

激光与光电子学进展

相同激光能量密度下扫描速度对选区激光熔化 钴铬合金熔池尺寸与致密度的影响

黎振华^{1*}, 邓煜华¹, 姚碧波², 滕宝仁¹, 李颢¹

¹昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093;

²昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650500

摘要 为明确激光能量密度作为选区激光熔化工艺优化依据的可靠性,以钴铬合金为对象,通过数值模拟与试验验证,考察了相同能量密度下不同扫描速度时成形试样的温度场、熔池尺寸和致密度。结果表明,激光能量密度不是影响选区激光成形过程中熔池尺寸和致密度的可靠参数,在相同激光能量密度下,激光扫描速度不同,会影响粉床上粉末的熔化和凝固过程及形成的熔池尺寸。激光能量密度相同时,随着激光扫描速度增大,熔池尺寸增加,试样致密度也相应提高。

关键词 激光光学; 选区激光熔化; 钴铬合金; 扫描速度; 熔池尺寸; 致密度

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0736001

Effect of Laser Scan Speed on Pool Size and Densification of Selective Laser Melted CoCr Alloy Under Constant Laser Energy Density

Li Zhenhua^{1*}, Deng Yuhua¹, Yao Bibo², Teng Baoren¹, Li Hao¹

¹*School of Materials Science & Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming, Yunnan 650093, China;*

²*School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming, Yunnan 650500, China*

Abstract To clarify the reliability of laser energy density as the basis for optimizing selected laser melting process, temperature field, melt pool size, and densification of selected laser melted specimens at different scan speeds with constant energy density were investigated through numerical simulation and experiments using cobalt-chromium alloy powder. The results show that the laser energy density is not a reliable parameter that affects the melt pool size and relative density of selected laser melted parts. In addition, the scanning speed of laser plays a crucial role in modulating the melting and solidification processes of the powder and melt pool size. When the laser energy density is the same, as the laser scanning speed increases, the melt pool size increases, and the density of the sample increases accordingly.

Key words laser optics; selective laser melting; CoCr alloy; scan speed; melt pool size; density

选区激光熔化是以聚焦激光束为热源,根据零件三维模型离散数据,逐点熔化粉床上金属粉

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-01-24; 录用日期: 2022-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(51961017)、云南省基础研究重点项目(202101AS070017)、云南省重点研发计划(2018BA064)

通信作者: *lzhkust@sina.com

末,逐层凝固累积实现零件成形的增材制造方法^[1-3]。优化工艺参数、获得致密无缺陷的成形件,是一直以来选区激光熔化研究的重点。为获得致密无缺陷的成形件,需要足够的激光能量熔化粉末上金属粉末,获得足够尺寸的熔池。为此,人们通常用单位长度、单位面积或单位体积内输入的激光功率,亦即激光能量密度 E_L ^[4](激光功率 P 与扫描速度 v 的比值 P/v)、面能量密度 E_A ^[5][激光功率 P 与扫描速度 v 、扫描间距 h 的比值 $P/(vh)$]、体能量密度 E_V ^[6-7][激光功率 P 与扫描速度 V 、扫描间距 h 和粉层厚度 t 的比值 $P/(vht)$],作为衡量和优化选区激光熔化成形过程中的工艺参数的依据,并开展了大量的研究^[8-10],证实足够且合适的激光能量密度是获得致密度高、缺陷少成形件的基础。但近年来,越来越多的研究者注意到,相同的激光能量密度下,不同扫描速度时,获得的熔池尺寸和试样致密度并不相同。

Bosio等^[11]使用光斑直径 $100\ \mu\text{m}$ 、波长 $1070\ \text{nm}$ 的激光对 $50\ \mu\text{m}$ 层厚 $\text{AlSi10Mg}+4\text{Cu}$ 粉末进行单道扫描试验的结果表明,在激光能量密度保持 $0.16\ \text{J}/\text{mm}$ 的条件下,当扫描速度为 $600\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $800\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $1200\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,形成的熔池宽度和深度分别为 $120\ \mu\text{m}$ 、 $101\ \mu\text{m}$ 、 $117\ \mu\text{m}$ 和 $90.96\ \mu\text{m}$ 、 $50.33\ \mu\text{m}$ 、 $73.36\ \mu\text{m}$,扫描速度对熔池尺寸的影响呈现先减小后增大的趋势。Guo等^[12]使用光斑直径 $100\ \mu\text{m}$ 、波长 $1070\ \text{nm}$ 的激光对 $100\ \mu\text{m}$ 层厚

