DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.04.003

CX 合金钢选区激光熔化工艺及性能研究

吕广明,李玉发,郭少帅,王　晨,唐洪奎,赖运金,王庆相,梁书锦
(西安欧中材料科技有限公司 西安市 3D 打印用金属粉末材料工程技术研究中心,陕西 西安 710018)

摘　要:为了研究 CX 合金钢选区激光熔化(SLM)成形工艺参数及性能,通过改变激光功率及扫描速度,研究了不同工艺参数对 SLM 成形组织及力学性能的影响规律。结果表明,随着激光功率逐渐增大,沉积态试样孔隙率先减小后增大,试样相对密度先增大后减小,而试样力学性能先增大后减小。激光功率 300 W、扫描速度 950 mm/s 时,试样孔隙率为 0.012 %,相对密度为 99.84 %;抗拉强度为 1 135 MPa,屈服强度为 1 005 MPa,伸长率为 19.3 %。

关键词:CX 合金钢;选区激光熔化;显微组织;力学性能
中图分类号: TG665; TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)04-0258-05

Study on Selective Laser Melting Process and Mechanical Property of CX Alloy Steel

LYU Guangming, LI Yufa, GUO Shaoshuai, WANG Chen, TANG Hongkui, LAI Yunjin, WANG Qingxiang, LIANG Shujin
(Sino-Euro Materials Technologies of Xi'an Co., Ltd., Xi'an 3D Printing Metal Powder Materials Engineering Technology Research Center, Xi'an 710018, China)

Abstract: Effect of microstructure and mechanical properties of CX alloy steel made by Selective Laser Melting (SLM) with different laser powers and scanning speed was studied. The results showed that porosity and relative density of the CX alloy steel first decreased, and then increased with the increase of laser power. Mechanical properties of the CX alloy steel first increased, and then decreased with laser power increased; The best process window is that laser power at 300 W and scanning speed at 950 mm/s, respectively; the responding porosity, relative density, ultimate strength, yield strength and elongation was 0.012%, 99.84%, 1 135 MPa, 1 005 MPa and 19.3%, respectively .

Key words: CX alloy steel; selective laser melting (SLM); microstructure; mechanical properties

选区激光熔化(SLM)技术因制造精度高、成型件表面质量较好、材料利用率高,且可快速直接成形结构复杂,近全致密 / 密度接近金属的零件(near full density metal components),在航空航天、模具、汽车及生物医疗领域逐渐被广泛应用[1-3]。

在民用模具钢领域,SLM 成形模具钢已成为研究和应用的热点。陈洪宇等使用选区激光熔化研究了 5CrNi4Mo 模具钢的相变过程及其机制,研究表明过高的线能量密度引起球化效应,使成形件内部含有残留孔隙,成形件致密度降低;过低的线能量密度导致熔体润湿性较低,成形件致密度变差[4]。徐锦岗等研究了选区激光熔化工艺参数对 H13 钢组织缺陷的影响,结果表明在一定激光功率和扫描速度范围内,提高激光功率或减小扫描速度有利于试件的成形[5]。刘杰等探讨了选区激光熔化成形不同工艺参数对 H13 钢组织的影响,发现能量密度较低时试样致密度下降[6]。

目前,商用 SLM 成形模具钢的材料主要有 18Ni300(马氏体时效钢 MS1),远不能满足模具钢生产和发展的需求[7,8]。CX 合金钢属于马氏体不锈钢,由于其机械加工性能好、强度高、耐高温腐蚀性能佳,正逐渐被广泛使用,是 SLM 成形模具钢粉末中极具发展潜力的材料之一[9-11]。然而,国内鲜有文献对 SLM 成形 CX 合金钢的组织及性能展开详细研究。

因此,本文作者选取 CX 合金钢粉末作为选区激光熔化成形对象,研究不同工艺参数下 SLM 成形 CX 合金钢试样的孔隙率、相对密度和力学性能变化规律,为 CX 合金钢在实际生产应用中提供理论基础和应用依据。

