近净成形工程技术研究中心, 广东 广州 510640)

摘要: 利用真空气雾化技术制备激光选区熔化成形用 CoCrMoW 合金粉末, 检测分析了粉末的特性, 引入椭圆延伸度、ISO 圆度、赘生物指数来定量表征粉末的粒形和卫星粉, 并研究了该粉末的 SLM 成形性能和电化学性能。结果表明: 粉末的 D10、D50、D90 粒度分别为: 12.50、28.71、58.05 μm ; 大部分粉末在形状上为球形和近球形, 粉末平均椭圆延伸度为 0.212, 平均 ISO 圆度为 0.607, 表面没有粘连微粒的粉末占总体积的 74.89%; 粉末的松装密度为 4.82 g/cm^3 , 振实密度为 5.71 g/cm^3 , 压缩度为 15.6%。粉末适用于激光选区熔化成形, 成形试样致密度达到 98.7%, 表面粗糙度为 8.3 μm ; 显微硬度(HV)为 3960 MPa, 抗拉强度为 1154 MPa, 屈服强度为 852 MPa, 延伸率为 8.5%, 且耐腐蚀性能优于铸造 CoCr 合金。

关键词: CoCrMoW 合金; 粉末; 粒形; 激光选区熔化; 电化学腐蚀

中图分类号: TG146.1⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)03-0973-08

激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 是一种分层制造, 逐层堆积的快速成形技术, 利用高能激光束熔化金属粉末, 直接制备出具有冶金结合、接近完全致密且性能优异的金属零件^[1-3]。与传统的制造方法相比, SLM 技术具有材料利用率高、能够成形复杂形状零件、易于实现个性化等特点^[4], 成为近几年国内外快速成形技术研究的重点。

近年来, SLM 技术发展迅猛, 对金属粉末的需求越来越大, 但目前用于 SLM 技术的金属粉末主要依赖进口, 高质量金属粉末的制备也已成为国内 SLM 技术发展的瓶颈。SLM 用金属粉末必须满足粒径细小、粒度分布较窄、球形度高、流动性好和松装密度高等要求, 粉末的性能不仅直接影响成形过程能否顺利进行, 而且影响着成形零件的物理和力学性能。因此, 有必要对用于 SLM 技术的金属粉末进行各方面的检测和表征。目前, 对 SLM 用金属粉末的特性表征基本停留在粒度和 SEM 分析上, 对粉末进行具体分析表征的相关研究较少, 特别是诸如卫星粉、延伸度、圆形度、球形度等方面的表征, 这些特性在很大程度上影响着粉末的流动性和松装密度, 进而影响最终零件的成形效果。因此, 定量分析和表征粉末的特性对 SLM 技术的应用具有重要的现实意义。

目前, 国内外已有部分学者对 SLM 成形 CoCr 合

金进行研究^[5-9], 但其采用的粉末均为进口粉末。国产 CoCrMoW 合金及其 SLM 成形性能的研究文献极少, 因此, 本研究在制备国产 CoCrMoW 合金粉末及其表征的基础上, 对粉末进行 SLM 成形试验, 以期对国产 3D 打印粉末的推广应用提供技术依据。

1 实验

本研究以与广州市越珑金属粉末有限公司共同研发的真空气雾化国产 CoCrMoW 合金粉末为研究对象, 其主要成分如表 1 所示, 粉末含氧量为 153 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。合金中添加的 Cr 元素能够在合金表面生成致密的 Cr_2O_3 氧化膜, 提高材料的耐腐蚀性能; Mo 和 W 这 2 种元素可以使合金产生固溶强化和第二相强化, 提高材料的强度, 同时能起到降低热膨胀系数的作用, 提高 CoCrMoW 合金与烤瓷粉的匹配性^[10, 11]。

采用 MASTERSIZER 2000 激光粒度分析仪对 CoCrMoW 合金粉末进行粒度分布分析。采用扫描电镜(Quanta 200)观察粉末形貌, 并采用比利时 Occhio 公司的 Flowcell FC200S + HR 粒度粒形分析仪以 10 万颗粉末为计数对粉末的粒度粒形进行具体图像分析。按照国家标准 GB/T 1479.1-2011 和 GB/T 5162-2006, 采用漏斗法测量粉末的松装密度, 并利用 FZS4-4B 型振实密度测定仪测量粉末振实密度。将粉

收稿日期: 2018-03-15

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器专项(516227805); 广东省自然科学基金团队项目(2015A030312003); 广东省科技攻关项目(2014B010129003、2016B030302006); 广州市科技计划项目(201604016049)

作者简介: 余伟泳, 男, 1992 年生, 硕士生, 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640, E-mail: yuweiyong@foxmail.com

表 1 CoCrMoW 合金粉末成分

Table 1 Chemical composition of CoCrMoW alloy powder (ω/%)

