

激光选区熔化成型 CoCrMo 合金摩擦学性能研究

张国庆¹ 杨永强¹ 林 辉¹ 宋长辉² 张自勉¹ 余家阔²

¹华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640

²北京大学第三医院运动医学研究所, 北京 100083

摘要 应用摩擦磨损试验机进行摩擦磨损实验并对实验前后零件称重以分析其不同条件下摩擦系数和磨损率的变化;对零件实验前后表面组织和形貌采用金相显微镜和扫描电子显微镜分别进行观察以研究其磨损机理。结果表明,在干摩擦、氯化钠(NaCl)和人工唾液润滑条件下,SLM成型件正面的磨损率比铸造件分别低27.92%、21.15%和19.03%,比侧面分别低26.97%、10.88%和14.97%;SLM成型件与铸造件相比,表面组织更加均匀,基本无孔洞;在干摩擦下表现为磨粒磨损,在NaCl及人工唾液润滑条件下主要表现为磨粒磨损和疲劳磨损。

关键词 激光技术;钴铬钼合金;激光选区熔化;摩擦系数;磨损率;表面形貌

中图分类号 TG15; TG665

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0802013

Study on Tribology Performance of CoCrMo Alloy Parts Manufactured by Selective Laser Melting

Zhang Guoqing¹ Yang Yongqiang¹ Lin Hui¹ Song Changhui¹ Zhang Zimian¹ Yu Jiakuo²

¹School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

²Institute of Sports Medicine, Peking University Third Hospital, Beijing 100083, China

Abstract The friction wear testing machine is applied in the friction and wear experiments and the weight of the parts before and after experiments are compared in order to investigate the variance of friction coefficients and wear rates under different conditions. In order to study the wear mechanism, the surface structure and morphology of CoCrMo parts before and after experiments are observed by the metalloscope and the scanning electron microscope, respectively. The results show that, under the respective lubrication condition of dry friction, sodium chloride (NaCl) or artificial saliva, the wear rate of the front face of the SLM manufactured parts is 27.92%, 21.15% or 19.03% lower than that of the casting parts, and 26.97%, 10.88% or 14.97% lower than that of the lateral face. Compared with casting parts, the SLM manufactured parts have a uniform surface structure on which there nearly no holes. Under the condition of dry friction, abrasive wear dominates. In contrast, under the lubrication conditions of NaCl and artificial saliva, abrasive wear and fatigue wear dominate.

Key words laser technique; CoCrMo alloy; selective laser melting; friction coefficient; wear rate; surface topography

OCIS codes 140.3390; 170.1420; 160.1435

收稿日期: 2016-03-23; **收到修改稿日期:** 2016-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(81327001, 51275179)、广东省重大科技专项(2016B090914002, 2014B010131003, 2015B090920002)、广州市产学研协同创新重大专项(201604010045)

作者简介: 张国庆(1986—),男,博士研究生,主要从事激光选区熔化方面的研究。E-mail: zhangguoqing1202@sohu.com

导师简介: 杨永强(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事激光选区熔化方面的研究。

E-mail: meiyqyang@scut.edu.cn (通信联系人)

1 引 言

激光选区熔化(SLM)是一种基于激光熔化金属粉末的增材制造技术^[1-2]。通过专用软件对三维模型进行切片分层,获得截面数据,然后将其导入快速成型设备,采用材料逐层累加的方法制造实体零件。通过逐层累加,几乎可以实现任意几何形状零件的制造,加工后的零件具有组织致密的优点^[3-6]。

SLM 技术因其独特的优势,在医学植入体领域逐步得到认可,可以针对人体骨组织不同缺损部位和缺损形状,实现金属修复体的快速制备,制备出外形复杂、性能优越、个性化的颌骨、股骨、颅骨、颧颞骨、关节等人体代用器官^[7-8]。钴铬钼(CoCrMo)合金因其具有良好的耐腐蚀、耐磨损和生物相容性,已广泛应用于人体髋和膝关节假体的制造^[9-11]。铸造 CoCrMo 合金因其加工较容易而常用于关节假体的制造,但铸造 CoCrMo 合金存在一些铸造缺陷,如气泡、孔洞、粗大晶粒、树枝状结构等,这些缺陷导致其拉伸、耐腐蚀等使用性能降低,也影响了其耐磨损性能^[12-13]。SLM 成型 CoCrMo 合金零件具有比铸造 CoCrMo 合金更高的抗拉强度和硬度,现已用于制造可承受大载荷的关节假体。因此,基于个性化植入体的应用、生物相容性等多方面考虑,对 SLM 成型 CoCrMo 合金耐磨性的研究是必不可少的^[14]。