1　试验材料与方法

试验选用西安欧中材料科技有限公司使用超高

收稿日期:2021-02-23
基金项目:陕西省重点研发计划(2020GY-305)
作者简介:吕广明(1993—),陕西宝鸡人,硕士,助工.主要从事金属材料 SLM 成形工艺研究方面的工作.
通讯作者:李玉发(1995—),陕西榆林人,硕士.主要从事金属材料 SLM 成形工艺研究方面的工作.
电话:18592090205,Email:lguangmingv@163.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

转速等离子旋转电极法(SS-PREP)生产的球形 CX 合金钢粉末,具体成分见表 1。粉末粒径为 15~53 μm。粉末球形度高(≥94%)、近无空心粉(空心粉率≤0.2%)、非金属夹杂物≤3 颗 /100 g。其中 15~53 μm 规格的粉末物理性能见表 2,CX 合金钢 PREP 球形粉末的外观形貌照片见图 1。

CX 合金钢 SLM 成形试验使用广东汉邦激光科技有限公司生产的 HBD-280 设备。研究激光功率对合金组织的影响时，扫描速度固定为 950 mm/s，激光功率分别为 250、275、300、325 和 350 W；研究扫描速度对合金组织的影响时,激光功率固定为 300 W,扫描速度分别为 750、950、1 150 和 1 350 mm/s。选区激光熔化成形 CX 合金钢的过程中，相邻切片层扫描时,激光束扫描向量旋转 67°,激光束扫描向量旋转角度原理如图 2 所示。

SLM 成形的金相试块,采用阿基米德排水法测量试样密度，使用 Olympus GX71 光学显微镜观察抛光后的试样组织形貌，金相试样规格为 10 mm×10 mm×10 mm。金相试样组织孔隙率测量使用 Image Pro Plus 软件;使用型号为 ZAVμ-A 型号的维氏硬度计,测试 SLM 成形后的 CX 合金钢硬度。使用岛津电子万能试验机，进行 CX 合金钢的力学性能测试，其中 CX 合金钢力学性能试样依据 GB/T 228.1-2015 进行机加工，试样为直径 5 mm 的圆形横截面比例试样。

2　试验结果及讨论

2.1　工艺参数对组织的影响

(1)激光功率对组织的影响　图 3 为当扫描速度为 950 mm/s 时,激光功率对 CX 合金钢组织孔隙率和相对密度的影响趋势。由图 3 可知,当扫描速度为 950 mm/s 时,随激光功率逐渐增大,试样孔隙率呈现先减小后增大的变化规律,在 300 W 时孔隙率最小(0.012 %);随激光功率逐渐增大,试样相对密度

表1 CX合金钢PREP球形粉末的化学成分 w(%)

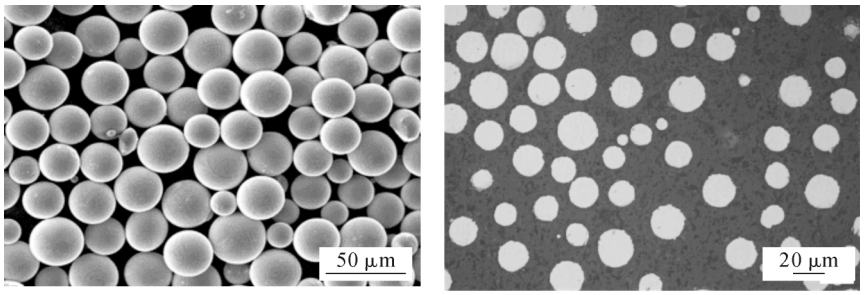
Tab.1 Chemical composition of PREP CX alloy steel spheroidal powder

Cr	Ni	Al	Mo	Mn	Si	C	O	S	P	Ni	Fe
12.13	9.49	1.82	1.40	0.01	0.01	0.041	0.017	0.003 2	0.005	0.003 2	余量

