

激光选区熔化技术在钴基高温合金制备中的应用进展

陈超越^{1,2}, 王晓冬^{1,2}, 王江^{1,2*}, 任忠鸣^{1,2}

1. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444

2. 上海大学省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444

摘要 钴基高温合金是一种具有较高强度以及良好的耐热腐蚀性能的材料, 在生物医疗、航空航天等领域有着广泛的应用。近年来以激光选区熔化技术(selective laser melting, SLM)为代表的增材制造技术快速发展。介绍了SLM技术在钴基高温合金制备中的应用, 综述了在SLM过程中不同工艺参数对样品致密度、粗糙度等力学性能的影响, 探讨了成形样品是否需要后处理以及后处理所带来的影响等。

关键词 钴基高温合金; 激光选区熔化; 激光增材制造

1 钴基高温合金与增材制造技术

钴基高温合金是一种奥氏体合金, 在高温下具有较高的强度和良好的耐热腐蚀性能, 同时, 与航空航天领域使用较为广泛的镍基高温合金相比, 钴基高温合金具有更高的热导率以及更低的热膨胀系数, 因此被广泛应用于航空航天以及生物医疗领域^[1-3]。

增材制造技术又称为3D打印技术, 是20世纪80年代出现的一种加工技术, 该技术的成形原理

是离散材料的逐层堆积成形, 依据产品的三维模型, 在计算机中将其切片分成若干层, 通过3D打印设备在一个平面上将金属等材料烧结或黏结在一起, 再进行逐层堆积而成^[4-6]。与传统的减材制造和等材制造相比, 增材制造技术省去了刀具和模具的使用, 具有材料总体利用率高、缩短产品研发生产周期、可制造复杂结构零件以及可根据力学性能要求自由设计等特点, 在传统制造中工件越复杂, 加工成本越高, 而增材制造技术突破了制造复杂结构零件的技术瓶颈, 因此在复杂零件的生产过

收稿日期: 2019-12-19; 修回日期: 2020-01-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1106400); 国家自然科学基金青年项目(51701112); 上海市科委项目(19DZ1100704); 上海市扬帆计划项目(19YF1415900)

作者简介: 陈超越, 讲师, 研究方向为激光增材制造技术等, 电子信箱: cchen1@shu.edu.cn; 王江(通信作者), 教授, 研究方向为激光增材制造、电磁冶金技术, 电子信箱: jiangwang@i.shu.edu.cn

引用格式: 陈超越, 王晓冬, 王江, 等. 激光选区熔化技术在钴基高温合金制备中的应用进展[J]. 科技导报, 2020, 38(2): 19-25; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.02.003

程中增材制造技术更具优势^[7-8]。随着近年来增材制造技术的不断发展进步,现代增材制造技术已经突破了传统制造单材均质的限制,可以实现多材料、多功能梯度、跨越多尺度的制造^[9]。图1为传统制造方式与增材制造技术的成本对比,可以看出,随着零件复杂程度的增加,制造成本不断提高,而在相同成本的情况下可实现复杂结构零件的个性化定制^[10]。

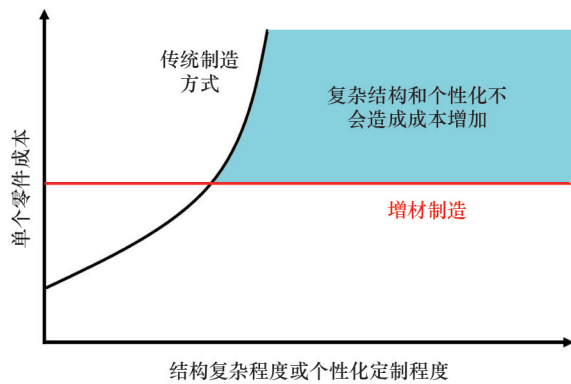


图1 传统制造与增材制造的成本对比

2 激光选区熔化制备钴基高温合金研究进展

2.1 激光选区熔化工艺参数对钴基高温合金的影响

激光选区熔化技术有130多种参数会对最终成形零件的性能、表面质量等产生影响,其中有约20种工艺参数被认为会对最终零件产生重要影响。每一个参数的改变均会改变激光选区熔化过程中的热传导、能量吸收、熔化和凝固温度,从而导致零件的性能、表面质量等发生变化,因此人们对于工艺参数及其对成形零件性能的影响做了大量工作。目前,研究较多的工艺参数主要包括激光功率、扫描速度、扫描间距以及扫描策略等^[11-12]。

