

增材制造高熵合金研究进展

牛朋达, 李瑞迪, 袁铁锤, 王敏卜, 刘咏

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 高熵合金 (High-entropy alloys, HEA) 由于具有优异的力学性能、抗高温氧化性能、耐腐蚀性能等优点, 受到了越来越多学者的关注。目前高熵合金的制备一般采用传统的铸锻轧, 这对于制备一些形状复杂的高端零部件和超细晶组织是一种严峻的挑战, 而采用增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 技术是解决上述问题的一个有效途径。重点阐述了国内外近年来在高熵合金增材制造材料种类、快速凝固非平衡组织演化、裂纹等成形缺陷、力学性能及成形特征方面的研究进展, 为增材制造高熵合金进一步发展提供一定参考。最后, 对增材制造高熵合金的研究进展进行了总结, 并对增材制造高熵合金成分的设计提供了一定的思路。

关键词: 增材制造; 高熵合金; 组织演化; 力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.04.007

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)04-0051-07

Research Progress of High-entropy Alloys by Additive Manufacturing

NIU Peng-da, LI Rui-di, YUAN Tie-chui, WANG Min-bo, LIU Yong

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

ABSTRACT: High-entropy alloys (HEAs) attract more and more attention of scholars for their excellent mechanical properties, high-temperature oxidation resistance, corrosion resistance and other advantages. But, at present, the HEAs are usually fabricated by traditional casting, forging and rolling, which is a severe challenge for the preparation of high-end parts with complex shapes and ultra-fine grains. Additive manufacturing (AM) technology is an effective way to solve the above problem. In this paper, the research progress on the types of materials, rapid solidification non-equilibrium microstructure evolution, cracks and other forming defects, mechanical properties and forming characteristics of HEAs additive manufacturing in domestic and overseas in recent years was mainly described, providing some references for the further development of high-entropy alloy additive manufacturing. Finally, the research progress of HEAs was summarized, and some ideas were provided for design of high entropy alloy composition.

KEY WORDS: additive manufacturing; high-entropy alloys; microstructure evolution; mechanical property

近年来, 高熵合金由于具有优异的力学性能、耐腐蚀性能、高低温性能, 吸引了越来越多学者的关注。高熵合金作为一种新型体系的材料, 其设计理念打破了传统单一合金主元设计框架的束缚, 开创了新的合金材料体系^[1-2]。但是, 目前高熵合金的制备一般采

用传统的铸锻轧, 这对于制备一些形状复杂的工件和超细晶是一种严峻的挑战, 而采用增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 技术是解决上述问题的一种有效途径。与传统的铸造和锻造相比, 增材制造具有许多传统方法不具备的优点, 如在制备过程中无需模具就

收稿日期: 2019-05-26

基金项目: 国家自然科学基金 (51571214, 51871249)

作者简介: 牛朋达 (1991—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为金属增材制造。

通讯作者: 李瑞迪 (1983—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为金属粉末激光增材制造。

可以制备出高度的复杂工件^[3]。激光增材制造更重要的一个特性是具有极快的冷却速度,可以达到 10^7 K/s^[4]。由于其快速凝固,可以得到一些超细晶组织,同时也可以改善元素分布的均匀性^[5-6],从而提高工件的综合力学性能,因此,激光增材制造高熵合金在晶粒细化及构件形状复杂度方面具有不可替代的优势。增材制造按照原理可以分为激光立体沉积(Laser metal deposition, LMD)、选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)、激光金属熔化(laser metal fusion, LMF)、选区电子束熔化(Selective electron beam melting, SEBM)以及激光立体烧结(Direct metal laser sintering, DMLS)。

激光增材制造高熵合金并不是简单地将铸轧方式转变为增材制造方式。由于增材制造是一种快冷快热和非平衡凝固的过程,在打印过程中不可避免地会产生热应力,从而产生微裂纹和气孔,降低工件的打印性能^[7],因此,激光增材制造的非平衡冶金及快速凝固会使学术界对高熵合金快速凝固组织演化、性能及成形特征进行重新认识。