表2 CX合金PERP球形粉末的物理性能

Tab.2 Physical properties of PREP CX alloy steel spheroidal powder

类别	粉末粒径			物理性能		
检测项目	D10 /μm	D50 /μm	D90 /μm	流动性 /s·(50 g)$^{-1}$	松装密度 /10^3 kg/m^3	振实密度 /10^3 kg/m^3
实测值	27.07	44.14	63.29	14.1	4.43	4.68



(a)SEM　　(b)光镜

图 1　CX 合金钢 PREP 球形粉末形貌

Fig.1　Morphology of PREP CX alloy steel spherical powders

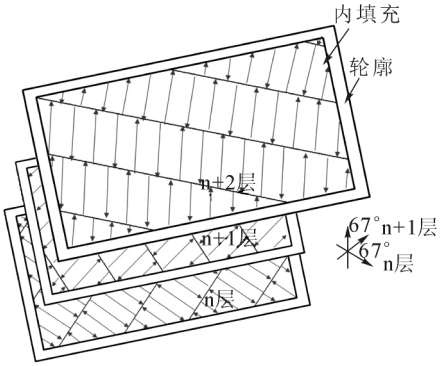


图 2　选区激光熔化激光束逐层扫描向量旋转示意图

Fig.2　Schematic diagram of vector scan layer-by-layer of laser beam for SLM

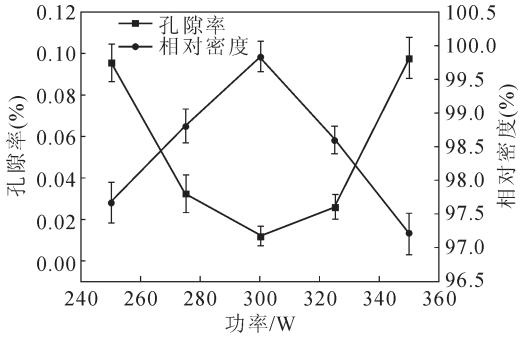


图 3　激光功率对 CX 合金钢致密度的影响

Fig.3　Effect of laser powder on density of CX alloy steel

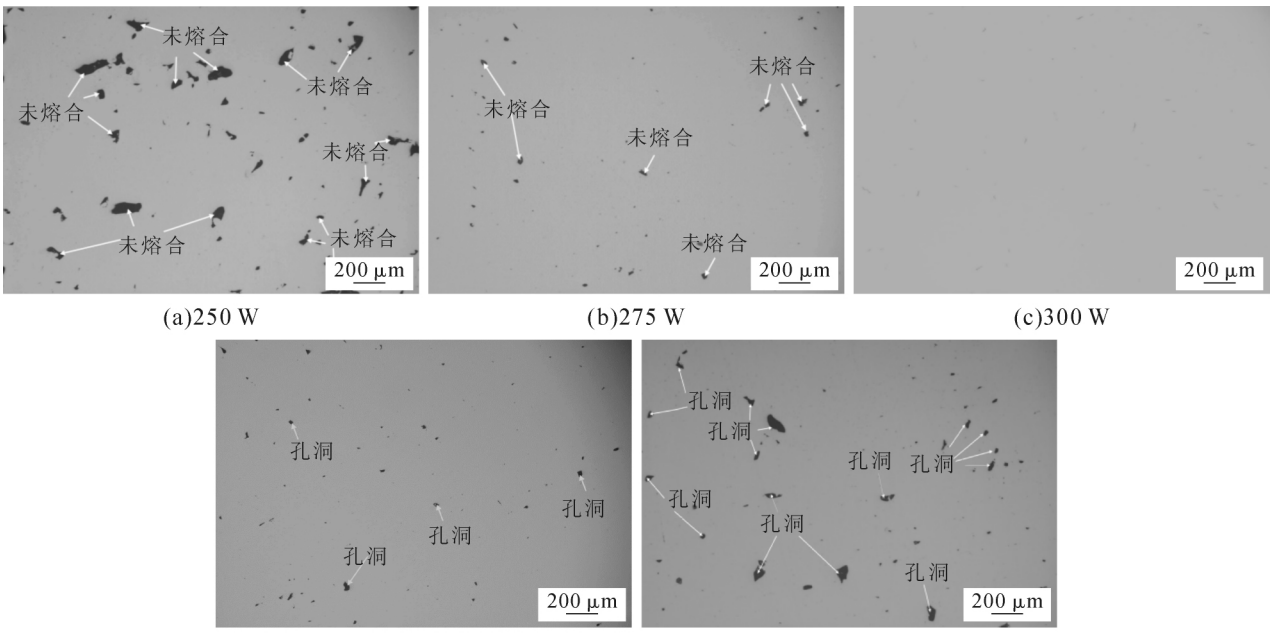
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

