

# 选择性激光熔融钴铬合金成形工艺研究

刘 威 刘婷婷 廖文和 蒋立异

南京理工大学高端装备数字化设计制造研究中心, 江苏 南京 210094

**摘要** 针对牙科钴铬合金(remanium star CL)进行选择性激光熔融(SLM)成形实验,测试分析钴铬合金成形件微观组织及表面质量,研究激光功率、扫描速度、扫描间距及其综合作用下的激光能量密度对钴铬合金件表面粗糙度、相对密度及维氏硬度的影响。研究表明,相同激光能量密度下,不同的激光功率、扫描速度、扫描间距也会导致不同的表面粗糙度。SLM成形钴铬合金件相对密度随激光功率的增加而增大且变化速率逐渐缓慢;扫描速度在80~100 mm/s时,钴铬合金SLM成形相对密度最大值达94.95%。随着激光扫描间距的增大,钴铬合金件的相对密度下降。试件维氏硬度随激光功率和扫描速度的增大均呈现先增大后减小的变化规律。此外,激光功率从50 W变为100 W时,网状晶粒平均尺寸由0.8  $\mu\text{m}$ 增大到2  $\mu\text{m}$ 左右,然而过大的激光功率将导致晶粒尺寸过大使硬度降低。SLM成形钴铬合金件维氏硬度平均硬度为392 HV,在合理范围内略高于标准值。

**关键词** 激光技术;选择性激光熔融;钴铬合金;表面粗糙度;相对密度;维氏硬度

中图分类号 TN249; TF124

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0503001

## Study on Selective Laser Melting Forming Process of Cobalt Chromium Alloy

Liu Wei Liu Tingting Liao Wenhe Jiang Liyi

*Advanced Equipment Digital Design and Manufacturing Research Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*

**Abstract** Experiments are conducted to form dental cobalt chromium alloy part with selective laser melting method. By analyzing microstructure of the specimens, effects that processing parameters of laser power, scan speed, scan space and laser energy density exert on the surface roughness, relative density and hardness of cobalt chromium are studied. Research results show that different laser power, scan speed and spacing lead to different surface roughness although the laser energy density remains the same. Relative density of SLM cobalt-chromium alloy increases as the laser power increases and the rate of change slows down. When scanning speed varies from 80 mm/s to 100 mm/s, maximum value of SLM CoCr part reaches 94.95%. With the increase of laser scanning space, the relative density reduces. Besides, with laser power varying from 50 W to 100 W, net-shaped grain size increases from 0.8  $\mu\text{m}$  to 2  $\mu\text{m}$ , while higher laser power will cause much bigger grain size and decrease the Vickers hardness. The average hardness of SLM CoCr part is 392 HV, slightly higher than the standard value within a reasonable range.

**Key words** laser technique; selective laser melting; cobalt-chromium alloy; surface roughness; relative density; Vickers hardness

**OCIS codes** 350.3390; 350.3850; 350.2660

收稿日期: 2014-09-22; 收到修改稿日期: 2014-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(51375242)、一院高校联合创新重点基金项目(CALT201309)、浙江省重中之重学科开放基金

作者简介: 刘 威(1990—),女,硕士研究生,主要从事选择型激光烧结、熔融技术等方面的研究。

E-mail: liuweibittersweet@126.com

导师简介: 刘婷婷(1975—),女,博士,副教授,主要从事金属及陶瓷材料选区激光烧结、熔融、高端装备数字化设计制造等方面的研究。E-mail: liutingting@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