Co	Cr	Mo	W	Si
Bal.	25.73	5.9	5.6	1.5

末制成金相试样，抛光后，用王水(V(HCL):V(HNO₃)=3:1)进行腐蚀，在扫描电镜上观察粉末的显微组织。

利用华南理工大学自主研发的 DiMetal-100 激光选区熔化设备对 CoCrMoW 合金粉末进行 SLM 成形，其工艺参数为激光功率 P=160 W，扫描间距 h=0.08 mm，扫描速度 v=400 mm/s，加工层厚 t=0.025 mm。成形过程中选用正交层错扫描方式，采用 316L 不锈钢作为基板，氩气作为保护气体。采用扫描电镜(Quanta 200)观察成形样品表面形貌，同时利用 TALYSURF CLI1000 表面轮廓仪测量试样的表面粗糙度。用 DHV-1000Z 型显微维氏硬度计测试试样的显微硬度，并在 CMT5105 型 100 kN 万能试验机上进行拉伸试验，拉伸试样尺寸如图 1。

采用 CHI 760E 电化学工作站对铸造及 SLM 成形的 CoCrMoW 合金进行电化学腐蚀测试，腐蚀介质 pH 值为 6.8 的人工唾液，实验在(37 ± 0.5) °C 条件下进行，实验前将样品浸泡在腐蚀介质中 2 h 后开始测量开路电位，在开路电位稳定后对样品进行极化测试，设置测试的初始电位为开路电位减去 250 mV，最终电位为 1400 mV，扫描速度为 2 mV/s。

2 结果与讨论

2.1 粉末特性分析

2.1.1 粉末的粒度分布

图 2 为 CoCrMoW 合金粉末的粒度分布，其 D10、D50、D90 分别为 12.50、28.71、58.05 μm，78.45% 的粉末粒度在 10~50 μm 之间，粒径小于 10 μm 的超细粉末占 5.2%，粒径大于 100 μm 的大颗粒粉末占 0.36%。

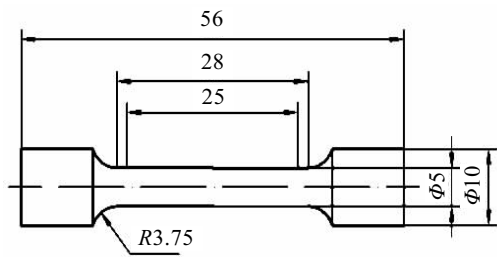


图 1 拉伸试样尺寸

Fig.1 Dimensions of tensile specimens

2.1.2 粉末的粒形分析

图 3 为 CoCrMoW 合金粉末 SEM 照片。图 3b~3e 为部分典型颗粒的形貌。可以看出粉末主要为球形和近球形，部分粉末表面有卫星颗粒粘附(图 3c)，也有少量不规则形状的粉末(图 3d、3e)。

由 SEM 照片可以清晰地看到粉末的粒形、表面粘附情况，但要具体量化粉末的形貌参数较为困难，需要在获得许多分散开的粉末颗粒清晰的 SEM 照片后，通过软件进行图像分析统计后才能得到具体的形貌参数，操作过程较为麻烦且不客观。因此，尝试采用 Flowcell FC200S + HR 分析仪对粉末的椭圆延伸度、ISO 圆形度、卫星化指数等粒形参数进行定量分析，创新性地对 SLM 用 CoCrMoW 合金粉末的形貌进行量化分析，为金属粉末的粒形分析提供新的参考依据。

(1) 粉末的椭圆延伸度

椭圆延伸度 (Ell.Elongation) 是一个衡量颗粒截面长度和宽度关系的指标，是由颗粒截面等效椭圆宽度 Ell.Width 和长度 Ell.Length 计算出来的，其计算公式为：

$$Ell.EL = 1 - \frac{Ell.Width}{Ell.Length} \quad (1)$$

如果颗粒是圆的，等效椭圆的长度和宽度相等，则椭圆延伸度的数值为 0；粉末越细长，长度和宽度相差越大，其椭圆延伸度越接近 1。表 2 为试验中测量得到的几种 CoCrMoW 合金粉末的椭圆延伸度计算值及形貌表征。可以看出，椭圆延伸度较小的颗粒截面接近一个圆形，而长条状的颗粒椭圆延伸度较高。图 4 为测试得到的 CoCrMoW 合金粉末椭圆延伸度与体积分数的关系图。

从图 4 可以看到，测试的 CoCrMoW 合金粉末中，椭圆延伸度在 0.64 以下的占总体积的 99%，椭圆延伸度小于 0.3 的占总体积的 79.59%，椭圆延伸度在 0.64 及 0.3 左右的颗粒形貌示意图见表 2。测试结果显示，