呈现先增大后减小的变化规律，在 300 W 时相对密度最大(99.84 %)。综上，激光功率在 300 W 时，SLM 成形试样的组织孔隙率最小，相对密度最大，为 SLM 成形的最优参数。

图 4 为扫描速度为 950 mm/s 时，不同激光功率对 CX 合金钢孔洞缺陷的影响趋势。由图 4 可知，当激光功率在 250 W 时，由于单道熔池能量输入较低，造成单道熔池搭接之间、层与层搭接之间形成不规则形状的未熔合缺陷，且未熔合数量较多、缺陷尺寸较大。随着能量增大至 275 W 时，能量输入增大，激光束作用在单道熔池上，大部分粉末被熔化，但组织中仍然存在较小尺寸的未熔合缺陷。当激光功率在 300 W 时，能量输入处于工艺窗口内，单道熔池完全熔化，熔池良好的流动性及润湿性可使气体逃逸[4,6]，熔池之间、层与层之间搭接良好，合金组织致密。当激光功率增大至 325 W 及 350 W 时，能量输入超过正常工艺窗口上阈值，组织中形成孔洞缺陷，试样相对密度降低。

(2)扫描速度对组织的影响　图 5 为激光功率为 300 W 时，不同扫描速度对 CX 合金钢孔隙率、相对密度影响变化规律。由图 5 可知，随着扫描速度逐渐增大，试样孔隙率呈先减小后增大的变化趋势，试样相对密度呈先增大后减小的变化趋势；且扫描速度在 950 mm/s 时，试样孔隙率最小(0.012%)，相对密度最大(99.84%)。