1 增材制造高熵合金研究现状

1.1 粉末床增材制造高熵合金研究

表 1 为近年来粉末床增材制造高熵合金的研究

汇总。2015年, Brif等^[8]首次利用粉末床 3D 打印设备制备了四元等摩尔体系的 FeCoCrNi 高熵合金,并揭示出了其物相组成也是单相的 FCC 固溶体结构,同时相较于浇注所制备的高熵合金,也展现出了较好的塑性和韧性。结果表明,可以采用 3D 打印技术制备高熵合金,同时也可以利用 3D 打印技术获得性能优异的产品。为了进一步增强其力学性能,刘咏等^[9]通过选区激光熔化设备研究了不同能量密度对粉末床制造 FeCoCrNiC_{0.5}体系高熵合金的影响。研究表明,打印后的样品致密度随着激光能量密度的增大逐渐增大,最高拉伸强度达到 749 MPa,远远高于传统方法制备的高熵合金。打印后的晶粒沿着建造方向逐渐增大,主要是打印过程中的冷却速率呈梯度变化^[10]。2018年, Li等^[11]首次系统研究了选区激光熔化五元等摩尔体系的 FeMnCoCrNi 高熵合金,并对其非平衡凝固的显微组织、物相组成、力学性能等进行了研究。在打印后的组织中发现了 σ 析出相,而传统方法所制备的 FeMnCoCrNi 体系的高熵合金都是单相的 FCC 结构。同时,打印后的组织随着激光能量密度的增大而变得致密,并且打印后的样品中存在大量的位错以及纳米孪晶,通过位错的缠绕、堆积等可以增强其力学性能。进一步对打印后的样品做热等静压处理(见图 1),发现打印中存在的微裂纹、微气孔消失,致密度进一步增大,虽然经热等静压后的晶粒变大,但

表 1 粉末床增材制造高熵合金研究汇总
Tab.1 Summery of entropy alloy by powder bed additive manufacturing

高熵合金类型	成形效果	物相组织	力学性能	研究机构及作者
CoCrFeNi	打印表面成形性好,无明显的裂纹、气孔	FCC, 元素均匀分布,无偏析	拉伸强度达到 745 MPa, 屈服强度 600 MPa, 伸长率 32%	英国的谢菲尔德大学 Brif ^[8]
CoCrFeNiC _{0.5}	打印表面质量较好,几乎达到全致密,相对密度达 99%	FCC 组织均匀分布	拉伸强度 789 MPa, 屈服强度 638 MPa, 伸长率 13.5%	中南大学 Liu ^[9]
CoCrFeMnNi	打印表面成形质量较好,相对密度达 99.88%	FCC	拉伸强度为 601 MPa, 屈服强度 519 MPa, 伸长率约为 34%	中南大学 Li ^[11] , 新加坡南洋理工大学的 Guo ^[12] 伦敦帝国理工学院 Piglione ^[13]
Al _{0.5} CoCrFeNi	打印表面质量较好,无明显的裂纹及气孔	FCC+BCC, 显微组织由等轴晶和柱状晶粒组成	拉伸强度 721 MPa, 屈服强度 579 MPa, 伸长率 22%	中南大学 Xiao ^[14]
AlCoCrFeNi	打印后有大量的层间裂纹,相对密度 97%	B2+BCC	维氏硬度约为 HV680, 远远高于其他制备方法	中南大学 Li ^[15] , 瑞典乌普萨拉大学 Karlsson ^[16]
AlCrCuFeNi	打印表面质量相对较好,有微裂纹的存在,相对密度为 99.7%	BCC+B2, 平均晶粒尺寸约 4 μ m, 显微组织由等轴晶和柱状晶构成,同时发现 Cu 元素在晶界富集	压缩强度 2052 MPa, 断裂伸长率 6.8%	华中科技大学 Wang ^[17]
AlCoCuFeNi	打印表面成形质量好,有微裂纹和气孔的存在	B2+FCC, 元素均匀分布在组织中,经退火后有元素的偏析	压缩强度 1471 MPa, 断裂伸长率 0.9%	北京科技大学 Zhang ^[18]