杨恬恬等^[13]以K640钴基高温合金粉末为材料,使用正交试验方法,研究了激光功率、扫描速度和扫描间距等工艺参数对SLM成形件组织、性能和表面质量的影响,引入能量密度的概念确定K640粉末的最优SLM成形区域。能量密度的计算公式如下:

$$E = \frac{P}{v} \quad (1)$$

式中, E 为线能量密度(J/mm), P 为激光功率(W), v 为扫描速度(mm/s)。

试验结果表明:随着能量密度的不断升高,SLM成形件的性能先变好再变差,当能量密度较低时,部分合金粉末颗粒熔化不完全,导致了气孔等缺陷的形成;而当能量密度过大时,激光束在粉末上停留的时间过长,熔池周围的粉末被吸附到熔池内,使得下一个位置的粉末量不足,导致了球化现象的发生,在球化的粉末附近会产生气孔等缺陷,从而使得成形件的性能降低。

随着SLM等增材制造技术的不断发展,为高温合金的生产制造带来了新的手段,与传统的制造方式相比,增材制造技术可以实现复杂结构零件的小批量生产,因而开始被广泛应用于生物医学、航空航天等领域。在增材制造的过程中,金属粉末的快速熔化和快速凝固使得最终零件有着较细小的晶粒结构,从而使得最终零件拥有良好的力学性能,但并不是所有材料的组织和性能在使用增材制造技术进行加工时都表现出相同的变化趋势。Cloots等^[14]研究发现对于IN738LC镍基高温合金,其高层错能导致明显的晶格缺陷,因此其晶粒形态表现为粗大细长。而对于ECY768钴基高温合金,其层错能较低,使得在SLM过程中倾向于发生再结晶,使得晶粒明显细化,因此得出结论SLM样品的微观结构以及力学各向异性的发展还与不同材料的不同特性有关。

Lu等^[15]研究了激光选区熔化过程中工艺参数对CoCrW钴基高温合金力学性能和耐蚀性能的影响。研究表明,CoCrW合金的致密度、力学性能和耐蚀能力主要受扫描速度的影响,在合适的激光扫描速度下,最终的成形件可以获得最佳的耐蚀性,且足以满足医用义齿的使用要求。

Wang等^[16]研究了激光选区熔化的工艺参数对CoCr合金的显微结构和性能的影响,通过控制工艺参数来控制熔池,建立熔池的理论模型,确定了工艺参数与熔池形貌的关系。进一步探讨了熔池的微观形貌和宏观力学性能的关系,从而总结得出

最佳的工艺参数。实验中保持扫描间距和扫描速度不变,改变激光功率,根据不同功率下成形样品的纵向金相照片,可以计算出不同激光功率下熔池的尺寸。发现随着激光功率的增加,熔池的宽度和深度不断增加,但斜率逐渐减小;当保持激光能量和扫描间距不变时,随着扫描速度不断增加,熔化的粉末量减少,熔池的宽度和深度不断减小。