## 1 引言

选择性激光熔融技术(SLM)是增材制造技术的最新发展,基于逐层熔覆的最基本思想,根据三维计算机辅助设计(CAD)模型直接成形具有特定几何形状的零件而不受其复杂程度的限制。钴铬(Co-Cr)合金因具有较强的金属稳定性、耐磨性,较高的耐腐蚀性,是目前最常用的牙科修复体材料。钴铬合金牙冠表面形态主要由窝、尖、脊等复杂特征组成,宜采用SLM方法加工。比利时鲁汶大学的Vandenbroucke等<sup>[1]</sup>对Ti-6Al-4V、Co-Cr-Mo两种生物合金材料进行了SLM实验,研究认为SLM成形中激光功率、粉层厚度、扫描速度和扫描间距通过影响激光照射在粉体表面的能量密度对试件致密度产生影响,粉末材料、颗粒形状、粉层厚度、激光功率、扫描策略和试件的表面后处理是影响试件表面粗糙度的重要因素。东京医科牙科大学的Takaichi等<sup>[2]</sup>对SLM成形Co-29Cr-6Mo合金成形件微观组织结构及其力学性能进行分析,当激光能量密度高于 $400\text{ J/mm}^3$ 时,可得到致密的钴铬合金件;当激光能量密度低于 $150\text{ J/mm}^3$ 时,成形件具有孔洞。

表面粗糙度和微观结构直接影响钴铬合金修复体的质量及性能,表面粗糙度影响修复体的表面形貌及美观性,微观结构通过影响修复体的相对密度影响其疲劳特性、强度及硬度。在SLM成形工艺中,激光能量是粉末吸收热量的来源,直接决定着粉末材料的熔融程度及其微观构成,不同成形参数下激光能量密度的变化对钴铬合金SLM成形质量至关重要。因此,本文在上述研究基础上,进一步探索钴铬(Co-Cr)合金的SLM成形工艺,研究激光功率、扫描速度、扫描间距及其综合作用下的激光能量密度对成形件的表面质量、微观组织及硬度的影响规律<sup>[3]</sup>。

## 2 实验材料和方法

采用正交实验设计方法,以激光功率、扫描速度、扫描间距为三个变因量,设计正交试验。选用德国登特伦牙科钴铬合金材料 remanium star CL (Co60.5%, Cr28%, W9%, Si1.5%);在CONCEPTLaser金属成形机 Mlab Cusing R上加工16个直径10 mm、高10 mm的圆柱体(图1)。

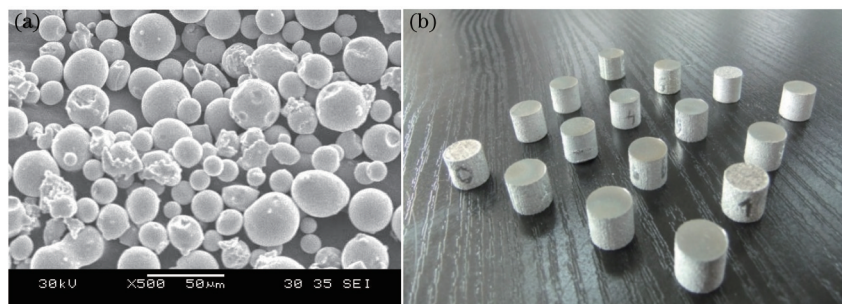


图1 (a) 在扫描电子显微镜钴铬合金粉末(SEM)的结构; (b) SLM成形和钴铬合金试件

Fig.1 (a) Co-Cr powders under scanning electron microscope (SEM) and (b) SLM forming Co-Cr parts

加工完成后,在DektakX台阶仪上测量粗糙度;采用HTP-312电子天平测量试件质量并计算致密度;通过不同粒度的砂纸研磨、抛光、腐蚀处理后,在扫描电子显微镜JEOLJSM-6380LV下观察试样截面的微观组织。

## 3 实验数据分析

### 3.1 表面粗糙度

表面粗糙度是成形质量的一个重要指标。不同的熔融工艺参数下粉末吸收的激光能量密度不同,使得成形过程中温度场分布、熔池形态发生改变,进而影响试件表面粗糙度。

测量16个试件表面粗糙度,并计算激光能量密度 $q$ :

$$q = \frac{P}{H \cdot v}, \quad (1)$$

式中 $q$ 为激光能量密度( $\text{J/mm}^2$ ), $P$ 为激光功率(W), $H$ 为扫描间距( $\mu\text{m}$ ), $v$ 为扫描速度( $\text{mm/s}$ )。由测得的表面粗糙度结合(1)式,得到试件表面粗糙度随激光能量密度的变化关系,如图2所示。