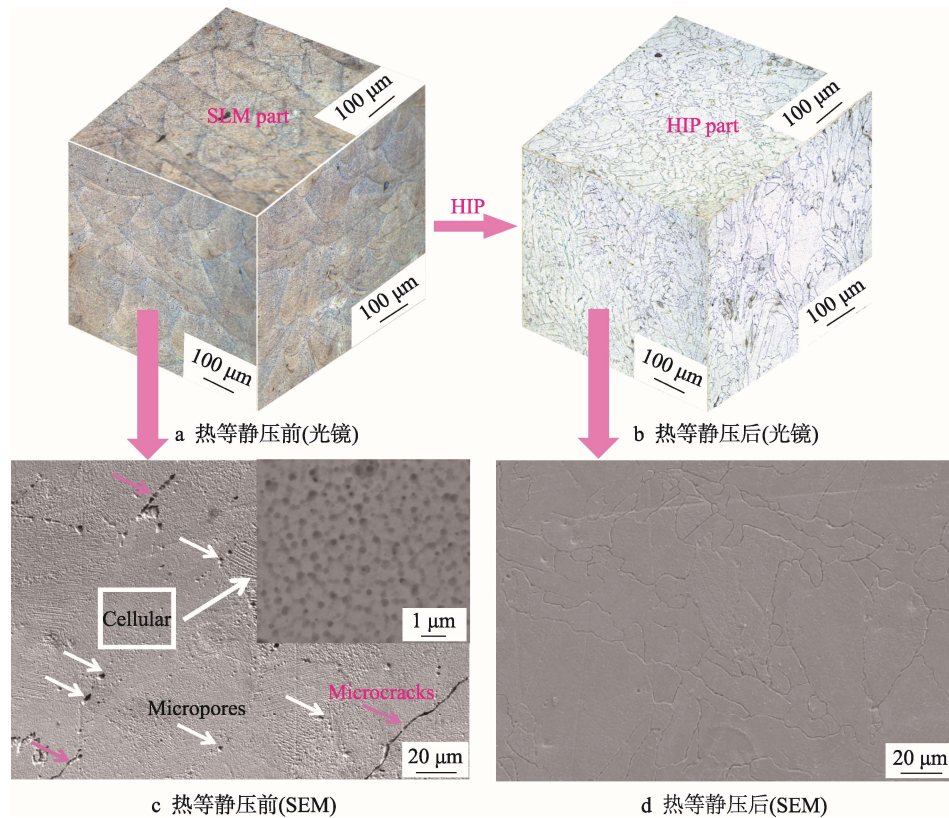


图 1 五元等摩尔 CoCrFeMnNi 高熵合金 SLM 打印件热等静压前后显微组织
Fig.1 Microstructure of CoCrFeMnNi HEA SLM printout before and after HIP

是由于其微裂纹、气孔等的闭合使得整体上其力学性能得到了进一步提高。随后大量学者对 FeMnCoCrNi 体系的高熵合金进行了增材制造研究。Guo 等^[12]首次研究了选区激光熔化 FeMnCoCrNi 高熵合金后的机加工性能。通过扫描电镜发现,经机械抛光后的元素分布更加均匀,并且表面光滑没有明显的波浪,只是存在少量的微裂纹和气孔。随后 Piglione 等^[13]进一步采用粉末床 3D 打印对 FeMnCoCrNi 体系的高熵合金进行单层和多层打印,以研究打印过程中的热循环对打印后组织演化的影响,发现打印后晶粒沿外延生长,这与 Li 等研究结果类似。

随后,大量研究者对粉末床增材制造的其他体系高熵合金进行了研究。Xiao 等^[14]对双相的 $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNi}$ 进行了研究,发现经 SLM 后物相变成单一的 FCC 相,这与粉末态的物相 FCC+BCC 不同。这种物相发生变化可能是由于打印过程中的冷却速率过大引起的。同时发现选区激光熔化所制备的此种高熵合金块体的性能高于传统电弧熔炼所制备的合金(见图 2b),并且打印后组织呈现出等轴晶与柱状晶的混晶组织(见图 2a)。图 2c 是其采用选区激光熔化制备的涡轮叶片,可以看出,所制备的零件不仅形状复杂,而且还具有很高的表面精度。