为了进一步研究激光能量、扫描速度和扫描间距对激光选区熔化样品的影响,很多学者使用了单道试验研究激光功率、扫描速度对熔道形貌的影响,使用双道或者多道试验研究激光能量、扫描速度和扫描间距对熔道搭接和缺陷的影响,从而实现优化试验的工艺参数,制造出致密度、力学性能及表面质量较好的零件。激光选区熔化是由多层、多道熔道相互叠加的方式来加工零件,研究表明,不同的激光选区熔化工艺参数对于熔道的几何形状、规律性以及熔道间的相互搭接有关,不同的工艺参数改变了局部的能量密度,对最终成形件的组织性能都会产生很大的影响,众多研究表明熔道边界的稳定性对于零件的稳定性有很大的影响,相邻熔道在搭接过程中在某些点可能会形成一些锐角,裂纹容易由此处产生,导致零件的失效^[17-18]。Chen等^[19]研究了激光功率对CoCrMo钴基高温合金熔道形貌和零件最终结构的影响,通过轨道轮廓的规律性和未熔粉末的含量确定工艺参数和产品中缺陷数量的关系,未熔粉末的存在和熔道轮廓的不稳定性、不规律性导致了最终零件性能降低。Ciurana等^[20]通过不同的工艺参数配合下的全因子试验,研究了能量密度对于CoCrMo钴基高温合金单道成形的影响,同时还对相邻熔道的搭接等进行分析,研究了包括粉床温度等参数对于零件成形的影响。在激光选区熔化过程中,力学性能除了受到工艺参数的影响外,零件在基板上的位置也会对零件的性能产生一定的影响,Niendorf等^[21]通过研究发现,激光选区熔化加工的零件有很强的各向异性,所加工的零件在Z轴方向上的抗拉强度、屈服强度明显低于X、Y方向,因此在使用激光选区熔化技术加工零件时还需要考虑零件在实际使用过程中的受力状况,根据具体使用情况来决定零件在基板上

的摆放方式。

在SLM加工零件的过程中,除了激光功率、扫描间距、扫描速度这些常见的参数对最终成形件的性能和致密度有很大的影响,不同的扫描策略乃至不同的零件支撑均会对成形件的最终性能产生一定的影响。不同的扫描策略改变了熔道之间的搭接状况,从而影响了零件的致密度以及力学性能。王迪等^[22]采用正交试验对激光选区熔化成形中扫描策略的影响进行研究,发现随着“层间错开”扫描策略的应用,成形件中由于扫描线搭接而产生的缺陷和零件外边凸起缺陷得到了很大的改善,“层间错开”的扫描策略使后一层扫描线在前一层的两道扫描线之间扫描,使其获得更多的基体体积润湿,从而使得层间和层内的扫描线获得了更加良好的冶金结合,导致成形件的孔隙率大大降低,最终的成形件变得更加致密。

在零件的实际使用过程中,除了对零件的力学性能有所要求外,往往对零件的表面质量也会有所要求,通过控制激光选区熔化过程中的工艺参数,即使在相同的能量密度下,通过不同的工艺参数配合也会使最终零件的表面质量产生差异,对于某些特定用途的零件,其对于零件表面质量的要求较高,因此,很多学者也研究了激光选区熔化工艺参数与零件表面质量之间的关系。Pupo等^[23]通过全因子试验进行层质量分析,得出结论在较低的扫描速度和扫描间距下零件的表面质量较好,即在适当的能量密度和搭接率下零件的表面质量较好。

2.2 激光选区熔化制备钴基高温合金的失效分析

对于传统的钴基高温合金而言,其强化方式以固溶强化和碳化物的弥散强化为主,碳化物的存在使得其力学性能进一步提高,但在零件的是小过程中,在晶界处聚集的碳化物往往会导致裂纹的开端,钴基高温合金中,碳化物主要为MC型、 M_7C_3 型和 $M_{23}C_6$ 型3种,MC型碳化物在合金中直至初熔温度都十分稳定,并在900℃以上的温度时 M_7C_3 型碳化物会与基体反应,转化为 $M_{23}C_6$ 型碳化物,而在高温应力的作用下晶界处的 $M_{23}C_6$ 型碳化物往往会成为裂纹的萌发处,而MC型碳化物不会,因此 $M_{23}C_6$ 型碳化物的强化效果不如MC型碳化物^[24-25]。张强