王庆良等^[15]对锻造和铸造 CoCrMo 合金的摩擦学性能进行研究发现,低载荷时锻造 CoCrMo 合金的摩擦系数略高于铸造合金,高载荷时二者的摩擦系数相当。董建东等^[16]对锻造渗碳 CoCrMo 合金的摩擦学性能的研究发现,与未处理试样相比,渗碳后锻造 CoCrMo 合金的磨损率降低了 40%;未处理的 CoCrMo 合金磨损表面存在宽且深的犁沟和疲劳破坏形成的剥落坑,渗碳试样表面仅有浅且窄的划痕。Hanawa 等^[17]对氮离子注入的无镍 CoCrMo 合金的摩擦磨损性能进行研究发现,氮离子的注入能有效降低 CoCrMo 合金之间滑动界面的摩擦系数,减少磨损。Kumagai 等^[18]对锻造无镍和碳 CoCrMo 合金在干摩擦下的摩擦磨损性能进行研究发现,锻造过程中 CoCrMo 合金具有很高的加工硬化率,该硬化率导致 CoCrMo 合金的晶格结构从面心立方 fcc-(CoCrMo)变为密排六方 hcp-(CoCrMo),这有助于改善合金在干摩擦下的磨损性能。

目前国内外对 SLM 成型 CoCrMo 合金耐磨性研究还比较少,尤其是其在不同润滑条件下的耐磨性。本研究对比了 CoCrMo 合金 SLM 成型件与铸造件在不同润滑条件下的优缺点,应用金相显微镜、扫描电子显微镜(SEM)对其摩擦磨损前后表面形貌进行观察,研究了磨损机理,为利用 SLM 直接制造 CoCrMo 合金的应用提供了重要依据。

2 材料与方 法

2.1 试样的制备

依据中华人民共和国国家标准金属材料磨损实验方法(GB/T12444-2006)对尺寸要求的规定来进行零件制备及相关实验,块形磨损试样如图 1 所示。

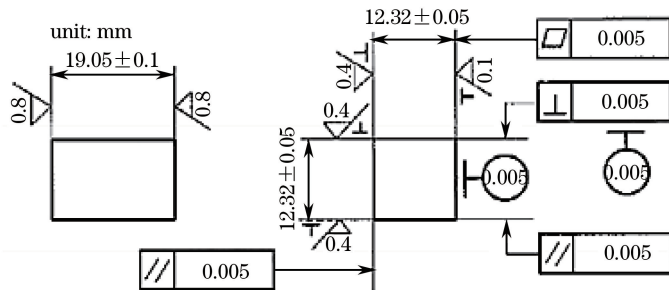


图 1 块形磨损试样

Fig. 1 Block-shaped wear sample

在自主研发的 SLM 成型设备 Dimetal-100 上进行加工,实验样件加工每组不少于三个。成型材料为英国 Sandvik Osprey 公司生产的 CoCrMo 合金金属粉末,成分满足美国材料实验协会(ASTM) F1377 标准要求,如表 1 所示。

表 1 SLM 成型所用粉末材料与 ASTM F1377 标准对比

Table 1 Comparison between powder material for SLM manufacturing and that under ASTM F1377 standard

Element	Mass fraction /%		Element	Mass fraction /%	
	CoCrMo powder	ASTM F1377 standard		CoCrMo powder	ASTM F1377 standard
Cr	29.4	27~30	C	0.15	<0.35
Mo	6	5~7	Ni	0.09	<0.5
Si	0.8	<1	Al	<0.010	<0.1
Mn	0.75	<1	Ti	<0.010	<0.1
Fe	0.26	<0.75	W	<0.010	<0.2
N	0.19	<0.25	Co	Bal.	Bal.

采用氮气作为保护气体,氧体积含量控制在 0.03% 以下;加工激光功率为 170 W,扫描速度为 500 mm/s,扫描间距为 60 μm,加工层厚为 35 μm,采用邻层错开隔层正交的扫描方式。

2.2 摩擦磨损实验

实验前所有试样经砂纸打磨表面抛光处理,分别用去离子水和乙醇进行超声波清洗 10 min,并在烤箱中进行干燥,采用美国 ADE 公司型号为 MiaoXAM2.5X-50X 的三维形貌仪测量其粗糙度。每组试样不少于三个,测试结果取其平均值。采用杭州诺恩精密仪器设备有限公司型号为 MM-2000 的摩擦磨损实验机进行摩擦磨损实验,接触方式为线接触,摩擦副上下试样材料分别为 CoCrMo 合金与 45 号钢。分别在干摩擦、体积分数为 0.9% 氯化钠(NaCl)、人工唾液润滑条件下进行实验,法向施加载荷为 120 N、旋转速度为 200 r/min、每个样品实验时间为 1 h,实验温度为常温,在同一条件下同一样品重复三次实验取平均值。

2.3 分析方法

影响材料磨损性能的因素主要有三个方面:材料、力学和环境因素^[19]。实验采用德国赛多利斯公司 TE124S 电子天平分别测量摩擦磨损实验前后样品的重量,得到试样的磨损量,并计算磨损率来评定试样的耐磨性,即

$$\omega = \frac{\Delta m}{F \cdot S}, \quad (1)$$

式中 ω 为磨损率, Δm 为磨损量,实验载荷 $F = 120$ N,总的滑行距离 $S = 1703136$ mm。

采用常州三丰公司 SCHV-V3.0 显微硬度计测定样品的显微硬度,载荷范围为 0.98~9.8 N,每种载荷的测试点为三个,结果取其平均值,分析在不同载荷条件下硬度差别以及硬度对耐磨性能的影响。采用金相显微镜分别对 SLM 成型件侧面与正面和铸造件的表面组织形貌金相进行观察,分析其磨损机理。采用 X 射线衍射仪(XRD)分析 SLM 成型与铸造 CoCrMo 合金的物相组成,XRD 测试参数为:采用铜靶的 X 射线管,入射线波长为 0.15418 nm,采用 Ni 滤薄片,X 射线产生管电压为 40 kV,管流为 40 mA,X 射线扫描步长为 0.02°,X 射线扫描速度为 19.2 s/step,狭缝开口角度为 1°。通过美国 FEI 公司 NOVA NANOSEM 43 环境 SEM 拍摄摩擦实验后零件表面磨损形貌,对造成磨损的损伤机理和现象进行分析。