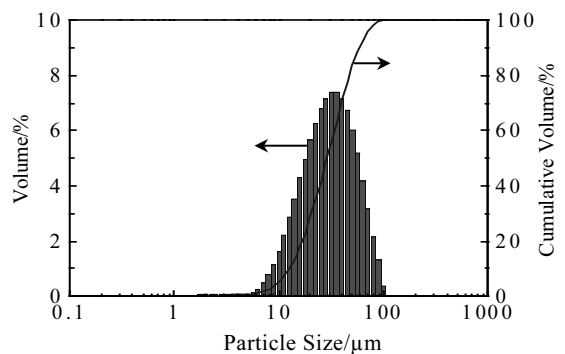


图 2 CoCrMoW 合金粉末粒度分布

Fig.2 Particle size distribute of CoCrMoW alloy powder

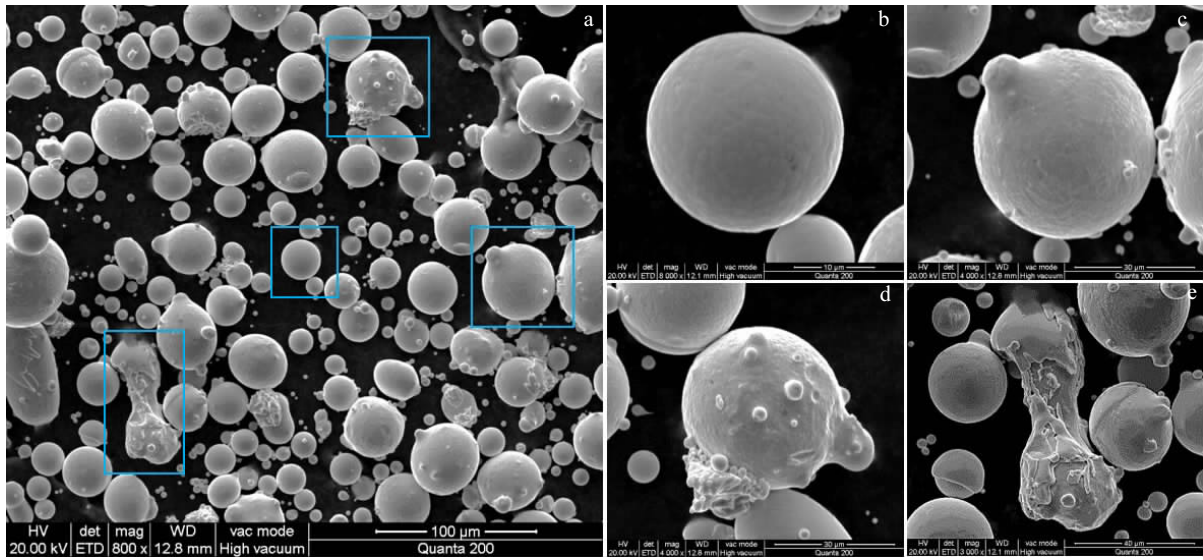


图 3 CoCrMoW 合金粉末形貌

Fig.3 Morphology of CoCrMoW alloy powder (a) and representative particles (b~e)

表 2 部分 CoCrMoW 粉末的椭圆延伸度

Table 2 Ell.Elongation of representative particles

0.0183	0.2101	0.3024	0.6557

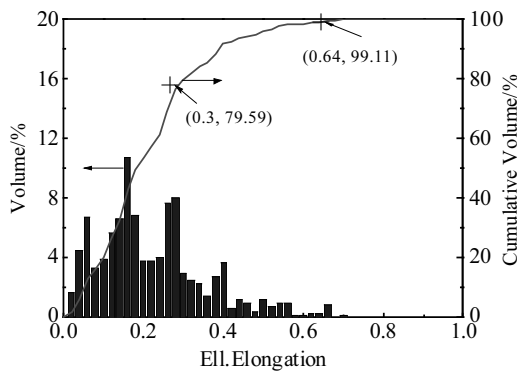


图 4 CoCrMoW 合金粉末椭圆延伸度和体积分数关系图

Fig.4 Ell. Elongation of CoCrMoW alloy powder vs. volume fraction

CoCrMoW 合金粉末椭圆延伸度平均值为 0.212, 延伸度为 0.21 左右的颗粒形貌示意图见表 2。可以看出, 测试粉末中, 非细长的粉末占 80%以上, 较为细长的粉末的体积分数小于 1%, 说明粉末中细长粉含量较低。

(2) 粉末的 ISO 圆度

ISO 圆度 (ISO Circularity) 是衡量粉末颗粒的投影与圆形相似的程度, 综合考虑了颗粒周长的平滑度, 根据 ISO9276-6:2008, 其计算公式为:

$$C = \frac{\pi}{P} \sqrt{4A/\pi} = \sqrt{\frac{4\pi A}{P^2}} \quad (2)$$

式中, A 为颗粒投影截面积, P 是指颗粒截面的周长, $\sqrt{4A/\pi}$ 表示与所测粉末颗粒投影面积相等的等效圆的直径。可以看出, 颗粒的 ISO 圆度值 C 实际上代表了颗粒截面等效圆的周长与颗粒周长的比值, 其值越接近 1, 表明颗粒的截面投影越接近一个完美的圆形。表 3 为测试中出现的几种 CoCrMoW 合金粉末的 ISO 圆度计算值及形貌表征。可以看出, ISO 圆度为 0.9394 的颗粒截面基本为一个圆形, 随着圆度的减小, 颗粒截面形状越来越不规则。