等^[26]的研究表明 ECY768 钴基高温合金室温拉伸强度、高温拉伸强度以及持久强度等均高于传统的 K640、DZ40M 钴基铸造高温合金,主要是由于 ECY768 中含有较多的 MC 型碳化物形成元素,其中以 Ta 为主。目前,钴基高温合金凭借其良好的工艺性能以及优良的耐高温腐蚀性能而被广泛应用于制造飞机发动机的涡轮叶片,由于飞机发动机零部件工作环境的特殊性,要求所使用的材料必须具有良好的疲劳强度,以适应飞机发动机在使用过程中所产生的高载荷不同频率的振动^[27-28]。

Monroy 等^[29]研究了 CoCrMo 钴基高温合金在激光选区熔化过程中孔洞的形成,通过控制工艺参数的方式实现对孔洞大小以及孔隙率的控制,从而达到控制零件最终性能的目的,研究表明零件中孔洞的产生主要是由于激光选区熔化过程中封闭在零件内部的气体,通过增加铺粉层厚可以显著减小孔

隙的尺寸。另一方面,当零件在成形过程中长时间暴露在较高的温度下时,即扫描速度较慢时,孔洞会出现明显的长大,从而对零件的性能产生不利的影响^[30-31]。

Rezapar 等^[32-33]通过热疲劳实验研究了钴基铸造高温合金的热疲劳行为,在火焰加热的平台上对楔形试样进行了测试,研究了在 200~1100℃ 范围内不同温度下以及不同的几何形状对钴基铸造高温合金的影响。得出了在高温低周疲劳实验条件下,裂纹总是优先产生于氧化的枝晶间处,随后在疲劳和氧化的共同作用下裂纹进一步扩展,最终导致断裂。Mróz 等^[34]研究了疲劳实验后 ECY768 钴基高温合金的断口特征,断口呈现解理断裂和沿晶断裂的特征,属于脆性断裂,通过对断口的分析可知,裂纹主要起源和发展于富钼等脆性碳化物相处。图 2 为 ECY768 的疲劳断口扫描电镜照片。

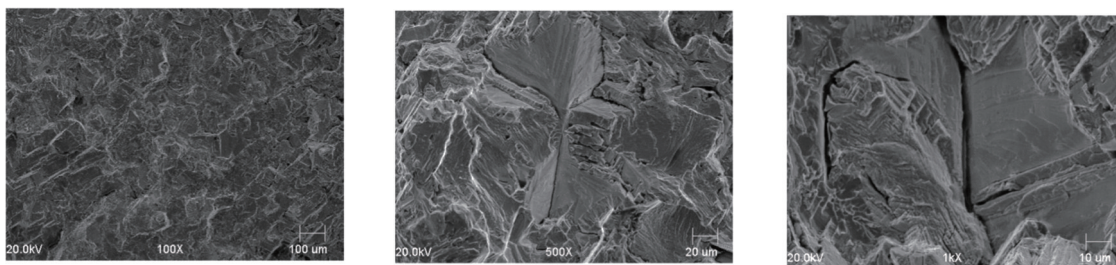


图 2 疲劳断口扫描电镜照片

3 激光选区熔化制备钴基高温合金的问题及解决方法

激光选区熔化技术作为一项新兴的金属增材制造技术,在众多学者的大量工作的辅助下可以获知,激光选区熔化过程中粉末快速熔化、快速凝固使得最终获得的零件有着较为细小的组织,改变了传统加工手段所获得的较为粗大的组织形貌,因此使得最终获得的零件有着较高的强度。但由于其韧性较差,因此人们使用热处理等手段尝试改善激光选区熔化制备出的零件的韧性。对于钴基高温合金,基体的固溶强化是其主要强化方式之一,因

此通常采用固溶处理手段进行后处理,在固溶处理的过程中,碳化物先溶解再析出,在这一过程中,其组织和性能得到调控,组织上,激光选区熔化过程产生的熔池等形貌逐步消失,性能上,强度略有下降,但韧性获得大幅提高,从而满足了零件的最终使用需要^[35-36]。