由图2可知,随着激光能量密度的增加,表面粗糙度变化趋势不明显,表明激光能量密度的变化对表面粗糙度的影响较小。其中第5组和第6组、第13组和第14组、第2组和第15组的激光能量密度相同,但所得

表面粗糙度不同,表明即使在相同激光能量密度下,不同的激光功率、扫描速度、扫描间距也会导致不同的表面粗糙度。这里分析认为不同的工艺参数下粉末周围温度及应力分布不同,当扫描速度较高时,粉末受热时间短,吸收热量少,不能完全熔融,粉末颗粒间形成不完全粘结[图 3(a)];而在较小的扫描速度下,激光在粉末上停留时间长,熔池及周围基板温度较高,熔池吸收大量热量导致其尺寸变大并向外扩散,粘结熔池周围的粉末,从而形成不同的粗糙度。

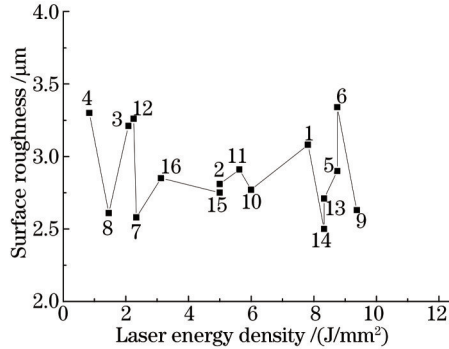


图2 试件表面粗糙度随激光能量密度变化曲线

Fig.2 Curve of surface roughness at different values of laser energy density

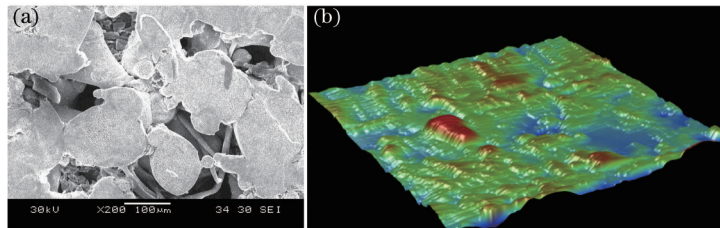


图3 (a) 粉末不完全粘结; (b) 激光功率 70 W, 扫描速度 200 mm/s, 扫描间距 150 μm 下的 Co-Cr 试件表面形貌

Fig.3 (a) Partially sintered powders; (b) surface morphology of Co-Cr part with laser power of 70 W, scanning speed of 200 mm/s and scan space of 150 μm

图 3(b)所示为第 7 组钴铬合金试件表面形貌,对应激光功率 70 W,扫描速度 200 mm/s,扫描间距 150 μm,激光能量密度为 2.33 J/mm²。红色部分表示轮廓峰值较高,蓝色部分表示粉末没有完全熔融而向下凹陷。SLM 过程中,由于铺粉、温度控制、扫描参数等因素,导致成形面凹凸不平,局部区域由于热应力分布不均出现凹陷或堆积,但可以看出表面形貌相对均匀,凸起部分和扫描轨迹基本保持一致。

### 3.2 相对密度

成形件相对密度的高低不仅是衡量材料是否完全熔融、判断粉末堆积效果的重要指标,还直接影响成形件力学性能。在成形工艺较优时,可得到致密性较高、孔洞较少的钴铬合金件,微观结构细密,粉末层之间的结合强度较高。

采用电子天平 HTP-312 测量各个试件的质量,通过排水法测体积,计算 16 个试件的相对密度并记录如表 1,  $k_{1j} \sim k_{4j}$  表示第  $j$  列所对应的因素在  $i$  水平下指标值总和的平均值,  $R$  表示极差值。

表 1  $L_{16}(4^3)$  正交试验表 (HTP-312)

Table 1  $L_{16}(4^3)$  Orthogonal experimental table (HTP-312)