测试结果显示: CoCrMoW 合金粉末的 ISO 圆度平均值为 0.607, 该圆度值对应的颗粒形貌与表 3 中 ISO 圆度值为 0.5921 对应的颗粒形貌示意图相似。图 5 为 CoCrMoW 合金粉末的圆度与体积分数的关系。由图可见, ISO 圆度大于 0.48 的粉末占总体积的 80.51%, ISO 圆度小于 0.35 的粉末占总体积的 3.03%, ISO 圆度在 0.48 和 0.35 左右的颗粒截面形貌示意图如表 3, 其中 ISO 圆度为 0.48 左右的粉末截面大致为椭圆形, 说明所测 CoCrMoW 合金粉末中 80%以上的粉末截面为圆形或者椭圆形, 同时也有部分不规则粉末存在。

表 3 部分 CoCrMoW 粉末的 ISO 圆度

Table 3 ISO circularity of representative particles

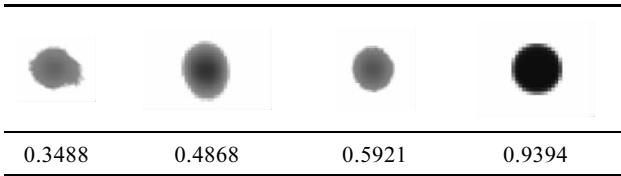


表 4 CoCrMoW 合金粉末赘生物指数

Table 4 Outgrowth of CoCrMoW alloy powder

Outgrowth	0	0.5	0.67	0.75
Volume/%	74.89	20.97	4.07	0.07
Cumulative volume/%	74.89	95.86	99.93	100

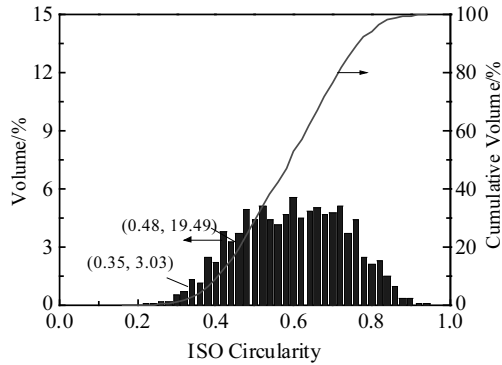


图 5 CoCrMoW 合金粉末 ISO 圆度和体积分数关系图

Fig.5 ISO circularity of CoCrMoW alloy powder vs. volume fraction

(3) 粉末的卫星化

卫星颗粒指的是粘附在大颗粒粉末上面的小颗粒，其形成原因主要是在雾化过程中，在高速气流的作用下，雾化室内存在大量速度、直径不同的金属熔滴，其中直径小的金属熔滴冷却速度快，冷却凝固后在雾化室内气流的作用下与大的金属熔滴碰撞并在其表面粘结，凝固后便在大粒径粉末表面形成了卫星颗粒^[12]，这是雾化过程不可避免的现象，这种粘附颗粒会在一定程度上影响粉末的流动性，进而影响到激光选区熔化成形的铺粉过程。

粉末卫星化情况无法通过粒度分布判断，通过扫描电镜照片(如图 3)可以观察出来，但是无法很好地量化。欧奇奥公司采用赘生物指数(Outgrowth)作为衡量未团聚颗粒卫星化情况的一个指标，其具体含义为：利用图像法获取颗粒的截面信息后，通过软件进行分析，如果颗粒表面没有粘连，则定义其赘生物指数为 0；如果颗粒上粘连了 1 个微粒，则定义其测量值为 0.5；如果颗粒上粘连了 2 个微粒，定义其测量值为 0.67；如果颗粒上粘连了 3 个微粒，其测量值则为 0.75。

表 4 为得到的粉末体积分数和赘生物指数的关系。由表可以看出：74.89%的粉末颗粒赘生物指数为 0，说明表面没有微粒粘连的粉末占总体积的 74.89%；20.97%的颗粒赘生物指数为 0.5，说明表面粘连了一颗微粒的粉末占总体积的 20.97%，99.93%的颗粒赘生物指数均在 0.67 及以下，说明 99.93%的粉末表面粘

连 2 个或 2 个以下的颗粒，仅有 0.07%的粉末表面粘连了 3 个微粒。

2.1.3 粉末的流动特性

实验中首先按照 GB/T 1482-2010 金属粉末流动性测定标准，采用孔径为 2.5 mm 的霍尔流速计对 CoCrMoW 合金粉末的流动性进行检测。结果显示，粉末无法自由下落，在漏斗上轻敲一下，粉末开始流动，但流动中途停止，无法连续流动。按照该国标规定，如果出现粉末无法连续流动的现象，表明该粉末试样不适用该标准。

为了对 CoCrMoW 合金粉末的流动性进行评定，必须利用其他方式对粉末流动性进行测试，参照美国药典对粉体流动性的表征方法，采用压缩度 (Compressibility) 表征粉体流动性，压缩度具有直接且实用的特点，其计算公式^[13]为：

$$\text{Compressibility} = \frac{\rho_{\text{tapped}} - \rho_{\text{bulk}}}{\rho_{\text{tapped}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中， ρ_{tapped} 为粉末的振实密度， ρ_{bulk} 为粉末的松装密度，其数值与粉末流动性能的关系如表 5^[14]。