中南大学李瑞迪对等摩尔 AlCoCrFeNi 体系的高

熵合金进行粉末床增材制造研究^[13],发现打印后的样品中存在大量的层间裂纹,打印的成形性较差,但是对组织进行研究分析发现,经粉末床打印的块体物相组成仅为 BCC 相($\text{A2}+\text{B2}$),这与传统方法所制备的物相组成为 FCC+BCC 不同,同时利用 EBSD 技术鉴定出 B2 相,并发现打印后的 B2 相主要沿着熔池边界分布,在晶内也发现了富含 Fe-Cr 的析出相。2019 年,瑞典乌普萨拉大学的 Karlsson 等^[16]比较了选区激光熔化和电弧熔炼制备 AlCoCrFeNi 合金中的元素偏析情况,发现通过调整不同的工艺参数也不能避免打印过程中裂纹的形成,此外对打印后的样品进行热处理,发现了富 Cr 相与贫 Cr 相的区域。华中科技大学的王泽敏等^[17]进一步对 AlCrCuFeNi 高熵合金体系进行粉末床增材制造,并研究了其过程中的加工性、非平衡凝固以及力学性能,发现此种体系的高熵合金也是一种裂纹敏感材料,并且在打印过程中有相变的形成,从双相的 FCC+BCC 变成单一 BCC 相,可能是由于在制造过程中的冷却速率过大所导致。同时也发现了由于反复的热循环,柱状晶粒穿过多层建造层,且沿着 $\langle 100 \rangle$ 方向择优生长,此外,富含 Cu 的纳米析出相在大角度晶界处呈现出链状,而在小角度晶界处呈现出颗粒状。北京科技大学的 Zhou 等^[18]进一步通过改变高熵合金的成分 AlCoCuFeNi 来进行粉末床增材制造研究,打印后的合金是单一

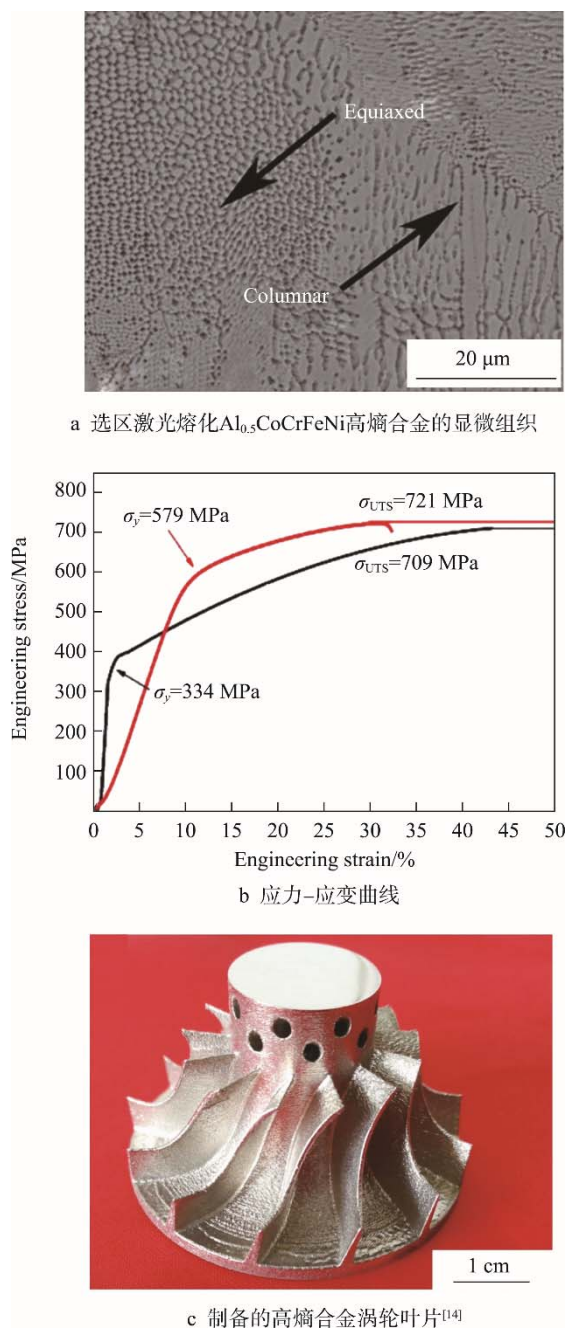


图2 选区激光熔化 $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金的显微组织、力学性能以及所制备的涡轮叶片