为了改善钴基铸造高温合金的性能,通过热处理等后处理手段可以有效改善其机械性能, Huang 等^[37]研究了不同热处理工艺对钴基铸造高温合金性能的影响,实验结果表明:热处理后的试样有着良好的强度和韧性,其延伸率和抗拉强度均高于国家标准,其断裂机理也由铸态下的脆性断裂开始向

韧性断裂转变,通过调整退火工艺的温度和时间可以使试样获得良好的强度和韧性配比。从其机理上进行分析,在固溶处理过程中,除了碳化物的溶解析出,还发生了部分马氏体相变的过程,在激光选区熔化过程中,后一层烧结过程中会对前一层产生一个热处理的作用,使得少量的高温稳定的 γ 相转变为室温稳定的 ϵ 相,在后续的热处理过程中,通过调控热处理温度和时间,对 γ 相的转变可以进行调控,从而使得最终的零件性能可以满足需求^[38-39]。

由上述结论可以得知,热处理等后处理手段对于降低零件表面残余应力,即阻止零件的变形有积极作用。Yan等^[40]通过试验研究了两种不同温度下的热处理工艺对CoCr金属陶瓷合金的影响,从而得出一组最佳的热处理工艺参数,使得SLM成形件经热处理后在满足CoCr金属陶瓷合金医用假牙的性能的基础上,极大程度上降低了其变形开裂倾向。大量学者的研究表明,热处理手段除了改变了零件的残余应力的状态,对最终的SLM成形件的组织力学性能均存在较大的影响。Zhang等^[41]主要研究了热处理对于CoCrMo钴基高温合金力学性能的影响,试验分别对比了激光选区熔化成形样品、铸造成形样品以及激光选区熔化成形后经热处理的试样的各项力学性能,发现激光选区熔化后的样品经适当的热处理后可以实现较好的强度和韧性配比,通过对比拉伸试验的结果可知,激光选区熔化后的样品经适当的热处理后,其延伸率和抗拉强度在高于使用要求的基础上均高于同批次的铸造试样样品,通过对各个样品拉伸试验断口的分析,还发现经热处理后样品的断裂形式由激光选区熔化样品的脆性断裂开始向韧性断裂转变,断口处可以观察到韧窝等韧性断裂特征,使最终样品的综合力学性能得到提高。

4 结论

目前,随着增材制造技术的不断进步,以激光选区熔化技术为代表的金属增材制造技术已经被广泛应用于许多金属零件的生产制造中,许多传统

加工手段难以加工或者无法加工的零件通过增材制造技术可以实现快速一体成形,为传统的制造业带来了巨大的冲击。随着人们对于增材制造技术生产钴基高温合金零件的不断深入研究,众多学者尝试通过控制工艺参数以及加工条件等方式,对激光选区熔化技术加工的钴基高温合金的组织性能进行进一步的控制,从而获得可以满足实际需求需求的钴基高温合金零件。针对于不同零件的使用需求,通过调节工艺参数组合以及选择不同的后处理方式可以使最终的零件定向获得不同的表面质量或者力学性能,在未来,这将是研究钴基高温合金增材制造技术的一个重要的方向。

参考文献(References)

- [1] Pillai R, Wessel E, Nowak W J, et al. Predicting effect of base alloy composition on oxidation-and interdiffusion-induced degradation of an MCrAlY coating[J]. The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2018, 70(8): 1520-1526.
- [2] Wang Z, Yan Y, Su Y, et al. Effect of electrochemical corrosion on the subsurface microstructure evolution of a CoCrMo alloy in albumin containing environment[J]. Applied Surface Science, 2017, 406: 319-329.
- [3] Munoz A I, Schwiesau J, Jolles B M, et al. In vivo electrochemical corrosion study of a CoCrMo biomedical alloy in human synovial fluids[J]. Acta Biomaterialia, 2015, 21: 228-236.
- [4] 杨永强, 刘洋, 宋长辉. 金属零件3D打印技术现状及研究进展[J]. 机电工程技术, 2013, 42(4): 1-7.
- [5] Zhou Y, Li N, Yan J, et al. Comparative analysis of the microstructures and mechanical properties of Co-Cr dental alloys fabricated by different methods[J]. The Journal of prosthetic dentistry, 2018, 120(4): 617-623.
- [6] Kempen K, Thijs L, Van Humbeeck J, et al. Processing AlSi10Mg by selective laser melting: Parameter optimisation and material characterisation[J]. Materials Science and Technology, 2015, 31(8): 917-923.
- [7] Guo N, Leu M C. Additive manufacturing: Technology, applications and research needs[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2013, 8(3): 215-243.
- [8] 韩寿波, 张义文, 田象军, 等. 航空航天用高品质3D打印金属粉末的研究与应用[J]. 粉末冶金工业, 2017, 27