采用漏斗法测得粉末的松装密度 ρ_{bulk} 为 4.82 g/cm³，利用 FZS4-4B 型振实密度测定仪测量得到粉末的振实密度 ρ_{tapped} 为 5.71 g/cm³，通过计算得到其压缩度为 15.6%，对照表 5 可知，粉末的流动性良好。

2.1.4 粉末显微组织

图 6 为 CoCrMoW 合金粉末表面组织形貌及腐蚀后的内部微观组织。可以看到粉末表面凝固组织主要为胞状晶和树枝晶结构，其中大粒径粉末(> 40 μm)的表面凝固组织主要为树枝晶，有部分胞状晶，粒度较小的粉末表面以胞状晶为主，树枝晶相对较少。在雾化制备粉末的过程中，雾化室内金属熔滴的冷却速度随着熔滴直径的减小而增大，随着冷却速度的增大，晶粒长大时间缩短，故形成的树枝晶数量减少。粉末

表 5 压缩度与流动性关系

Table 5 Relationship between compressibility index and flowability

Compressibility/ %	≤10	11~15	16~20	21~25	26~31	32~37	>38
Flowability	Best	Better	Good	Normal	Bad	Worse	Worst

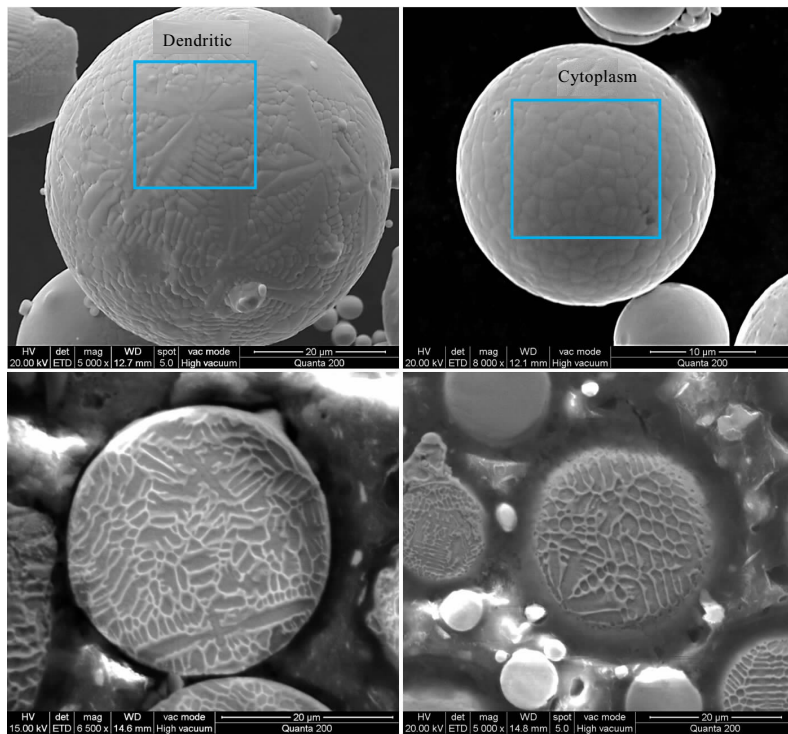


图 6 CoCrMoW 合金粉末表面及内部组织形貌

Fig.6 Surface morphologies (a, b) and internal microstructures (c, d) of CoCrMoW alloy powders

内部的微观组织与表面凝固组织类似, 由树枝晶及胞状晶组成。

2.2 SLM 成形 CoCrMoW 合金的性能

2.2.1 SLM 成形 CoCrMoW 合金的显微组织及力学性能

图 7 为成形样品的表面 SEM 形貌。可以看出, 成形样品表面熔道连续, 熔道之间的搭接紧密, 表面相对平整, 没有明显的孔洞产生。通过阿基米德排水法测得其相对密度为 98.7%。从样品表面 SEM 照片还可看到有部分小颗粒粘附在成形样品表面, 降低了成形样品的表面质量。这些颗粒的形成原因是在 SLM 成形过程中, 高能量的激光作用在金属粉末上, 使金属粉末和熔池产生粉末飞溅和液滴飞溅, 这些飞溅颗粒散落到零件表面时的温度较高, 最终冷却后粘结在试样表面, 使试样表面质量降低。经测量, 其表面粗糙度 R_a 为 8.3 μm 。

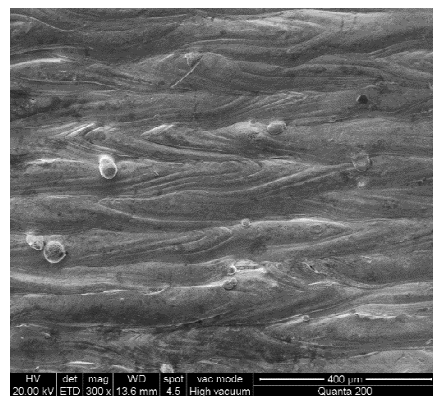


图 7 SLM 成形 CoCrMoW 合金的表面形貌

Fig.7 Surface morphology of CoCrMoW alloy manufactured by SLM

图 8 为成形试样上表面及侧表面腐蚀前后的金相组织。可以看出抛光后样品的上表面及侧面无明显差异, 均无夹杂、裂缝等缺陷, 只有少量微小孔洞, 表明样品成形效果好, 相对密度高。从图 8c、8d 可以看出, 经过腐蚀后, 样品内部的熔道清晰可见, 其中图 8c 为上表面腐蚀后的组织, 可以观察到同一层内的熔