No.	SLM parameters			Laser energy $l/(J/mm^2)$	Relative density /%
	$P/W$	$v/(mm/s)$	$H/\mu m$		
1	50	80	80	7.81	89.09
2	50	100	100	5	90.64
3	50	200	120	2.08	86.67
4	50	400	150	1.46	72.31
5	70	80	100	8.75	83.93
6	70	100	80	8.75	90.52
7	70	200	150	2.33	90.90
8	70	400	120	1.46	84.51

No.	SLM parameters			Laser energy $/(J/mm^2)$	Relative density /%
	$P /W$	$v /(mm/s)$	$H /\mu m$		
9	90	80	120	9.38	92.19
10	90	100	150	6	93.09
11	90	200	80	5.62	93.05
12	90	400	100	2.25	92.24
13	100	80	150	8.33	94.95
14	100	100	120	8.33	94.75
15	100	200	100	5	93.83
16	100	400	80	3.12	92.53
$k_{1j}$	84.88	90.04	91.30		
$k_{2j}$	87.47	92.25	90.16		
$k_{3j}$	92.64	91.11	89.53		
$k_{4j}$	94.02	85.40	87.81		
$R$	9.14	6.85	3.49		

### 3.2.1 激光功率对试件相对密度的影响规律

随着激光功率的增加,试件相对密度逐渐增大(图4),分析认为,激光功率越高,钴铬合金粉末吸收的能量越多,粉末熔融越充分,可形成更为致密的内部结构。同时,随着激光功率的逐渐增加,相对密度的上升趋势愈缓慢,4组相对密度随激光功率的增大率从3.05%增大到5.91%,当激光功率继续增大到100 W时相对密度下降1.49%。原因在于过高的激光功率会导致粉末材料吸收热量过多而发生飞溅或气化,影响成形质量,导致无法形成较高的致密性。在相同扫描速度和层厚的情况下,激光功率的增加有助于熔融成形质量的提升,当激光功率从小增加到最优值的过程中粉末层从不充分融化到完全熔融形成致密层。

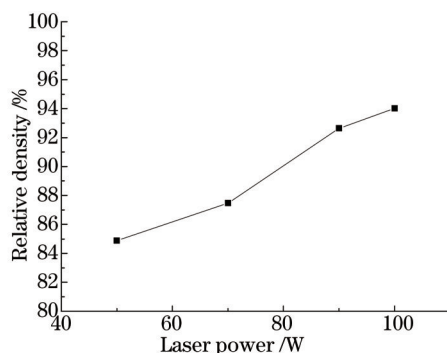


图4 激光功率-钴铬合金试件相对密度曲线

Fig.4 Curve of CoCr part relative density at different values of laser power

### 3.2.2 扫描速度对试件相对密度的影响规律

图5呈现了激光扫描速度对试件相对密度的影响规律,可看出当扫描速度增大时,SLM成形钴铬合金件的相对密度先增大,当达到最大值后开始随着扫描速度的增大而降低。扫描速度在80~100 mm/s时,钴铬合金SLM成形相对密度最大,这与文献[4]的分析结果一致。文献[4]研究认为,激光功率不变时,扫描速度决定

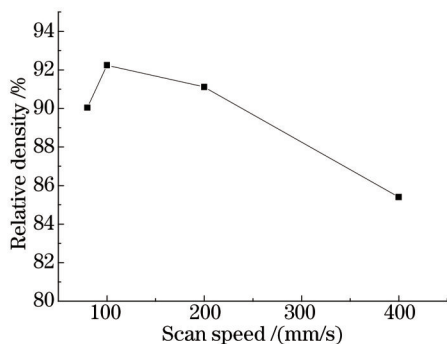


图5 不同扫描速度-钴铬合金件相对密度曲线

Fig.5 Curve of CoCr part relative density at different values of scan speed

了作用在粉末上的激光辐照时间,当扫描速度较低时,激光加热粉末的时间长,传递热量多,然而过低的扫描速度会导致粉末表面和附近出现高温,融化的粉体增多,凝固时收缩较大而容易开裂,不能形成良好的熔融层,影响成形速度和精度;当扫描速度过高时,粉末受热时间短,吸收热量少,不能完全熔融,同样不利于形成良好的熔融层,直接导致相对密度降低。