3 结果与讨论

3.1 零件成型效果

采用 SLM 设备成型后的零件如图 2 所示,试样经简单抛光,表面粗糙度可达 0.1 μm,满足实验试样要求。

3.2 SLM 成型件正面、铸造件摩擦系数对比分析

图 3 所示为在不同润滑条件下摩擦系数的测试结果。从图 3(a)~(c)中可以看出,SLM 成型件正面与铸造件在干摩擦及人工唾液润滑条件下的摩擦系数相差不大,SLM 成型件正面相比于铸造件摩擦系数略有降低。在干摩擦与 NaCl 润滑条件下,起始摩擦系数较小,达到最大值后,略有下降而后趋于稳定,人工唾液润滑条件下摩擦系数较快趋于稳定。在干摩擦情况下摩擦系数波动平缓,稳定在 0.71 左右,人工唾液润滑条件下摩擦系数波动较大,在 0.33 左右,分析其原因可能是在干摩擦条件下 CoCrMo 材料经过反复摩擦磨损,产生的微小磨屑不易排出,堆积粘附于两接触副之间,形成以磨粒为主的磨损,摩擦系数较大,而产生的磨粒较小,因此摩擦系数波动也较小;在人工唾液润滑条件下,人工唾液会在磨损表面形成一层蛋白质薄膜,

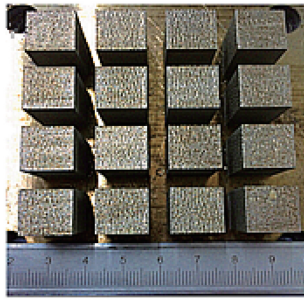


图 2 SLM 成型的摩擦磨损实验样件

Fig. 2 SLM manufactured samples for friction and wear tests

加之溶液对磨屑的冲刷会减轻磨粒磨损的程度,降低摩擦系数,其磨损形式转化为以粘着、疲劳为主的磨损,此情况下的摩擦系数小但波动严重。NaCl 润滑条件下的摩擦系数比干摩擦与人工唾液润滑均要高,在 0.77 左右,NaCl 润滑条件下的摩擦系数在初始阶段比干摩擦与人工唾液润滑条件下低。

图 3(d)为 SLM 成型件正面在不同润滑条件下的摩擦系数对比结果,可以发现干摩擦与 NaCl 润滑条件下摩擦系数较为接近,NaCl 润滑条件下摩擦初始阶段的摩擦系数较干摩擦条件下低,随后急剧上升到一定值后稳定,而在人工唾液润滑条件下摩擦系数较低。其原因可能是摩擦初始阶段 NaCl 润滑液温度较低,随着温度升高磨损形式发生转变,这使得摩擦系数逐渐增大;人工唾液在试件表面形成了一层蛋白质薄膜,增强了润滑效果。

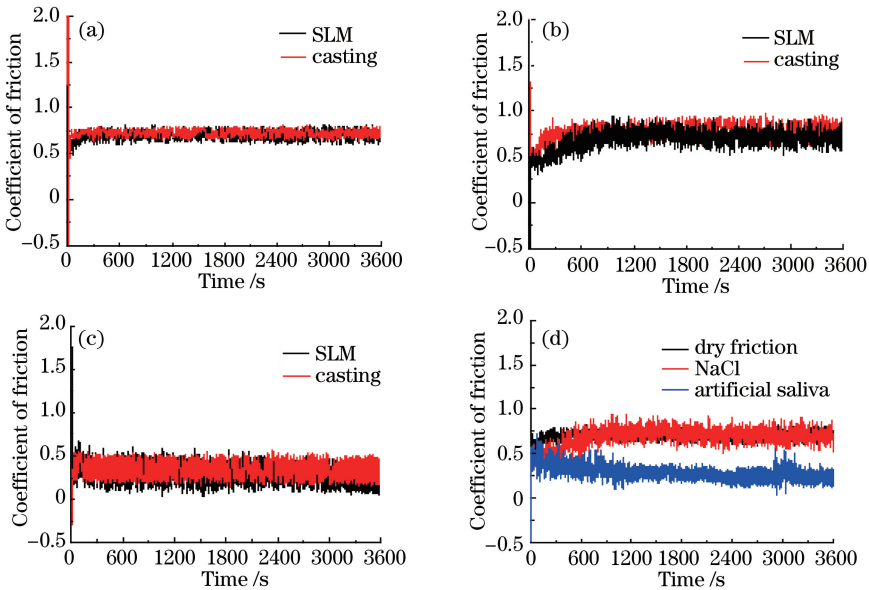


图 3 摩擦系数曲线。(a) 干摩擦;(b) NaCl;(c) 人工唾液;(d) 不同润滑条件下 SLM 成型件正面

Fig. 3 Curves of friction coefficient. (a) Dry friction; (b) NaCl; (c) artificial saliva;