- (6): 44–51.
- [9] Li D, He J, Tian X, et al. Additive manufacturing: Integrated fabrication of macro/microstructures[J]. *Jixie Gongcheng Xuebao(Chinese Journal of Mechanical Engineering)*, 2013, 49(6): 129–135.
- [10] Conner B P, Manogharan G P, Martof A N, et al. Making sense of 3D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services[J]. *Additive Manufacturing*, 2014, 1: 64–76.
- [11] Van Elsen M, Al-Bender F, Kruth J P. Application of dimensional analysis to selective laser melting[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2008, 14(1): 15–22.
- [12] Di W, Yongqiang Y, Xubin S, et al. Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 58(9–12): 1189–1199.
- [13] 杨恬恬, 闫岸如, 王燕灵, 等. K640 高温合金激光选区熔化成形工艺及性能研究[J]. *应用激光*, 2016, 36(1): 5–12.
- [14] Cloots M, Kunze K, Uggowitzer P J, et al. Microstructural characteristics of the nickel-based alloy IN738LC and the cobalt-based alloy Mar-M509 produced by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 658: 68–76.
- [15] Lu Y, Gan Y, Lin J, et al. Effect of laser speeds on the mechanical property and corrosion resistance of CoCrW alloy fabricated by SLM[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, 23(1): 28–33.
- [16] Wang J H, Ren J, Liu W, et al. Effect of selective laser melting process parameters on microstructure and Properties of Co-Cr Alloy[J]. *Materials*, 2018, 11(9): 1546.
- [17] Wen S F, Li S, Wei Q S, et al. Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2660–2667.
- [18] Di W, Yang Y Q, Su X B, et al. Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 58(9–12): 1189–1199.
- [19] Chen Z W, Darvish K, Pasang T. Effects of Laser Power on Track Profile and Structure Formation during Selective Laser Melting of CoCrMo Alloy[C]//*Materials Science Forum*. Trans Tech Publications, 2017, 879: 330–334.
- [20] Ciurana J, Hernandez L, Delgado J. Energy density analysis on single tracks formed by selective laser melting with CoCrMo powder material[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(5–8): 1103–1110.
- [21] Niendorf T, Leuders S, Riemer A, et al. Highly anisotropic steel processed by selective laser melting[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2013, 44(4): 794–796.
- [22] 王迪, 杨永强, 黄延录, 等. 层间扫描策略对 SLM 直接成型金属零件质量的影响[J]. *激光技术*, 2009, 34(4): 447–451.
- [23] Pupo Y, Serenó L, de Ciurana J. Surface quality analysis in selective laser melting with CoCrMo powders[C]//*Materials Science Forum*. Trans Tech Publications, 2014, 797: 157–162.
- [24] ASM specialty handbook: Heat-resistant materials[M]. Ohio: ASM International, 1997.
- [25] Davies J R. ASM specialty handbook: Nickel, cobalt, and their alloys[J]. Materials Park, Ohio: ASM International, 2000, doi: 10.5860/oice.38–6206.
- [26] 张强, 张宏伟, 贾新云, 等. 钴基铸造高温合金 K6509 的研究[J]. *材料工程*, 2009(suppl1): 142–145.
- [27] Yang F M, Sun X F, Guan H R, et al. On the low cycle fatigue deformation of K40S cobalt-base superalloy at elevated temperature[J]. *Materials Letters*, 2003, 57(19): 2823–2828.
- [28] Jiang L, Brooks C R, Liaw P K, et al. Low-cycle fatigue behavior of ULTIMET® alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, 35(3): 785–796.
- [29] Monroy K, Delgado J, Ciurana J. Study of the pore formation on CoCrMo alloys by selective laser melting manufacturing process[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 63: 361–369.
- [30] Li R, Liu J, Shi Y, et al. 316L stainless steel with gradient porosity fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2010, 19(5): 666–671.
- [31] Gong H, Rafi K, Gu H, et al. Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes[J]. *Additive Manufacturing*, 2014, 1: 87–98.
- [32] F. Rezai-Aria, François M, Rémy L. Thermal fatigue of MAR-M 509 superalloy I: The influence of specimen geometry[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2010, 11(4): 277–289.