Fig.2 Microstructure, mechanical properties and turbine blade of $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNi}$ HEA by SLM

的 BCC 相,经过热处理后发现少量的 FCC 和 B2 相的生成,正是由于这种脆硬相 B2 的生成,可以使其力学性能进一步提高,同时也发现经过热处理后有富 Cu 相的析出。

1.2 同轴送粉 3D 打印

同轴送粉增材制造高熵合金汇总见表 2。先前的研究大多集中在高熵合金涂层与粉末床增材制造方向^[19—20]。2015 年,美国密苏里大学的 Sistta 等^[21]首次利用同轴送粉设备制备了 $\text{Al}_x\text{FeCoCrNi}_{2-x}$ ($x=0.3$

或 1) 体系的高熵合金,并发现铝含量对打印后合金的组织、显微硬度以及相变具有很大的影响,即随着铝含量的减小,物相从 BCC 转变为 FCC,同时显微硬度也逐渐降低,显微组织发生从枝晶到等轴晶再到柱状晶的转变。在最优的铝镍比下,可以获得力学性能更加优异的高熵合金块体。2017 年,澳大利亚迪肯大学的 Joseph 等利用同轴送粉设备方法研究了含铝体系的高熵合金 $\text{Al}_{0.3}\text{FeCoCrNi}$ ^[22],分析表明打印后的样品也是单相体系的 FCC 结构,同时,大量的晶粒平行于建造方向生长,有强烈的 $\langle 001 \rangle$ 择优取向。同时也发现了此体系高熵合金在加工硬化和塑性方面具有拉伸/压缩的不对称性。在压缩过程中具有异常高的加工硬化,这归因于大量的机械孪晶,而铸态材料中强烈的织构也加剧了机械孪晶的形成,而在拉伸变形中并没有发现变形孪晶,而是通过滑移来完成变形,因此具有较低的伸长率与加工硬化率。2019 年,江苏大学的 Ren 等采用同轴送粉设备打印了 FeMnCoCrNi 体系的高熵合金^[23],并研究了热处理对显微组织、残余应力以及力学性能的影响,发现打印后也是单相的 FCC 固溶体结构,并且样品具有优异的力学性能,经热处理后,其强度进一步得到了提高。

1.3 选区电子束熔化

选区电子束熔化增材制造高熵合金汇总见表 3。2015 年,日本日立创新中心的 Fujieda 等第一次采用 SEBM 技术制备了高熵合金块体 AlCoCrFeNi ^[25],同时也是第一次采用增材制造技术来制备高熵合金。发现其打印后的物相组成是 FCC+BCC 双相体系,通过 EBSD 发现 BCC 相沿着 $\langle 100 \rangle$ 方向择优生长,这与 BCC 晶体结构的择优生长方向一致,通过采用 SEBM 技术所制备的高熵合金块体的力学性能远远高于采用传统铸造所制备的性能。随后在 2016 年,日本东北大学的 Shiratori 等进一步利用 SEBM 技术,对等摩尔体系的 AlCoCrFeNi 高熵合金的显微组织与力学性能之间的关系进行了研究^[26],发现采用选区电子技术与传统的浇注所制备的高熵合金都是由无序的 A2 相、有序的 B2 相以及在晶界处的 FCC 相组成,并且 FCC 相在底部比在顶部的含量高,可能由于 SEBM 在打印的时候有预热过程,即预热有助于 FCC 相的析出。此外也发现 SEBM 的样品比浇注的样品具有更好的塑性变形能力。2018 年,日本日立创新中心的 Kuwabara 等采用选区电子束熔化技术研究了 AlCoCrFeNi 高熵合金的力学性能与腐蚀性能^[27],进一步证明了 SEBM 所制备的高熵合金具有优异的力学性能,但是其点腐蚀电位比铸态实验的要低,可能是由于打印过程中的冷却速度过大,导致产生了大量的位错及细小的晶粒,这些缺陷会使其点腐蚀电位降低。