(d) front face of SLM manufactured parts under different lubrication conditions

3.3 SLM 成型件正面、侧面摩擦系数对比分析

受 SLM 成型特点的影响,成型零件的正面(平行于激光成型方向)、侧面(垂直于激光成型方向)特性不一致,所以有必要对其侧面耐磨性能进行研究。图 4 所示为不同润滑条件下摩擦系数的测试结果,可以发现其侧面摩擦系数与正面基本相同,不同润滑条件下摩擦系数曲线趋势基本一致,差别主要为摩擦系数波动范围较大,在干摩擦条件下波动范围最大,在 NaCl 与人工唾液润滑条件下相当。分析其原因可能与 SLM 逐层累加的成型方式有关。

3.4 SLM 成型件与铸造件磨损量、磨损率

根据(1)式计算出 CoCrMo 合金 SLM 成型件与铸造件在不同润滑条件下的磨损率,如表 2 所示。从表

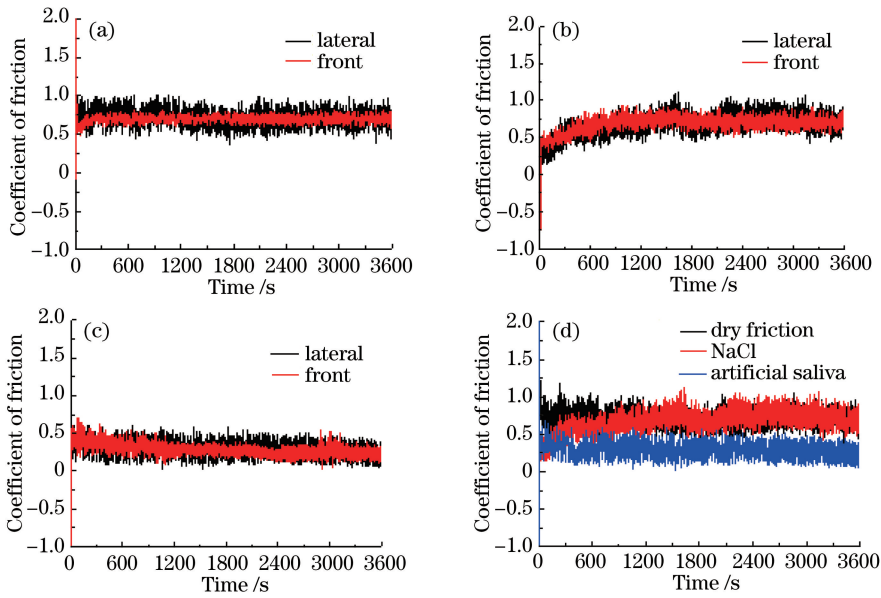


图 4 摩擦系数曲线。(a) 干摩擦;(b) NaCl;(c) 人工唾液;(d) 不同润滑条件下 SLM 成型件侧面
 Fig. 4 Curves of friction coefficient. (a) Dry friction; (b) NaCl; (c) artificial saliva;
 (d) lateral face of SLM manufactured parts under different lubrication conditions

2 可以看出,在相同润滑条件下,SLM 成型 CoCrMo 零件的磨损率相比于铸造件均有不同程度的降低,说明 SLM 成型 CoCrMo 零件具有较好的耐磨性。对比 SLM 成型件正面和铸造件,在三种条件下磨损率的大小关系相同,干摩擦条件下试样的磨损率最大,另外两种润滑条件下的磨损率与干摩擦相比下降明显。三种不同润滑条件下,SLM 成型 CoCrMo 零件相比于铸造件,磨损率分别下降 27.92%、21.15%、19.03%。

SLM 成型件正面与侧面磨损量、磨损率略有差别,正面比侧面磨损率在三种润滑条件下分别低 26.97%、10.88%、14.97%。分析其原因主要与 SLM 零件成型特点有关,干摩擦时,较大的摩擦力易造成表层金属的剥落,剥落的磨屑不能及时排出,在接触面上推碾,造成严重的磨粒磨损,材料损伤严重,故在干摩擦条件下磨损率最大。而在润滑条件下,磨粒磨损程度降低,磨损率有所下降。其中,在 NaCl 润滑条件下摩擦力最大,磨损方式由磨粒磨损转为疲劳磨损,磨损过程中润滑液温度升高,造成摩擦力较大、磨损量较低的情况;在人工唾液润滑条件下,人工唾液中的蛋白质沉积在样件表面,形成粘稠状的薄膜,阻碍磨屑对表面金属的切削作用,磨损率最小。

表 2 CoCrMo 合金在不同条件下的平均磨损率

Table 2 Average wear rate of CoCrMo alloy under different conditions

Sample	Experimental condition	Wearing capacity /mg	Average wear rate /($10^{-10} \text{ kg}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)
Front face of SLM manufactured parts	Dry friction	22.2	1.0862
	NaCl	4.1	0.2006
	Artificial saliva	3.4	0.1664
Lateral face of SLM manufactured parts	Dry friction	30.4	1.4875
	NaCl	4.6	0.2251
	Artificial saliva	4.0	0.1957
Casting parts	Dry friction	30.8	1.5070
	NaCl	5.2	0.2544
	Artificial saliva	4.2	0.2055