- [33] Rezai-Aria F, Dambrine B, Rémy L. Thermal fatigue of MAR-M509 superalloyII: Evaluation of life prediction models[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1988, 11(4): 291-302.
- [34] Mróz M, Orłowicz W, Tupaj M. Evaluation of fractures in MAR-M509 alloy samples after fatigue strength tests [J]. *Archives of Foundry Engineering*, 2010, 10(3): 115-118.
- [35] Kajima Y, Takaichi A, Kittikundecha N, et al. Effect of heat-treatment temperature on microstructures and mechanical properties of Co-Cr-Mo alloys fabricated by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 726: 21-31.
- [36] Bedolla-Gil Y, Juarez-Hernandez A, Perez-Unzueta A, et al. Influence of heat treatments on mechanical properties of a biocompatibility alloy ASTM F75[J]. *Revista Mexicana De Fisica*, 2009, 55(1): 1-5.
- [37] Huang Y L. Effect of heat treatment on properties of cast CoCrMo alloy[J]. *Shanghai Gangyan*, 2003, 4(1): 27-31.
- [38] Antunes L H M, Hoyos J J, Fonseca E B, et al. Effect of phase transformation on ductility of additively manufactured Co-28Cr-6Mo alloy: An in situ synchrotron X-ray diffraction study during mechanical testing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 764: 138262.
- [39] Lee S H, Takahashi E, Nomura N, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ni- and C-free Co-Cr-Mo alloys for medical applications[J]. *Materials transactions*, 2005, 46(8): 1790-1793.
- [40] Yan X, Lin H, Wu Y, et al. Effect of two heat treatments on mechanical properties of selective-laser-melted Co-Cr metal-ceramic alloys for application in thin removable partial dentures[J]. *The Journal of prosthetic dentistry*, 2018, 119(6): 1028.
- [41] Zhang G Q, Li J X, Zhou X Y, et al. Effect of heat treatment on the properties of CoCrMo alloy manufactured by selective laser melting[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(5): 2281-2287.

Progress on application of selective laser melting in preparation of cobalt-based superalloy

CHEN Chaoyue^{1,2}, WANG Xiaodong^{1,2}, WANG Jiang^{1,2*}, REN Zhongming^{1,2}

1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

2. State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract The Cobalt-based superalloy enjoys a high strength and a good heat and corrosion resistance, with a wide range of applications in biomedicine, aerospace and other fields. In recent years, the rapid development of the additive manufacturing technology represented by the selective laser melting technology (SLM) has provided new possibilities for the processing and the application of high-temperature alloys such as the cobalt-based superalloys. Compared with the traditional processing methods, the additive manufacturing technology has many advantages, such as the customization, the fairly easy processing of complex structural parts and the short manufacturing cycle. This paper reviews the applications of the selective laser melting (SLM) technology in the preparation of the cobalt-based superalloys, as well as the tests for the density and mechanical properties, and the influence of the process parameters on the density, the hardness and other mechanical properties such as the roughness, the tensile strength. In order to meet the actual use demand, the postprocessing might be needed and the influence of the postprocessing should be considered.

Keywords cobalt-based superalloy; selective laser melting; laser additive manufacturing ●



(责任编辑 卫夏雯)