### 3.2.3 扫描间距对试件相对密度的影响规律

扫描间距是两条扫描线间的距离,当扫描间距大于激光光斑的半径而小于光斑的直径时,两条扫描线会产生重叠,重叠区域吸收的热量增多,充分熔融粉末增大相对密度。由图6可看出,随着激光扫描间距的增大,钴铬合金件的相对密度呈下降趋势。文献[1,5]分析认为,当扫描间距过大并大于光斑直径时,粉末上激光扫描区域没有重叠,同一区域经历的扫描时间较短,粉末吸收的能量密度降低,粉末无法完全融化,成形件内部出现未完全粘结粉末导致的孔洞,导致试件致密度下降。本实验粉末中采用的扫描间距从80 μm到150 μm,当扫描间距为80 μm时,相对密度平均值为91.3%,随着扫描间距增大至150 μm,其均值逐渐减小。扫描间距增大到150 μm时,两道熔池之间的重叠率变小,粉末吸收热量减少导致熔化不完全,使其致密性降低。

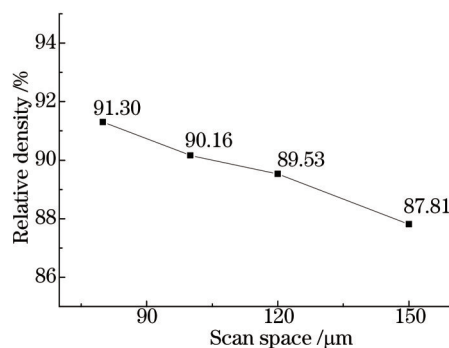


图6 不同扫描间距下钴铬合金件相对密度曲线

Fig.6 Curve of Co-Cr part relative density at different values of scan space

综上所述,激光功率、扫描速度及扫描间距都是影响SLM成形过程的重要因素,而这三者综合作用下的激光能量则是影响钴铬合金SLM成形的直接因素<sup>[6]</sup>。图7为试件上表面横截面中部位位的微观形貌,可看出明显的激光扫描轨迹,相邻熔池间快速凝固的边界反映了扫描方式,且从图中可看出,当激光功率较低[图7(a)]时,成形件表面孔洞较大且孔洞分布密集,表面存在缺陷;孔洞形成的原因在于局部扫描未重叠区域由于激光能量密度过低导致粉末不完全熔融,颗粒间粘结不充分[图7(c)]。随着激光功率从70 W增加到90 W,成形件表面纹理致密均匀,孔洞减少,致密度增大[图7(b)]。

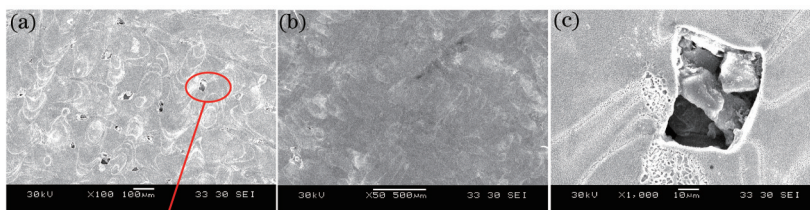


图7 激光功率分别为(a) 70 W和(b) 90 W时钴铬合金件上表面中部横截面微观形貌; (c) 图(a)圆圈部分放大图

Fig.7 Cross-section morphology of Co-Cr part at different laser energy densities (a) 70 W and (b) 90 W, (c) the enlarged view of circled part of Fig.7 (a)