道搭接情况; 图 8d 是样品侧面腐蚀后的组织, 观察到层与层之间的熔道搭接情况。从图 8d 还可以看到, 样品内部有 2 种不同方向的熔道, 这是因为成形时采用的扫描策略为正交层错扫描方式, 这种成形方式更有利于层与层之间的致密搭接。同时, 从图 8c、8d 还可以观察到, 相邻熔道的形状不同、大小不均匀,

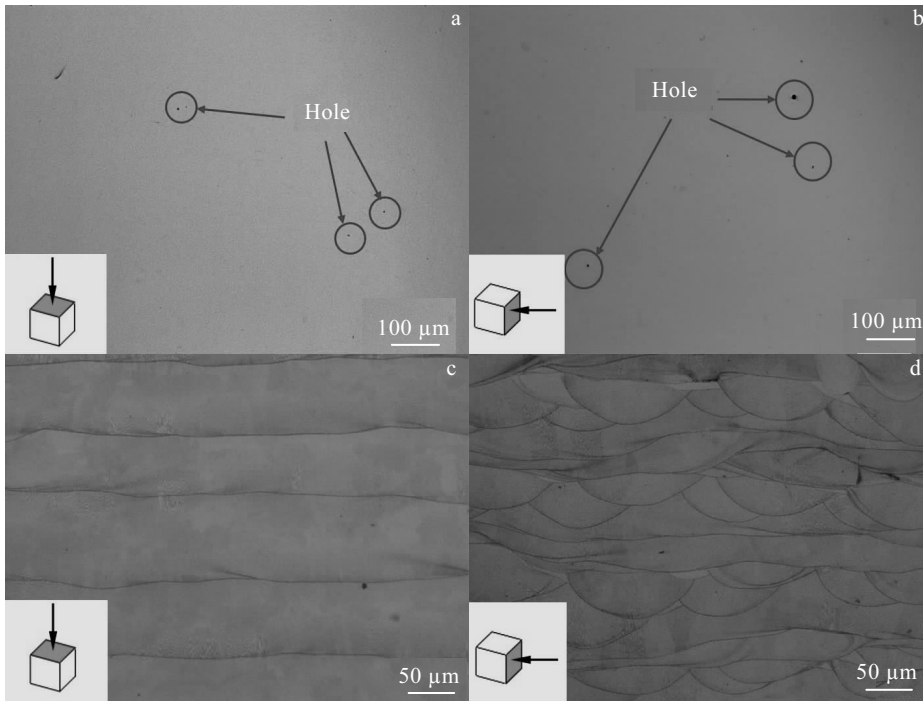


图 8 CoCrMoW 合金的金相组织

Fig.8 OM images of CoCrMoW alloy: (a, c) top view before etched and (b, d) side view before etched

相邻层间的分界线高低不平，这主要是因为成形过程中，已成形区域表面不是一个完全平整的平面，有部分飞溅颗粒存在(如图 7)，影响下一层粉末的铺粉效果，同时成形过程中会存在铺粉误差，这些因素导致同一层内不同位置的粉末厚度无法保证完全一致，不同层间的粉末厚度也难以保持完全一致，最终导致熔道间出现形态差异。

对成形试样进行拉伸性能测试，拉伸试样的成形效果如图 9。拉伸样的轴线垂直于成形方向，去除试样底部的支撑并对试样表面进行打磨，表面无明显划痕后进行拉伸试验。表 6 为 SLM 成形试样的拉伸性能和显微硬度以及 BEGO 公司提供的成分相近的铸造其中 SLM 试样显微硬度(HV)为 3960 MPa, 抗拉强度为 1154 MPa, 屈服强度为 852 MPa, 近伸率为 8.5%。CoCrMoW 烤瓷合金 Wirobond C 的力学性能参数^[15]。对比可知，SLM 钴铬钼钨合金的抗拉强度、屈服强度和显微硬度均高于铸造件，而延伸率与后者相当。

对断口进行宏观观察，图 10a 为宏观断口形貌。可以看出试样在断裂之前没有明显的颈缩现象，断口平整，有脆性断裂的特征。图 10b~10d 为不同放大倍数下 CoCrMoW 合金的拉伸断口形貌。从图 10b 可以