AlSi10Mg 成形的结果则表明,在激光面能量密度相同时,熔池尺寸随着扫描速度增加而增大。Attar等^[13]研究认为,在激光体能量密度保持 $120\ \text{J}\cdot\text{mm}^{-3}$ 不变时,选区激光熔化纯钛试样的致密度随着扫描速度的增加而提高。Bertoli等^[14]认为,相同的激光体能量密度下,激光扫描速度增大会导致316L不锈钢选区激光成形时熔池长度增加而宽度减小。罗心磊等^[15]的结果则表明,相同激光能量密度下,激光扫描速度增大会导致18Ni300钢熔池熔深和熔宽增加。

这些争议表明,激光快速扫描作用下粉末的熔化凝固过程复杂,激光能量密度仅具有方向性指导意义,无法可靠地反映激光功率、扫描速度等关键工艺参数对熔池尺寸和成形件致密度等的影响,对于选区激光熔化工艺优化,仍需开展系统研究。

为此,本文以CoCr合金为对象,结合单道熔池ANSYS有限元数值模拟和EOS M290选区激光熔化设备进行成形试验,在粉层厚度为 $40\ \mu\text{m}$ 、扫描间距为 $0.11\ \text{mm}$ 、激光能量密度为 $0.242\ \text{W}\cdot\text{mm}^{-1}$ 的条件下,对扫描速度为 $237.5\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $475\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $950\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1200\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的熔池尺寸和尺寸为 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 时的试样致密度进行了初步考察。表1是所用Co-Cr合金的化学成分,粉末平均粒径为 $34\ \mu\text{m}$ 。ANSYS数值模拟根据前期研究结果^[12],使用双椭球热源。

表1 Co-Cr合金的化学成分

Table1 Chemical composition of Co-Cr alloy

Element	Co	Cr	Mo	Si	Mn	Ni	Fe
Mass fraction /%	Balance	27.5	6.67	0.58	0.55	0.38	0.38

图1和图2分别是经ANSYS数值模拟计算获得的不同速度下的熔池熔宽和熔深。

由图1、2可见,在相同能量密度条件下,较大的激光功率和扫描速度可以获得更大的熔池尺寸。模拟计算结果还表明, $230\ \text{W}/950\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $290\ \text{W}/1200\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下获得的熔池宽度和深度较大,有利于获得高致密度的成形件,因此采用这两组参数制备 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 试样。

图3是 $230\ \text{W}/950\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $290\ \text{W}/1200\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下,成形试样的金相照片。定量金相分析结果表明, $290\ \text{W}/1200\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下成形试样的平均熔池宽度和深度分别为 $116.2\ \mu\text{m}$ 和 $83.9\ \mu\text{m}$,均大

于 $230\ \text{W}/950\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下成形试样的平均熔池宽度和深度分别为 $112.6\ \mu\text{m}$ 和 $80.2\ \mu\text{m}$ 。

图4是 $230\ \text{W}/950\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $290\ \text{W}/1200\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下成形试样未腐蚀金相照片。阿基米德法测得的两试样致密度结果分别为 98.2% 和 99.9% 。

以上研究表明,激光能量密度不能作为选区激光熔化工艺优化的可靠依据。在相同试验条件下,当激光能量密度相同时,提高扫描速度,熔池尺寸随之增加,试样致密度也相应提高。因此,在优化选区激光熔化工艺时,需要充分考虑扫描速度的影响。