由上述分析可知,不同成型方式、不同润滑条件下零件磨损率差异非常小。因此有必要对其进行统计意义下的分析,以判断各因素对零件磨损率的影响是否显著。

表 3 为不同条件下零件的磨损率,对其进行方差分析发现,不同润滑条件下的磨损率均方根值为 0.0001,不同成型方式下的磨损率均方根值为 0,润滑条件与成型方式两者交互作用下的磨损率均方根值为

0.0001。这表明不同润滑条件、不同成型方式、润滑条件与成型方式两者交互作用对零件磨损率的影响均是显著的。

表 3 CoCrMo 合金在不同条件下的磨损率

Table 3 Wear rate of CoCrMo alloy under different conditions

Sample	Wear rate of dry friction	Wear rate of NaCl	Wear rate of artificial saliva
	$/(10^{-10} \text{ kg}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	$/(10^{-10} \text{ kg}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	$/(10^{-10} \text{ kg}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$
Front face of	1.1791	0.2183	0.1782
SLM manufactured	0.9647	0.1903	0.1529
parts	1.1148	0.1932	0.1681
Lateral face of	1.3875	0.2041	0.1843
SLM manufactured	1.5743	0.2306	0.2181
parts	1.5007	0.2406	0.1847
Casting parts	1.4830	0.2694	0.2138
	1.3906	0.2386	0.1876
	1.6474	0.2552	0.2151

3.5 显微硬度

通常情况下,材料的耐磨性能与其硬度成正比,但是耐磨性好的材料不一定硬度高^[16],因此有必要对 SLM 成型件和铸造件的硬度进行研究,以探究其硬度与耐磨性之间的关系。图 5 所示为显微硬度测试结果,施加载荷 F 从 0.98 N 增加至 9.8 N,每种载荷下的测试点为三个,结果取其平均值。随着载荷的增加,CoCrMo 合金的硬度达到最高值后逐渐趋于稳定。铸造件的硬度约为 339 HV, SLM 成型件硬度约为 501 HV。在所有载荷条件下,SLM 成型件的硬度都明显高于铸造件。分析其原因可能是 SLM 零件成型过程类似于焊接,快速加热冷却过程形成了比铸造件更细小的晶粒,从而导致了硬度的提高。对比 SLM 成型件与铸造件磨损量可知磨损量和硬度呈负相关关系。

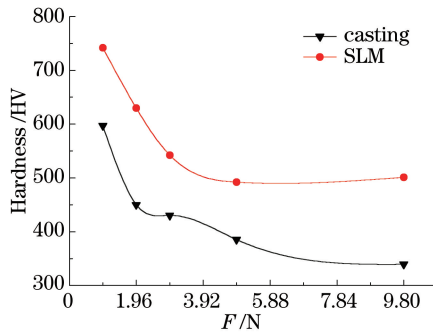


图 5 SLM 成型件与铸造件显微硬度

Fig. 5 Microscopic hardnesses of SLM manufactured parts and casting parts

3.6 SLM 成型件与铸造件金相组织、表面形貌分析

3.6.1 CoCrMo 零件表面组织分析

CoCrMo 合金零件表面组织形貌如图 6 所示,可以看出,SLM 成型件正面(平行于激光扫描方向)金相组织中激光扫描熔道清晰可见,表面由多道具有相同组织特点的组织组成,无孔洞,熔道与熔道彼此相互平行且有重叠。SLM 成型件侧面有少许孔洞,相邻的熔道成型高低有差异且在同一熔道中也出现起伏现象,这种成型熔道的不平整是由于采用了邻层错开隔层正交的扫描方式,因此 SLM 成型件侧面比正面摩擦系数波动大。

SLM 成型零件过程为快速加热快速冷却过程,具有晶粒细化作用。激光加热零件后,热量主要沿垂直于基板的 Z 轴(平行于激光扫描方向)的负方向散失,因此液态金属的凝固过程具有明显的方向性。冷却方式消除了横相晶界,最终形成与基板垂直的树枝晶,零件呈现硬而脆的特点,因此具有较高的耐磨性。铸态 CoCrMo 合金以粗大枝晶组织为主,如图 6(c)中白色部分所示,粗大枝晶组织为平衡组织 ϵ -CoCr 相;碳化物相为图 6(c)中灰色离散的不规则块状部分,含量相对较少;图 6(c)中针状部分组织为非平衡 α -CoCr 马氏体