### 3.3 硬 度

采用显微维氏硬度仪HV-50对钴铬合金试件进行硬度的测量,试验力为1 kg,每个试件测试6个值,求平均值记为每个试件的最终维氏硬度,如表2所示。

当激光功率90 W、扫描速度80 mm/s、扫描间距120 μm时,此时成形件维氏硬度值达到最大。相比于钴铬合金牙标准的335维氏硬度<sup>[7]</sup>,采用SLM成形的钴铬合金件维氏硬度均高于标准值,且相对密度最大值达到了94.95%。人体天然牙最外层为牙釉质,内衬牙本质是人体最坚硬、钙化程度最高的组织,文献[8]表明,天然牙最外层牙釉质的维氏硬度最大为367.8 HV,牙齿具有较高的硬度,在咀嚼过程中釉质对磨损有着较

表2  $L_{16}(4^3)$ 正交试验表 (HV-50)  
Table 2  $L_{16}(4^3)$  Orthogonal experimental table (HV-50)

No.	Experimental parameters			Vickers hardness
	$P/W$	$v/(mm/s)$	$H/\mu m$	
1	50	80	80	376
2	50	100	100	388
3	50	200	120	382
4	50	400	150	338
5	70	80	100	424
6	70	100	80	392
7	70	200	150	386
8	70	400	120	393
9	90	80	120	425
10	90	100	150	409
11	90	200	80	387
12	90	400	100	405
13	100	80	150	399
14	100	100	120	400
15	100	200	100	390
16	100	400	80	378
$k_{1j}$	371	406	383.25	
$k_{2j}$	398.75	397.25	401.75	
$k_{3j}$	406.5	386.25	400	
$k_{4j}$	391.75	378.5	383	
$R$	35.5	27.5	18.75	

好的抵抗力。然而,钴铬合金作为牙齿修复体材料,硬度在达到标准值的同时不能过大,否则会对天然牙造成较大的磨损。本实验中采用SLM成形的钴铬合金件硬度平均值为392 HV,除第4组较低外,其余维氏硬度均在合理范围内较天然牙硬度高。

### 3.3.1 激光功率对试件维氏硬度的影响规律

图8中,随着激光功率增加,钴铬合金件维氏硬度呈现先增大后减小的趋势。由正交实验极差分析得,在SLM成形过程中,激光功率的极差值 $R$ 最大,表明激光功率对钴铬合金维氏硬度的影响作用最显著,SLM成形钴铬合金最佳激光功率在80~100 W之间,而过高或者过低的激光功率都会导致成形件硬度下降。

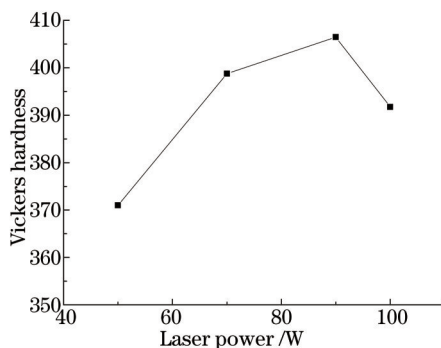


图8 激光功率对钴铬合金件维氏硬度的影响规律

Fig.8 Influence of laser power on the Vickers hardness of Co-Cr SLM formed part

取激光功率50、70、90、100 W时钴铬合金件观察横截面晶粒形态,经磨金相、抛光、腐蚀后,观察垂直于建造方向的晶粒分布情况,如图9所示。

比对图9(a)~(d)发现,横截面晶粒呈网格状且排列紧密,尺寸基本一致,具有圆弧状边界,随着激光功率

的增加,晶粒逐渐生长,尺寸变大,当激光功率 50 W 时,晶粒平均尺寸约为 0.8  $\mu\text{m}$ ,当功率增加到 100 W 时,晶粒平均尺寸约为 2  $\mu\text{m}$ ,由图可以看出排列更为致密。因为在 SLM 成形过程中,激光功率增大,熔融温度升高,钴铬合金粉末吸收的热量增加,晶粒生长速度也越快。晶粒长大是通过大角度晶界迁移来进行的,在晶界表面能的驱动下,新晶粒互相吞食,从而得到一个在该条件下较为稳定的尺寸<sup>[9-10]</sup>,如图 9(d)中的晶粒分布。当激光功率为 50 W 时,由于热量输入过低使得输入到粉末层的激光能量过小而导致粉末层不能完全熔融,无法获得均匀致密的晶粒,粉末层内部结合强度较差,导致硬度值较低;当激光功率增加到 70 W 和 90 W 左右时,适当的热输入量会使粉末充分熔化,晶粒沿着温度冷却速度较快的方向生长并形成细密的枝晶,从而使硬度值提高;当激光功率增加到 90 W 以上时,过大的热输入量导致钴铬合金熔池稀释、尺寸增大并形成粗大晶粒,这些因素都会致使硬度值降低。