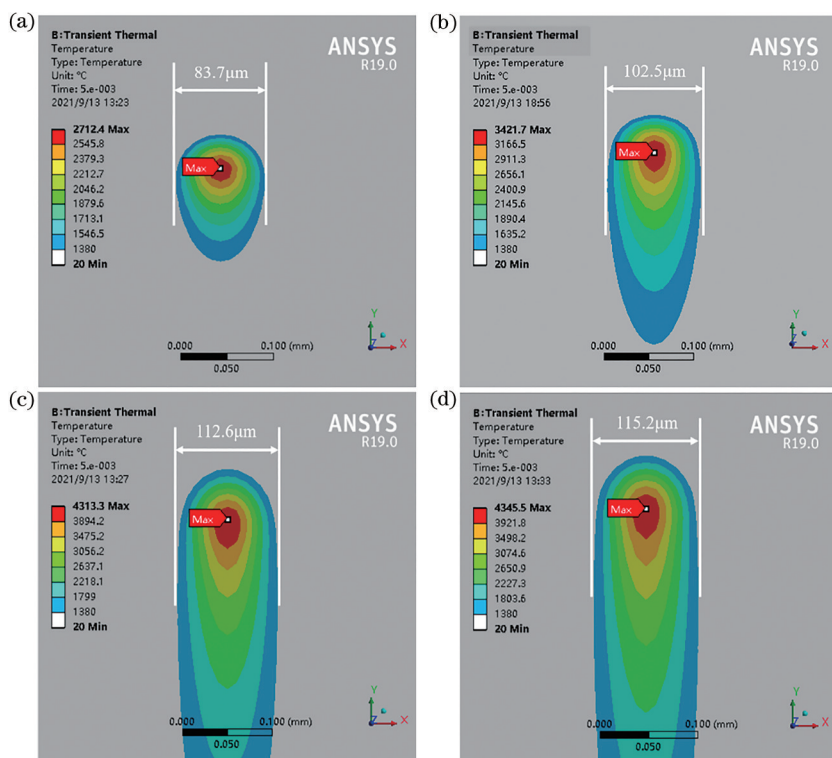


图 1 不同速度下的熔宽模拟结果。(a) $57.5 \text{ W}/237.5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $115 \text{ W}/475 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $230 \text{ W}/950 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $290 \text{ W}/1200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 1 Simulated melt pool width under different speeds. (a) $57.5 \text{ W}/237.5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $115 \text{ W}/475 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $230 \text{ W}/950 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $290 \text{ W}/1200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

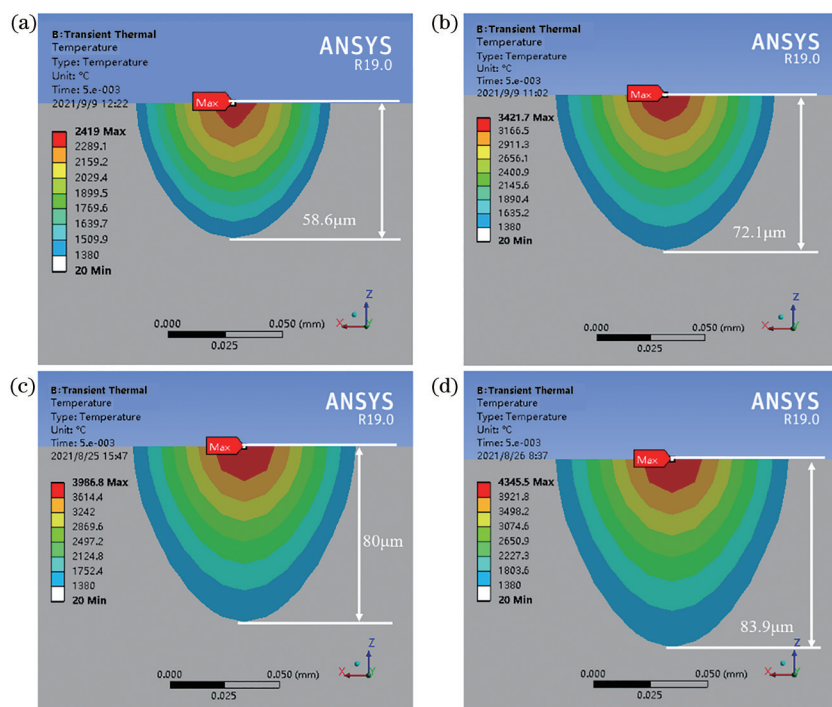


图 2 不同速度下的熔深模拟结果。(a) $57.5 \text{ W}/237.5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $115 \text{ W}/475 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $230 \text{ W}/950 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $290 \text{ W}/1200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 2 Simulated melt pool depth under different speeds. (a) $57.5 \text{ W}/237.5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $115 \text{ W}/475 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $230 \text{ W}/950 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $290 \text{ W}/1200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