图 6 为激光功率为 300 W 时，不同扫描速度对



(a)250 W　(b)275 W　(c)300 W

(d)325 W　(e)350 W

图 4 激光功率对 CX 合金钢组织中孔洞缺陷的影响

Fig.4 Effect of laser power on porosity of CX alloy steel

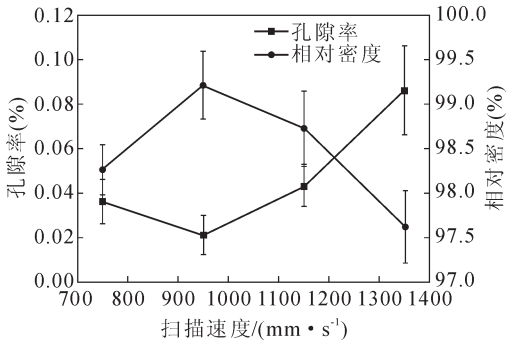


图 5 扫描速度对 CX 合金钢组织致密度的影响

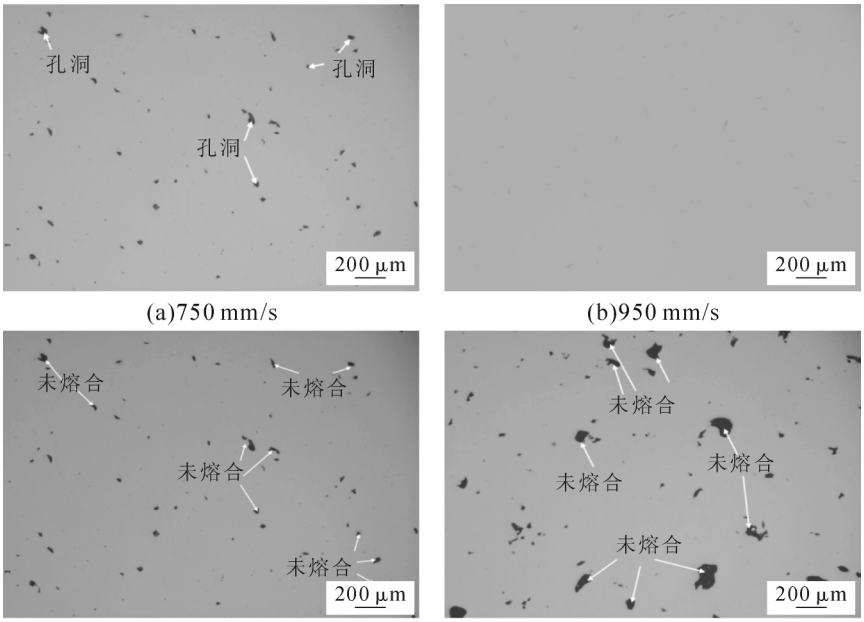
Fig.5 Effect of scanning speed on density of CX alloy steel

CX 合金钢组织致密度的影响规律。SLM 成形时，单道熔池冷速可达 10^6 K/s[9]。由图 6 可知，在较低的激光扫描速度下，激光作用粉末床时，熔池经历快速熔化–快速凝固的瞬时过程，熔池中裹挟的气体无法逸出，而形成孔洞缺陷；另一方面，较高的能量输入，熔池前端与后端易产生较大的表面张力差异 [6]，熔池中心熔体更倾向于向熔池后端流动，造成熔池后端突起，降低成形件致密度。随扫描速度逐渐增大至 950 mm/s 时，能量输入处于成形窗口内，试样中无孔洞缺陷产生，组织致密。当扫描速度为 1 150 mm/s 时，单道熔池能量输入减小，过小的能量输入无法完全熔化熔池粉末，熔池的流动性下降，造成熔池润湿性下降[4,6]，成形试样中产生数量较多、尺寸较小的未熔合缺陷。当扫描速度为 1 350 mm/s 时，单道熔池能量输入更低，试样中未熔合缺陷数量增多、尺寸增大，故试样组织孔隙率增大至 0.086%，相对密度减小至 98.01%。