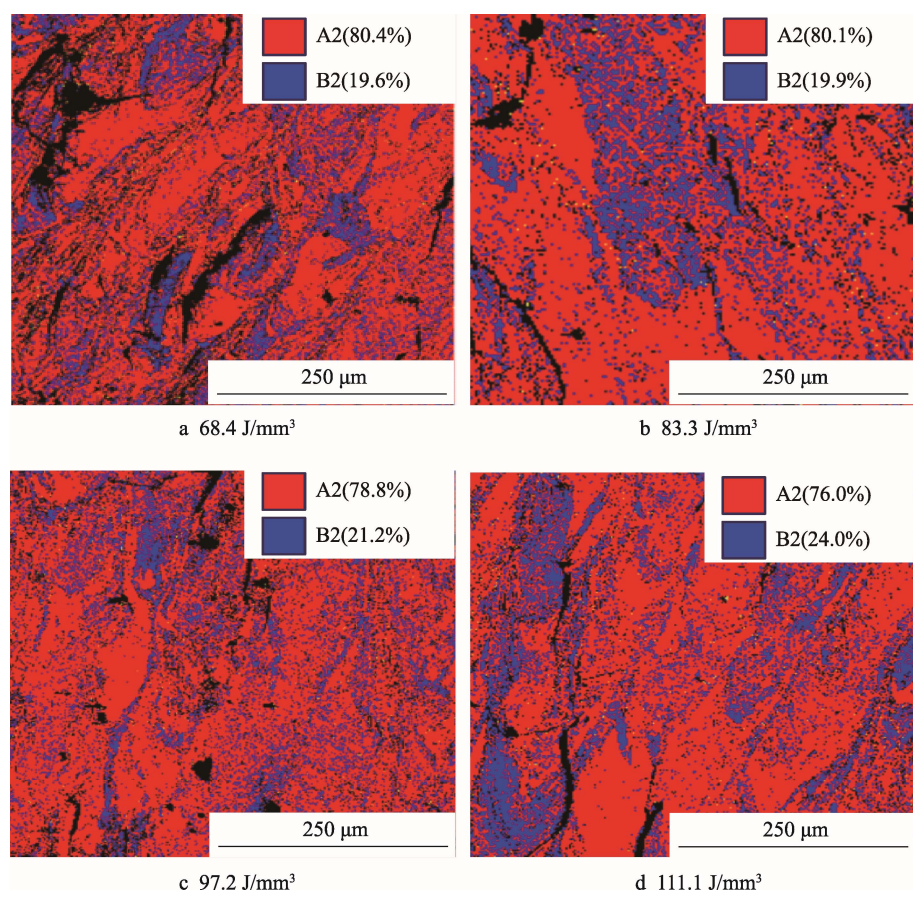


图 3 选区激光熔化 AlCoCrFeNi 高熵合金在不同激光能量密度的物相分布^[15]
Fig.3 Phase distribution of AlCoCrFeNi by SLM at different laser energy density

表 2 同轴送粉增材制造高熵合金研究汇总				
Tab.2 Summary of high-entropy alloy by coaxial powder feeding additive manufacturing				
高熵合金类型	成形效果	物相组织	力学性能	研究机构
Al _{0.3} CoCrFeNi	同轴送粉表面质量较粗糙，无明显的裂纹及气孔	FCC，晶粒较大，平均晶粒尺寸约 250 μm	拉伸强度 275 MPa，屈服强度 194 MPa，伸长率 38%	澳大利亚迪肯大学 Joseph ^[22]
Al _x FeCoCrNi _{2-x}	经同轴送粉打印后，表面质量比较粗糙，同时有微裂纹的存在	BCC+FCC，显微组织有元素偏析。Fe-Cr 相主要在晶内，而 Al-Ni 相主要在校晶间	随着铝含量的提高，显微硬度逐渐增高	美国密苏里科技大学 Sistla ^[21]
FeCrCoMnNi	经同轴送粉打印后，样品中存在少量的微裂纹和气孔等冶金缺陷	FCC，元素均匀分布在打印后的样品中，晶粒为等轴晶和柱状晶的混合组织	拉伸强度 660 MPa，屈服强度 518 MPa，伸长率 19%	江苏大学的 Ren ^[23] 和新加坡南洋理工的 Bi ^[24]