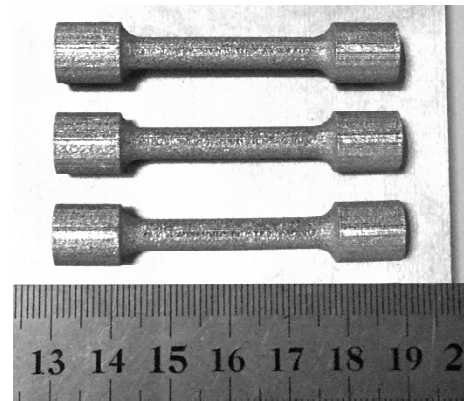


图 9 拉伸试样成形效果图

Fig.9 Tensile results of specimens

看到断面具有明显的解理平面、撕裂棱和凹凸不平的解理台阶；从图 10c 可以观察到断口含有大量的韧窝，表明材料具有一定的韧性。从图 10d 可以看到，断口中的韧窝尺寸均在 0.5 μm 以下，韧窝尺寸较小，说明材料塑性变形不大，与所测试的延伸率仅为 8.5%相符合。综合分析可知，材料的断裂机理属于准解理断裂。

2.2.2 SLM 成形 CoCrMoW 合金的耐腐蚀性能

将试样提前浸入温度为 37 °C、pH 值为 6.8 的人工唾液中稳定 2 h 后开始测量工作电极的开路电位,待开路电位稳定后开始进行极化测试,测试得到的极化曲线如图 11,图中横坐标为电位,纵坐标为电流密度的对数。通过 CHI 760E 电化学工作站自带的软件对极化曲线进行分析计算,得到 2 组 CoCrMoW 合金的自腐蚀电位 E_{corr} 及自腐蚀电流密度 I_{corr} ,具体结果如表 7。

表 6 SLM 及铸造 CoCrMoW 合金力学性能

Table 6 Mechanical property of SLM and cast CoCrMoW alloy

Process	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/ %	Microhardness, HV/MPa
SLM	1154±2	852±19	8.5±0.7	3960±50
Casting ^[15]	720	480	9.0	3100

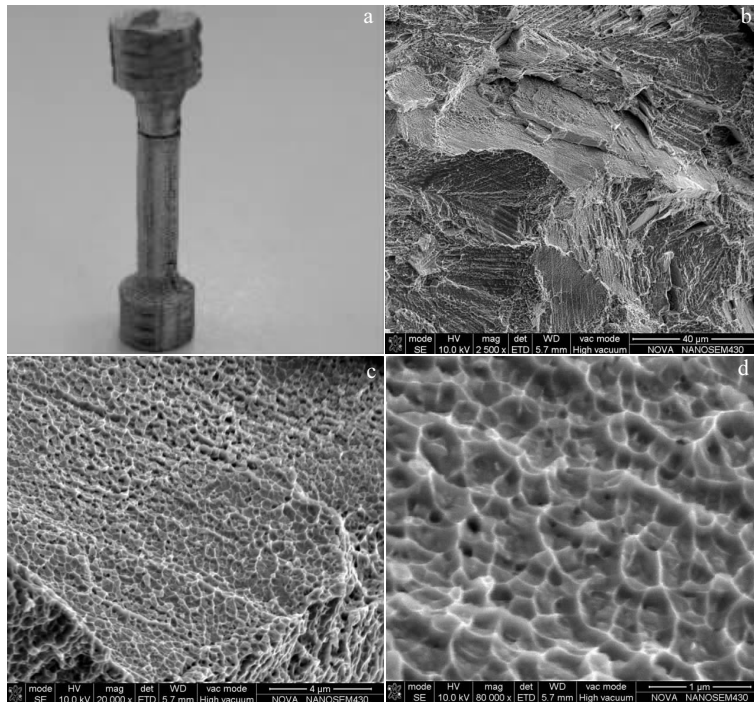


图 10 试样拉伸断口形貌

Fig.10 Fracture surface of tensile specimens: (a) macroscopic fracture surface; (b) microcosmic fracture surface; (c) the magnified fracture surface of Fig.10(b); (d) fracture dimple

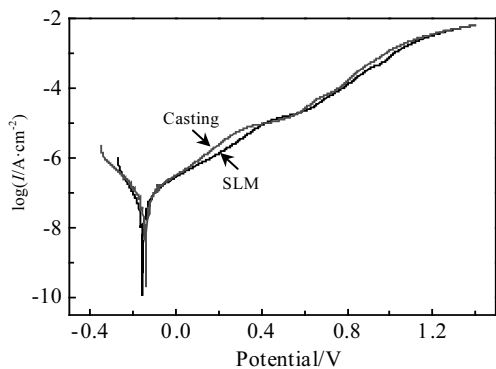


图 11 CoCrMoW 合金极化曲线

Fig.11 Electrochemical polarization curves of the CoCrMoW alloy

表 7 CoCrMoW 合金电化学极化曲线分析结果

Table 7 Analysis results of electrochemical polarization curves of the CoCrMoW alloy

Process	Free corrosion potential, E_{corr}/mV	Corrosion current density, $I_{corr}/\times 10^{-8} A \cdot cm^{-2}$
SLM	-156	6.29
Casting	-143	9.27

由表 7 可以看到, SLM 成形试样的自腐蚀电位虽然略低于铸造件,但其自腐蚀电流密度为 $6.29 \times 10^{-8} A/cm^2$,小于铸造件的 $9.27 \times 10^{-8} A/cm^2$,在一定条件下,腐蚀电流密度越小,腐蚀速度越慢,金属耐腐蚀性能越好。说明在温度为 37 °C, pH 值为 6.8 的人工唾液中, SLM 成形的 CoCrMoW 合金腐蚀速率较铸造 CoCrMoW 合金慢,具有相对较好的耐腐蚀性能。