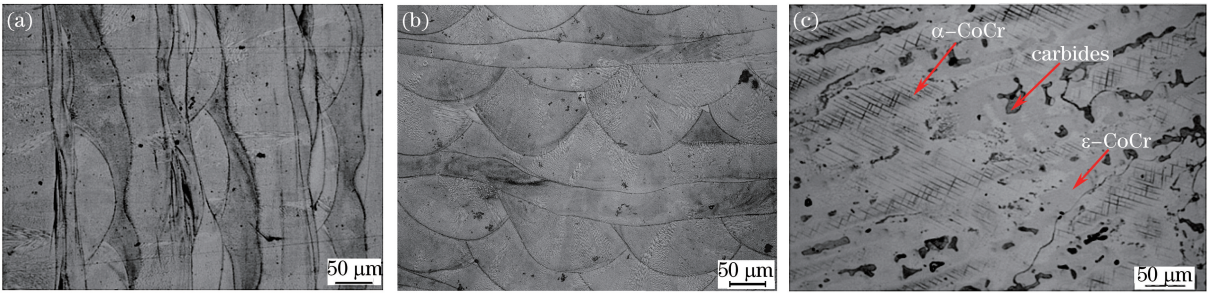


图 6 CoCrMo 合金零件表面组织形貌。(a) SLM 成型件正面;(b) SLM 成型件侧面;(c) 铸造件

Fig. 6 Surface morphology of CoCrMo alloy parts. (a) Front face and (b) lateral face of SLM manufactured parts; (c) casting parts

相。另外,表面具有较多孔洞,这也说明了铸造件耐磨性低的原因。

3.6.2 能量分散谱与 XRD 物相分析

由图 7 所示的 CoCrMo 合金能谱仪(EDS)分析结果可知,SLM 成型件与铸造件的 Co、Cr 和 Mo 元素含量相当。但从 EDS 扫描曲线波动趋势可以看出,SLM 成型件比铸造件的 Co、Cr 和 Mo 元素分布更加均匀,这也可能是导致 SLM 成型件摩擦系数低的一个原因。

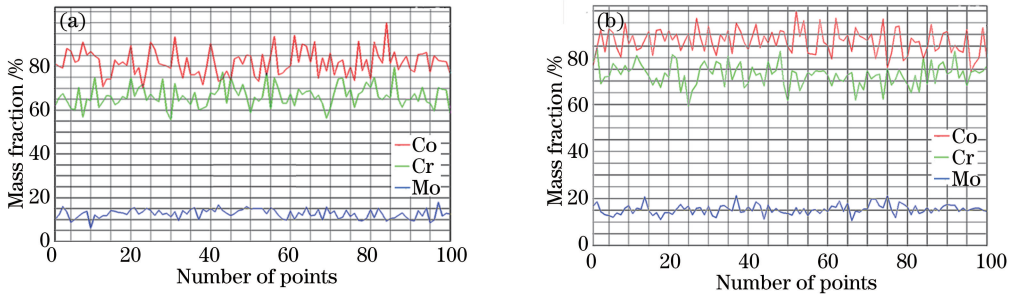


图 7 CoCrMo 合金能谱图。(a) 铸造件;(b) SLM 成型件

Fig. 7 Energy spectra of CoCrMo alloy. (a) Casting parts; (b) SLM manufactured parts

由图 8 所示的 XRD 分析结果可以看出,SLM 成型和铸造 CoCrMo 合金由 α 和 ϵ 两相组成,二者皆由 α -CoCr 和 ϵ -CoCr 固溶体相组成。前者为面心立方 fcc-(CoCrMo),后者为密排六方 hcp-(CoCrMo)。SLM 成型 CoCrMo 合金中, ϵ -CoCr 固溶体相变小, α -CoCr 固溶体相的衍射峰强度明显增强。同时 SLM 成型件衍射峰峰形比铸造件宽,说明 SLM 成型件晶粒较细,内应力较大。SLM 成型和铸造 CoCrMo 合金中 α -CoCr 和 ϵ -CoCr 固溶体相的比例有明显差别,SLM 成型合金中含有较高的非平衡 α -CoCr 相, α -CoCr 相与 ϵ -CoCr 相的强度比约为 3.79;铸造合金中含有较高的 ϵ -CoCr 相, α -CoCr 相与 ϵ -CoCr 相的强度比仅为 1.26。因此,SLM 成型件中可能存在未能检测到的高硬化合物。

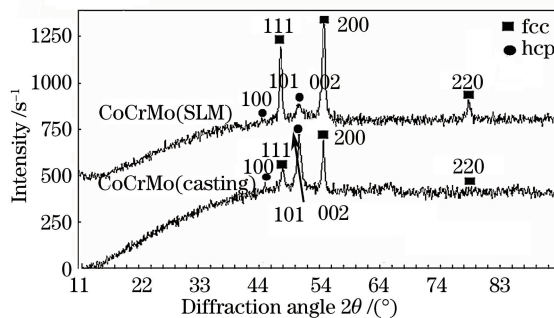


图 8 CoCrMo 合金 XRD 衍射图。(a) 铸造件;(b) SLM 成型件

Fig. 8 XRD patterns of CoCrMo alloy. (a) Casting parts; (b) SLM manufactured parts

3.6.3 CoCrMo 零件磨损形貌分析

图 9 所示为摩擦实验后 CoCrMo 合金零件表面形态,可以看出 SLM 成型件与铸造件 CoCrMo 合金在干摩擦、NaCl 以及人工唾液润滑条件下的磨损形貌均出现许多平行于运动方向的沟槽,这表明磨损过程中存在磨粒磨损。不同成型方式、润滑条件下磨损引起的沟槽的宽度和深度各有不同,干摩擦条件下试样磨痕宽度最大,磨痕表面最粗糙,沟槽的宽度和深度最大。SLM 成型件表面在干摩擦条件下出现较多磨屑,分析其原因是磨损过程中磨屑不能及时排出,在表面反复挤压、粘结,形成以磨粒磨损为主并伴随有粘着的磨损。铸造件在磨损过程中下犁沟两侧出现脊状堆积,产生了明显的塑性变形,试样表面摩擦后有不同程度的划伤,表面出现很多麻点,分析其原因可能是磨损过程中磨粒在其表面反复挤压引起的,其磨损机制主要为磨粒磨损。