2.2　工艺参数对性能的影响

图 7 所示为 CX 合金钢选区激光熔化成形后的

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

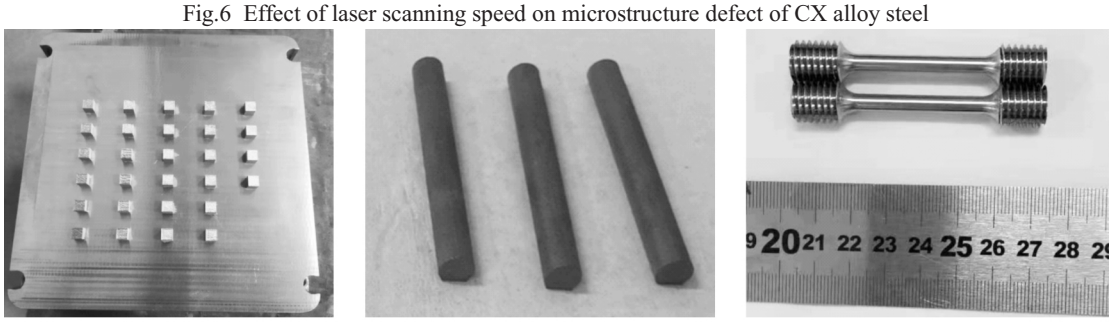


(a)750 mm/s　(b)950 mm/s

(c)1 150 mm/s　(d)1 350 mm/s

图 6 扫描速度对 CX 合金钢试样组织缺陷的影响

Fig.6 Effect of laser scanning speed on microstructure defect of CX alloy steel



(a)金相试样　(b)力学试样毛坯件　(c)力学测试试样

图 7 CX 合金钢 SLM 成形后试样

Fig.7 Specimen of SLM CX alloy steel

试样件。当扫描速度为 950 mm/s 时,不同激光功率对 SLM 成形 CX 合金钢力学性能实测值及变化规律分别如表 3 和图 8 所示。由图 8 可知,随着激光功率逐渐增大,试样抗拉强度、屈服强度及伸长率均呈先增大后减小的变化规律。当功率为 300 W 时,SLM 态 CX 合金钢抗拉强度为 1 135 MPa, 屈服强度为 1 005 MPa,伸长率为 19.3 %。

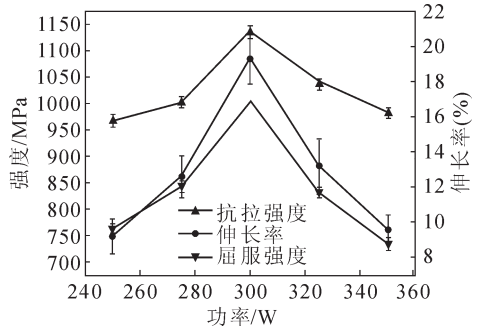


图 8 不同激光功率对 SLM 成形 CX 合金钢力学性能的影响

Fig.8 Effect of laser powers on mechanical properties of SLM CX alloy steel

当激光功率为 300 W 时,不同扫描速度对 SLM 态 CX 合金钢力学性能实测值及变化规律分别如表 4 及图 9 所示。由图 9 可知,随着扫描速度逐渐增大,

表3 不同激光功率下SLM成形CX合金钢件的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of SLM CX alloy steel at different laser powers

功率 /W	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率(%)
250	967	763	9.2
275	1 002	845	12.6
300	1 135	1 005	19.3
325	1 039	832	13.2
350	983	735	9.6

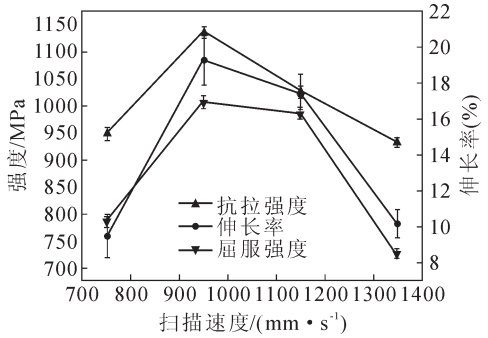


图 9 不同扫描速度对 SLM 成形 CX 合金钢力学性能的影响

Fig.9 Effect of scanning speed on mechanical properties of SLM CX alloy steel

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表4 不同扫描速度下SLM成形CX合金钢的力学性能
Tab.4 Mechanical properties of SLM CX alloy steel at different scanning speeds

扫描速度 /mm·s^{-1}	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率(%)
750	948	784	9.5
950	1 135	1 005	19.3
1 150	1 026	983	17.4
1 350	932	724	10.2

SLM 态 CX 合金的抗拉强度、屈服强度及伸长率呈先增大后减小的变化趋势。当扫描速度在 950 mm/s 时,CX 合金抗拉强度为 1 135 MPa,屈服强度为 1 005MPa,伸长率为 19.3%。

当激光功率较低时,激光束输入能量较少,且处于工艺窗口下阈值,熔池流动性下降,熔池表面润湿性较差[4],熔池之间、层与层之间搭接不良,产生未熔合缺陷。当功率较大时,能量输入超过工艺窗口上阈值,熔池因快速熔化而产生球化作用[4,5],形成孔洞缺陷。过高或过低的能量输入,均使 SLM 组织中产生较多的缺陷。当试样受正向拉应力时,首先在缺陷处形成开裂源。因而,SLM 态 CX 合金钢试样在较大或较小的能量输入特征下时,其综合力学性能不高。