3 结 论

1) 研制的 CoCrMoW 合金粉末的 D10、D50、D90 分别为: 12.50、28.71、58.05 μm ; 粉末的平均椭圆延伸度为 0.212, 平均 ISO 圆度为 0.607, 大部分粉末为球形或近球形, 表面没有粘连微粒的粉末占总体积的 74.89%, 仅有 0.07% 的粉末表面粘连了 3 个微粒; 粉末松装密度为 4.82 g/cm^3 , 振实密度为 5.71 g/cm^3 , 压缩度为 15.6%, 粉末流动性良好。

2) CoCrMoW 合金粉末表面凝固组织主要为胞状晶和树枝晶; 粉末内部显微组织主要由树枝晶组成。

3) 研制的 CoCrMoW 粉末适用于激光选区熔化成形, 成形试样致密度达到 98.7%, 表面粗糙度为 8.3 μm ; 显微硬度(HV)为 3960 MPa, 抗拉强度为 1154 MPa, 屈服强度为 852 MPa, 延伸率为 8.5%。

4) 在温度为 37 $^{\circ}\text{C}$, pH 值为 6.8 的人工唾液中, 该 SLM 成形 CoCrMoW 合金的耐腐蚀性能优于铸造件。

参考文献 References

- [1] Su Haijun(苏海军), Wei Kaichen(尉凯晨), Guo Wei(郭伟) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2013(6): 1567
- [2] Mumtaz K A, Erasenthiran P, Hopkinson N. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2008, 195(1-3): 77
- [3] Demir A G, Monguzzi L, Previtali B. *Additive Manufacturing*[J], 2017, 15: 20
- [4] Zeng Guang(曾光), Han Zhiyu(韩志宇), Liang Shujin(梁书锦) et al. *Materials China*(中国材料进展)[J], 2014(6): 376
- [5] Takaichi A, Suyalatu, Nakamoto T et al. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*[J], 2013, 21(3): 67
- [6] Schwindling F S, Seubert M, Rues S et al. *Tribology Letters*[J], 2015, 60(2): 25
- [7] Demir A G, Previtali B. *Materials & Design*[J], 2017, 119: 338
- [8] Xin X Z, Xiang N, Chen J et al. *Materials Letters*[J], 2012, 88(8): 101
- [9] Xin X Z, Chen J, Xiang N et al. *Dental Materials*[J], 2014, 30(3): 263
- [10] Matkovic T, Matkovic P, Malina J. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2004, 366(1-2): 293
- [11] Wu Zhikai(吴芝凯), Li Ning(李宁). *Special Casting and Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2011, 31(2): 164
- [12] Özbilen S. *Powder Metallurgy*[J], 1999, 42(1): 70
- [13] The United States Pharmacopeial Convention. US Patent, 29-NF 24[P]. 2006
- [14] Wang Liang(王亮), Pan Jing(潘静), Yuan Ying(袁颖) et al. *China Powder Science and Technology*(中国粉体技术)[J], 2016(5): 28
- [15] Liu Zhi(刘治), Lv Xiaowei(吕晓卫), Zhang Chunbao(张春宝) et al. *Journal of Practical Stomatology*(实用口腔医学杂志)[J], 2010, 26(4): 433

Powder Characteristics and Selective Laser Melting Forming Properties of CoCrMoW Alloy

Yu Weiyong, Xiao Zhiyu, Chen Yingying, Huang Chuanshou, Zhu Quanli
(National Engineering Research Center of Near-Net-Shape Forming for Metallic Material,
South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: CoCrMoW alloy powder for 3D printing was prepared by vacuum gas atomization. Particle characteristics were studied and the Ell.Elongation, ISO Circularity and Outgrowth were introduced to characterize the particle shape. And the Selective Laser Melting (SLM) forming properties of the powders and electrochemical properties of the formed parts were studied. The results indicate that the measured D10, D50 and D90 are 12.50, 28.71 and 58.05 μm , respectively. The majority of powder particles are spherical or nearly spherical and the mean Ell.Elongation and ISO Circularity are 0.212 and 0.607, respectively. About 74.89% of the powder particles have no adhesion on the surface. The apparent density and tap density are 4.82 and 5.71 g/cm^3 , respectively, and the compressibility is 15.6%. The CoCrMoW powder is suitable for SLM and the relative density and surface roughness are 98.7% and 8.3 μm , respectively. The microhardness (HV), tensile strength, yield strength and elongation are 3960 MPa, 1154 MPa, 852 MPa and 8.5%, respectively. And the corrosion resistance of CoCrMoW alloy prepared by SLM is better than that of the cast alloy.

Key words: CoCrMoW alloy; powder; particle shape; selective laser melting; electrochemical corrosion

Corresponding author: Xiao Zhiyu, Ph. D., Professor, National Engineering Research Center of Near-Net-Shape Forming for Metallic Material, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China, E-mail: zhyxiao@scut.edu.cn