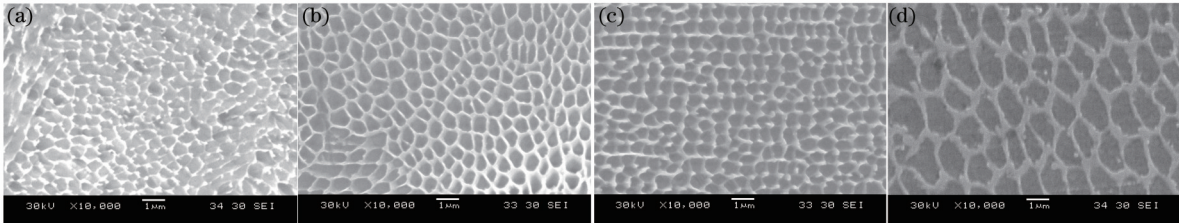


图 9 激光功率为分别(a) 50 W; (b) 70 W; (c) 90 W; (d) 100 W 时钴铬合金件横截面晶粒分布情况

Fig.9 SEM images of CoCr part cross-section at laser power of (a) 50 W; (b) 70 W; (c) 90 W; (d) 100 W

### 3.3.2 扫描速度对试件维氏硬度的影响规律

钴铬合金件的维氏硬度随着激光扫描速度的增大而减小,在 80 mm/s 左右时达最大值(图 10)。扫描速度的变化影响熔融潜热和流体流动,导致激光在其运动方向上的温度梯度发生改变,影响热应力的分布,同时扫描速度较低时,熔池温度冷却速率较低,粉末上温度梯度越小,有利于形成均匀致密的微观组织,晶粒逐渐细化,在形成均匀平整熔融层的同时使其显微硬度提高。然而,随着扫描速度的进一步增大,能量输入强度减小,层间熔融不充分,形成不均匀的粗大晶粒,导致钴铬合金维氏硬度降低。

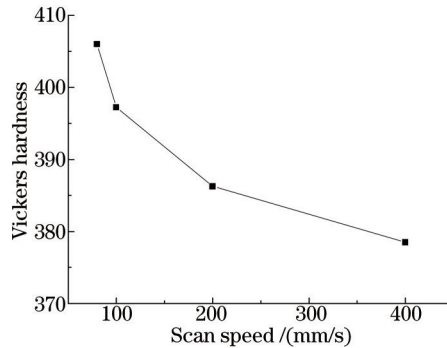


图 10 激光扫描速度对钴铬合金件维氏硬度的影响规律

Fig.10 Influence of laser scan speed on Vickers hardness of Co-Cr SLM formed part

### 3.3.3 扫描间距对试件维氏硬度的影响规律

扫描间距的大小决定着两道扫描线间的重叠率,相邻激光束的能量叠加,使得在进行后一条扫描线的熔融时,前一条扫描线将有一部分发生重熔。扫描间距通过与激光功率、扫描速度共同作用决定辐照在粉末表面的热量的多少,进而影响熔池大小及微观结构。但与激光功率和扫描速度对制件组织结构的影响相比,扫描间距对其影响程度要小得多。

## 4 结 论

本文采用正交试验方法,在 CONCEPTlaser 设备上加工钴铬合金试件,研究成形参数与表面质量和试件性能的关系,得到如下结论:

1) 试件相对密度随激光功率增加而增大且增大率变小,4 组相对密度的增大率从 3.05% 到 5.91%,当激光功率继续增大到 100 W 时相对密度的增大率为 1.49%。维氏硬度随激光功率的增大先增大后减小。