SLM 成形时,熔池具有快速熔化–快速凝固特征,冷却速率达 10^6 K/s[9]。在能量输入合适时,SLM 态 CX 合金钢组织致密,因快速熔化–冷却而产生的较大晶格畸变的固溶体、细晶强化、应力硬化特征作为试样的主要强化机理[9-11]。综上,合适的激光功率保证了 SLM 成形后具有最小的孔隙率和最佳致密度,且 SLM 态 CX 合金钢具有最佳的综合力学性能。

3 结论

(1)当扫描速度为 950 mm/s 时,随激光功率逐渐增大,SLM 成形态 CX 合金钢的孔隙率先减小后增大,相对密度呈先增大后减小的变化趋势。当激光功率 300 W、扫描速度 950 mm/s 时,SLM 态组织孔隙率为 0.012 %、相对密度为 99.84 %。

(2)当能量输入处于工艺窗口期内时,SLM 成形 CX 合金钢的孔隙率最低,相对密度最大,试样力学性能最佳;当激光功率 300 W、扫描速度 950 mm/s 时,SLM 态试样抗拉强度为 1 135 MPa,屈服强度为 1 005 MPa,伸长率为 19.3 %。

参考文献:

[1] 董鹏, 陈济轮. 国外选区激光熔化成形技术在航空航天领域应用现状[J]. 航天制造技术,2014 (1):1-5.
[2] 陈帅,陶凤和,贾长治,等. H13 模具钢选区激光熔化成形工艺及其性能研究[J]. 热加工工艺,2017,46 (10):162-165.
[3] 任武,张刚刚,徐云喜. 3D 打印选区激光熔化成形 4Cr13 模具钢及性能研究[J]. 石油机械,2016,44(11):107-111.
[4] 陈洪宇,顾冬冬,顾海荣,等. 5CrNi4Mo 模具钢选区激光熔化增材制造组织演变及力学性能研究 [J]. 中国激光,2016,43(2):1-8.
[5] 徐锦岗,陈勇,陈辉,等. 工艺参数对 H13 钢激光选区熔化成形缺陷的影响[J]. 激光与光电子学进展,2018,55:1-7.
[6] 刘杰,陈向阳,范彦斌. 选区激光熔化成形 H13 钢缺陷、组织调控及拉伸性能[J]. 机械工程学报,2018,54(16):101-108.
[7] 张骁丽,齐欢,魏青松. 铝合金粉末选择性激光熔化成形工艺优化试验研究[J]. 应用激光,2013,33(4):391-397.
[8] 朱学超,魏青松,孙春华. 激光选区熔化成形 S136 模具钢的显微组织及性能[J]. 应用激光,2018,38(16):927-933.
[9] YAN X C, CHEN C Y, CHANG C, et al. Study of microstructure and mechanical performance of C-X stainless steel processed by selective laser melting(SLM)[J]. Materials Science & Engineering A. 2020, 781: 1-10.
[10] SANJARI M, HADADZADEH A, PIRGAZI H, et al. Selective laser melted stainless steel CX: Role of built orientation on microstructure and micro-mechanical properties [J]. Materials Science & Engineering A. 2020, 786: 1-6.
[11] PING D H, OHNUMA M, HIRAKAWA Y, et al. Microstructural evolution in 13Cr-8Ni-2.5Mo-2Al martensitic precipitation-hardened stainless steel[J]. Materials Science and Engineering A. 2005, 394:285-295.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章:1 铸铁件均衡凝固与有限补缩;2 铸铁件冒口补缩设计及应用;3 压边浇冒口系统;4 浇注系统大孔出流理论与设计;5 铸件均衡凝固工艺;6 铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺;7 浇注系统当冒口补缩设计方法;8 铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页,特快专递邮购价 280 元。

邮购咨询:李巧凤 029-83222071,技术咨询:13609155628

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net