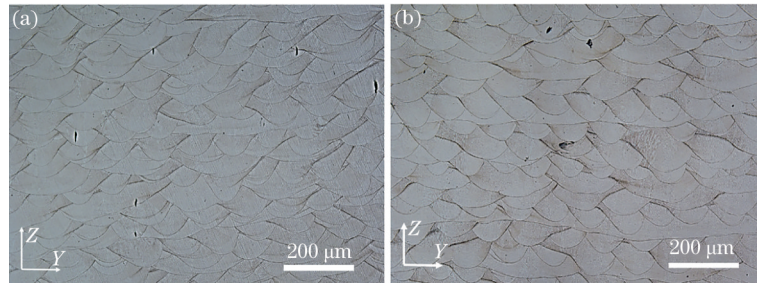


图 3 ZOY 面的金相照片。(a) 230 W/950 mm·s⁻¹; (b) 290 W/1200 mm·s⁻¹

Fig. 3 Micrographs of ZOY surface. (a) 230 W/950 mm·s⁻¹; (b) 290 W/1200 mm·s⁻¹

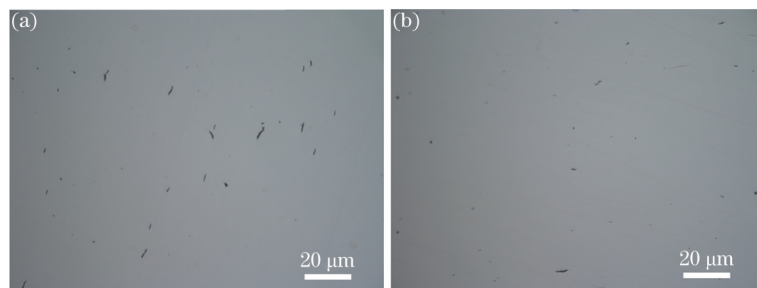


图 4 未腐蚀试样的金相照片。(a) 230 W/950 mm·s⁻¹; (b) 290 W/1200 mm·s⁻¹

Fig. 4 Micrographs of unetched samples. (a) 230 W/950 mm·s⁻¹; (b) 290 W/1200 mm·s⁻¹

参 考 文 献

- [1] Li Z H, Shen J B, Li H Y, et al. Effect of nano-TiC modification on selective laser melting of copper[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0315001.
黎振华, 申继标, 李淮阳, 等. 纳米 TiC 改性对选区激光熔化铜成形的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0315001.
- [2] Tian J, Wei Q S, Zhu W Z, et al. Selective laser melting process and mechanical properties of Cu-Al-Ni-Ti alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302001.
田健, 魏青松, 朱文志, 等. Cu-Al-Ni-Ti 合金激光选区成形工艺及其力学性能[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302001.
- [3] Teng B R, Li Z H, Li H Y, et al. Research progress on preparation of particle reinforced metal matrix composites by selective laser melting[J]. Materials Reports, 2022, 36(2): 20040170.
滕宝仁, 黎振华, 李淮阳, 等. 选区激光熔化制备颗粒增强金属基复合材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36(2): 20040170.
- [4] Gu D D, Hagedorn Y C, Meiners W, et al. Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium[J]. Acta Materialia, 2012, 60(9): 3849-3860.
- [5] Das M, Balla V K, Basu D, et al. Laser processing of SiC-particle-reinforced coating on titanium[J]. Scripta Materialia, 2010, 63(4): 438-441.
- [6] Thijs L, Verhaeghe F, Craeghs T, et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. Acta Materialia, 2010, 58(9): 3303-3312.
- [7] Simchi A, Pohl H. Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 359(1/2): 119-128.
- [8] Read N, Wang W, Essa K, et al. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: process optimisation and mechanical properties development[J]. Materials & Design (1980-2015), 2015, 65: 417-424.
- [9] Giovagnoli M, Silvi G, Merlin M, et al. Optimisation of process parameters for an additively manufactured AlSi10Mg alloy: limitations of the energy density-based approach on porosity and mechanical properties estimation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 802: 140613.
- [10] Tonelli L, Fortunato A, Ceschini L. CoCr alloy processed by selective laser melting (SLM): effect of laser energy density on microstructure, surface morphology, and hardness[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 52: 106-119.

- [11] Bosio F, Aversa A, Lorusso M, et al. A time-saving and cost-effective method to process alloys by laser powder bed fusion[J]. *Materials & Design*, 2019, 181: 107949.
- [12] Guo Q L, Zhao C, Qu M L, et al. *In-situ* characterization and quantification of melt pool variation under constant input energy density in laser powder bed fusion additive manufacturing process[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 28: 600-609.
- [13] Attar H, Calin M, Zhang L C, et al. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 593: 170-177.
- [14] Bertoli U S, Wolfer A J, Matthews M J, et al. On the limitations of volumetric energy density as a design parameter for selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2017, 113: 331-340.
- [15] Luo X L, Liu M H, Li Z H, et al. Effect of different heat-source models on calculated temperature field of selective laser melted 18Ni300[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 1402005.
罗心磊, 刘美红, 黎振华, 等. 不同热源模型对选区激光熔化 18Ni300 温度场计算结果的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(14): 1402005.