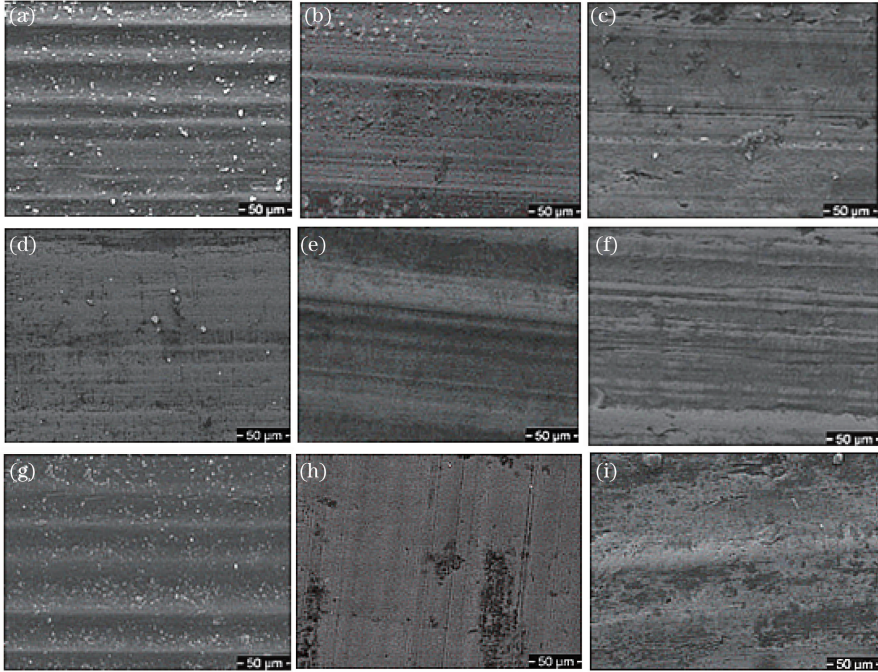


图 9 CoCrMo 合金在多种条件下的磨损形貌。(a) SLM 成型件正面,干摩擦;(b) SLM 成型件正面,氯化钠;(c) SLM 成型件正面,人工唾液;(d) SLM 成型件侧面,干摩擦;(e) SLM 成型件侧面,氯化钠;(f) SLM 成型件侧面,人工唾液;(g) 铸造件,干摩擦;(h) 铸造件,氯化钠;(i) 铸造件,人工唾液

Fig. 9 Wear morphologies of CoCrMo alloy under many conditions. (a) Front face of SLM manufactured parts with dry friction; (b) front face of SLM manufactured parts with NaCl; (c) front face of SLM manufactured parts with artificial saliva; (d) lateral face of SLM manufactured parts with dry friction; (e) lateral face of SLM manufactured parts with NaCl; (f) lateral face of SLM manufactured parts with artificial saliva; (g) casting parts with dry friction; (h) casting parts with NaCl; (i) casting parts with artificial saliva

相比于干摩擦,在 NaCl 润滑条件下,SLM 成型件与铸造件表面均表现为犁沟比较浅窄,表面几乎没有磨粒,分析其原因可能是溶液对接触摩擦面具有润滑、分割与冷却作用,磨损机制主要是疲劳磨损。NaCl 条件下的磨损形貌出现了明显的腐蚀痕迹。

在人工唾液润滑条件下,SLM 成型件与铸造件表面均表现为犁沟相对于干摩擦较浅、NaCl 润滑较深,表面有少量磨粒,铸造件比 SLM 成型件具有更多的脱层。分析其原因是人工唾液溶液中的蛋白质沉积在样品表面,形成粘稠状的薄膜,对接触表面具有较好的润滑作用,但由于其粘度较大,在磨损过程中出现粘结脱层,其磨损机理为以粘着为主伴随磨粒磨损。

4 结 论

通过对比 SLM 成型件正面与铸造件摩擦系数发现,在干摩擦与人工唾液润滑条件下,SLM 成型件比铸

造件的摩擦系数低,两者在氯化钠润滑条件下的摩擦系数均比在干摩擦与人工唾液润滑条件下的摩擦系数高,且摩擦系数波动量均介于干摩擦与人工唾液润滑条件之间。对比 SLM 成型件正面与侧面摩擦系数发现,不同润滑条件下正、侧面摩擦系数曲线变化趋势基本一致,差别主要为 SLM 成型件侧面摩擦系数波动范围较大。在干摩擦、氯化钠和人工唾液润滑条件下,SLM 成型件比铸造件的磨损率分别低 27.92%、21.15%和 19.03%;在不同润滑条件下,SLM 成型件正面比侧面磨损率分别低 26.97%、10.88%、14.97%。通过对 SLM 成型件表面组织形貌的研究发现,零件表面是由多道具有相同特点的组织组成,无孔洞,熔道与熔道彼此平行且有重叠,而铸造件表面出现少许孔洞。CoCrMo 合金 SLM 成型件与铸造件在不同润滑条件下的磨损形貌均出现许多平行于运动方向的沟槽。上述研究结果为 CoCrMo 合金在医学领域的应用提供了一定依据。