2) 相同激光能量密度下,不同的激光功率、扫描速度、扫描间距也会导致不同的表面粗糙度。

3) 当扫描速度增大时,SLM成形钴铬合金件的相对密度先增大,达到最大值后随扫描速度的增大而降低。扫描速度在80~100 mm/s时,钴铬合金SLM成形相对密度最大,达到94.95%。而钴铬合金件的维氏硬度随着激光扫描速度的增大而减小。随着激光扫描间距的增大,钴铬合金件的相对密度下降。

4) SLM成形的钴铬合金件微观组织呈网状结构且排列紧密,功率为50 W时晶粒平均尺寸为0.8  $\mu\text{m}$ 。随激光功率增加至100 W,网状晶粒尺寸逐渐增大至2  $\mu\text{m}$ 且排列更为致密。激光功率过大将导致网格状晶粒尺寸过大使硬度降低。

5) 采用SLM成形的钴铬合金件平均维氏硬度392 HV,达到天然牙的硬度要求并在合理范围内略高于标准值。

采用SLM制造钴铬合金修复体能形成较好的微观组织,然而当成形参数不当,在微观结构上易出现缺陷,如表面粗糙度大导致表面质量差、粉末未完全粘结产生孔洞缺陷、硬度等力学性能达不到牙齿修复体口腔应用标准等问题。因此,需要针对牙齿修复体的应用要求,寻求内部微观结构及缺陷的检测方法并在成形工艺上进行优化,在其他领域进行推广和应用。

### 参 考 文 献

- 1 Ben Vandenbroucke, Jean-Pierre Kruth. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts [J]. Rapid Prototyping Journal, 2007, 13(4): 196-203.
- 2 Atsushi Takaichi, Suyalatu, Takayuki Nakamoto, *et al.*. Microstructures and mechanical properties of Co-29Cr-6Mo alloy fabricated by selective laser melting process for dental applications[J]. J Mech Beha Biomed Mater, 2013, 21: 67-76.
- 3 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. 金属零件选区激光融化直接成型技术研究进展[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0601007.
- 4 Jie Liu, Biao Zhang, Chunze Yan, *et al.*. The effect of processing parameters on characteristics of selective laser sintering dental glass-ceramic powder[J]. Rapid Prototyping Journal, 2010, 16(2): 138-145.
- 5 Lore Thijs, Frederik Verhaeghe, Tom Craeghs, *et al.*. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. Acta Materialia, 2010, 58(9): 3303-3312.
- 6 Yang Yongqiang, Luo Ziyi, Su Xubin, *et al.*. Study on process and effective factors of stainless steel thin-wall parts manufactured by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0103001.  
杨永强,罗子艺,苏旭彬,等. 不锈钢薄壁零件选区激光融化制造及其影响因素研究[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0103001.
- 7 百度百科. 钴铬合金烤瓷牙[OL]. <http://baike.baidu.com/link?url=FdAKS5ldarVXh7srYPuuZmgQKbGuWSiZi-2MgEnVFISUi6wDdptlvSdWD2hKXUcMJNozx8dCvxTDkmlfTyXTa>. [2015-01-23].
- 8 Zhang Jie, Li Hong, Zhou Zhongrong, *et al.*. Study on micro-hardness and wear resistance of human tooth at different depth[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2002, 19(4): 621-623.  
张 杰,黎 红,周仲荣,等. 人体天然牙不同深度层次的显微硬度与耐磨性的研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2002, 19(4): 621-623.
- 9 Hu Gengxiang, Cai Xun, Jie Yonghua. Fundamentals of Materials Science[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2006.  
胡赓祥,蔡 珣,戒咏华. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006.
- 10 Meng Guangbin, Gu Dongdong, Li Chuang, *et al.*. Forming process and properties of TiC/Ti bulk-form nanocomposites prepared by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603024.  
孟广斌,顾冬冬,李 闯,等. 选区激光融化制备块体TiC/Ti纳米复合材料的成形工艺及性能[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603024.

栏目编辑: 何卓铭