参 考 文 献

- 1 Yang Yongqiang, Wang Di, Wu Weihui. Research progress of direct manufacturing of metal parts by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0601007.
杨永强, 王 迪, 吴伟辉. 金属零件选区激光熔化直接成型技术研究进展[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0601007.
- 2 Song Changhui, Yang Yongqiang, Ye Ziheng, *et al.* Development of freeform design and manufacturing based on selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080026.
宋长辉, 杨永强, 叶梓恒, 等. 基于选区激光熔化快速成型的自由设计与制造进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080026.
- 3 Zhang Xiaobo, Dang Xin'an, Yang Lijun. Study on balling phenomena in selective laser melting [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(6): 061401.
张晓博, 党新安, 杨立军. 选择性激光熔化成形过程的球化反应研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 061401.
- 4 Su Haijun, Wei Kaichen, Guo Wei, *et al.* New development of laser rapid forming and its application in high performance materials processing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(6): 1567-1574.
苏海军, 尉凯晨, 郭 伟, 等. 激光快速成形技术新进展及其在高性能材料加工中的应用[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(6): 1567-1574.
- 5 Sun Tingting, Yang Yongqiang, Su Xubin, *et al.* Research on densification of 316L stainless steel powder in selective laser melting process[J]. Laser Technology, 2010, 34(4): 443-446.
孙婷婷, 杨永强, 苏旭彬, 等. 316L 不锈钢粉末选区激光熔化成型致密化研究[J]. 激光技术, 2010, 34(4): 443-446.
- 6 Xu Qin. Study on process parameters optimization of selective laser sintering with gray relational analysis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 121406.
许 勤. 灰色关联分析选区激光烧结成型研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 121406.
- 7 Huang Weidong, Lü Xiaowei, Lin Xin. Research progress and developing trends on laser fabrication of biomedical materials[J]. Materials China, 2011, 30(4): 1-10.
黄卫东, 吕晓卫, 林 鑫. 激光成形制备生物医用材料研究现状与发展趋势[J]. 中国材料进展, 2011, 30(4): 1-10.
- 8 Su X, Yang Y Q, Yu P, *et al.* Development of porous medical implant scaffolds via laser additive manufacturing[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(s1): s181-s187.
- 9 Varano R, Bobyn J D, Medley J B, *et al.* Effect of microstructure on the dry sliding friction behavior of CoCrMo alloys used in metal-on-metal hip implants[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 2006, 76(2): 281-286.
- 10 Pramanik S, Agarwal A K, Rai K N. Chronology of total hip joint replacement and materials development[J]. Trends in Biomaterials and Artificial Organs, 2005, 19(1): 15-26.
- 11 Vidal C V, Muñoz A I. Effect of thermal treatment and applied potential on the electrochemical behaviour of CoCrMo biomedical alloy[J]. Electrochimica Acta, 2009, 54(6): 1798-1809.
- 12 Serro A P, Gispert M P, Martins M C L, *et al.* Adsorption of albumin on prosthetic materials: Implication for tribological behavior[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2006, 78(3): 581-589.
- 13 Milošev I, Strehblow H H. The composition of the surface passive film formed on CoCrMo alloy in simulated physiological solution[J]. Electrochimica Acta, 2003, 48(19): 2767-2774.
- 14 Wang Chengtao. Human biotribology[M]. Beijing: Science Press, 2008: 1-50.
王成焘. 人体生物摩擦学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-50.

- 15 Wang Qingliang, Zhang Lei, Dong Jiandong, *et al.* Study on the tribological properties of CoCrMo alloy forging and casting[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Science Edition), 2010, 25(3): 7-12.
王庆良, 张 磊, 董建东, 等. 锻造和铸造 CoCrMo 合金的摩擦学性能研究[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2010, 25(3): 7-12.
- 16 Dong Jiandong, Wang Qingliang, Zhang Lei. Investigation on tribological properties of forged CoCrMo alloy after carburizing[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(5): 73-77.
董建东, 王庆良, 张 磊. 锻造 CoCrMo 合金渗碳的摩擦学性能研究[J]. 中国表面工程, 2010, 23(5): 73-77.
- 17 Hanawa T, Nakazawa K, Kano K, *et al.* Friction-wear properties of nitrogen-ion-implanted nickel-free Co-Cr-Mo Alloy [J]. Materials Transactions, 2005, 46(7): 1593-1596.
- 18 Kumagai K, Nomura N, Ono T, *et al.* Dry friction and wear behavior of forged Co-29Cr-6Mo alloy without Ni and C additions for implant applications[J]. Materials Transactions, 2005, 46(7): 1578-1587.
- 19 Gao Wanzhen, Liu Zuomin, Gao Xinlei. Surface wear and friction materials design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 1-35.
高万振, 刘佐民, 高新蕾. 表面耐磨损与摩擦学材料设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 1-35.