表 3 选区电子束熔化增材制造高熵合金研究汇总				
Tab.3 Summary of high-entropy alloy by SEBM additive manufacturing				
高熵合金类型	成形效果	物相组织	力学性能	研究机构
AlCoCrFeNi	表面质量粗糙，同时打印后样品中存在一些为微裂纹等缺陷	B2+BCC+FCC，发现了 Fe-Cr 相在晶粒内部析出	压缩强度 1668 MPa，断裂伸长率 26%	日力创新中心的 Fujieda ^[25] 和 Shirator ^[26] 以及日本东北大学的 Kuwabarai ^[27]

2 未来展望

高熵合金由于其独有的特性,在功能与结构材料方面具有很大的潜在应用,而采用传统的铸锻和粉末冶金等加工方法很难制备形状复杂的零件以及超细晶组织,而采用增材制造技术是解决上述问题的一个有效途径。但是由于AM成形高熵合金熔池内的高温度和高应力梯度,使打印过程中难以避免热裂纹变形等缺陷的产生,降低打印工件的性能。另外,SLM快热快冷使打印件呈现前所未有的非平衡组织,因此,有必要对增材制造高熵合金的组织演化、加工成形性以及后续的热处理进行进一步研究,具体包括:①对打印后的样品进行热等静压处理来消除打印过程中产生的微裂纹;②通过建模和实验研究来优化打印参数,如激光功率、扫描速度、层厚、扫描策略等来减小打印过程中的残余应力,抑制打印过程中裂纹的产生;③通过改变常规裂纹敏感性合金材料中的微量合金元素含量,来达到调整凝固路径和细化细晶尺寸的目的,降低打印过程中的裂纹敏感性。

3 结论

重点阐述了近年来国内外在高熵合金增材制造材料种类、快速凝固非平衡组织演化、裂纹等成形缺陷、力学性能及成形特征的研究进展。与传统的浇注锻造合金相比,增材制造高熵合金由于具有较快的冷却速率,容易产生细晶甚至超细晶组织,因此所制备样品具有更加优异的力学性能,但是另一方面,由于其冷却速率较快,使打印过程极易产生较大的内应力,从而导致热裂纹的形成,影响打印工件的力学性能。

参考文献:

- [1] LI Zhi-ming, KORMANN F, GRABOWSKI B, et al. Ab Initio Assisted Design of Quinary Dual-phase High-entropy Alloys with Transformation-induced Plasticity[J]. *Acta Materialia*, 2017, 136: 262—270.
- [2] OTTO F, DLOUHY A, SOMSEN C, et al. The Influences of Temperature and Microstructure on the Tensile Properties of a CoCrFeMnNi High-entropy Alloy[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61: 5743—5755.
- [3] CHEN Hong-yu, GU Dong-dong, XIONG Jia-peng, et al. Improving Additive Manufacturing Processability of Hard-to-process Overhanging Structure by Selective Laser Melting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 250: 99—108.
- [4] KHAIRALLAH S, ANDERSON A, RUBENCHIK A, et al. Laser Powder-bed Fusion Additive Manufacturing: Physics of Complex Melt Flow and Formation Mechanisms of Pores, Spatter, and Denudation Zones[J]. *Acta Materialia*, 2016, 108: 36—45.
- [5] ZHAO Xiao, SONG Bo, FAN Wen-rui, et al. Selective Laser Melting of Carbon/AlSi10Mg Composites: Microstructure, Mechanical and Electrical Properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 665: 271—281.
- [6] LI Rui-di, YUAN Tie-chui, WEI Qing-song, et al. Effects of Thermal History and Isostatic Pressing on the Microstructure Evolution of Metallic Components Manufactured by Selective Laser Melting (SLM)[J]. *Lasers in Engineering*, 2013, 25: 23—38.
- [7] 李瑞迪. 金属粉末选择性激光熔化成形的关键基础问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [8] LI Rui-di. Research on the Key Basic Issues in Selective Laser Melting of Metallic Powder[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [9] BRIF Yevgeni, THOMAS Meurig, TODD Iain. The Use of High-entropy Alloys in Additive Manufacturing[J]. *Scripta Materialia*, 2015, 99: 93—96.
- [10] ZHOU Rui, LIU Yong, ZHOU Cheng-shang, et al. Microstructures and Mechanical Properties of C-containing FeCoCrNi High-entropy Alloy Fabricated by Selective Laser Melting[J]. *Intermetallics*, 2018, 94: 165—171.
- [11] CHEN Hong-yu, GU Dong-dong, DAI Dong-hua, et al. Microstructure and Composition Homogeneity, Tensile Property, and Underlying Thermal Physical Mechanism of Selective Laser Melting Tool Steel Parts[J]. *Materials Science and Engineering Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2017, 682: 279—289.
- [12] LI Rui-di, NIU Peng-da, YUAN Tie-chui, et al. Selective Laser Melting of an Equiatomic CoCrFeMnNi High-entropy Alloy: Processability, Non-equilibrium Microstructure and Mechanical Property[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 746: 125—134.
- [13] GUO Jiang, GOH Min-hao, ZHU Zhi-guang, et al. On the Machining of Selective Laser Melting CoCrFeMnNi High-entropy Alloy[J]. *Materials & Design*, 2018, 153: 211—220.
- [14] PIGLIONE A, DOVGYY B, LIU C, et al. Printability and Microstructure of the CoCrFeMnNi High-entropy Alloy Fabricated by Laser Powder Bed Fusion[J]. *Materials Letters*, 2018, 224: 22—25.
- [15] ZHOU P F, XIAO D, WU Z, et al. Al_{0.5}FeCoCrNi High Entropy Alloy Prepared by Selective Laser Melting with Gas-atomized Pre-alloy Powders[J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2019, 739: 86—89.
- [16] NIU Peng-da, LI Rui-di, YUAN Tie-chui, et al. Microstructures and Properties of an Equimolar AlCoCrFeNi High Entropy Alloy Printed by Selective Laser Melting[J]. *Intermetallics*, 2019, 104: 24—32.
- [17] KARLSSON Dennis, MARSHAL Amalraj, JOHANSSON Filip, et al. Elemental Segregation in an AlCoCrFeNi High-entropy Alloy a Comparison Between Selective Laser Melting and Induction Melting[J]. *Journal of Alloys and*

- Compounds, 2019, 784: 195—203.
- [17] LUO Shun-cun, GAO Piao, YU Han-chen, et al. Selective Laser Melting of an Equiatomic AlCrCuFeNi High-entropy Alloy: Processability, Non-equilibrium Microstructure and Mechanical Behavior[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 771: 387—397.
- [18] ZHANG Mi-na, ZHOU Xiang-lin, WANG Da-feng, et al. AlCoCuFeNi High-entropy Alloy with Tailored Microstructure and Outstanding Compressive Properties Fabricated via Selective Laser Melting with Heat Treatment[J]. *Materials Science and Engineering Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2019, 743: 773—784.
- [19] GORSSE S, HUTCHINSON C, GOUNE M, et al. Additive Manufacturing of Metals: a Brief Review of the Characteristic Microstructures and Properties of Steels, Ti-6Al-4V and High-entropy Alloys[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2017, 18: 584—610.
- [20] LI Wei, LIU Ping, LIAW Peterk. Microstructures and Properties of High-entropy Alloy Films and Coatings: a Review[J]. *Materials Research Letters*, 2018, 6: 199—229.
- [21] SISTLA H S, NEWKIRK J W, FRANK L F. Effect of Al/Ni Ratio, Heat Treatment on Phase Transformations and Microstructure of $\text{Al}_x\text{FeCoCrNi}_{2-x}$ ($x=0.3, 1$) High Entropy Alloys[J]. *Materials & Design*, 2015, 81: 113—121.
- [22] JOSEPH J, STANFORD N, HODGSON P, et al. Tension/Compression Asymmetry in Additive Manufactured Face Centered Cubic High Entropy Alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2017, 129: 30—34.
- [23] TONG Zhao-peng, REN Xu-dong, JIAO Jia-fei, et al. Laser Additive Manufacturing of FeCrCoMnNi High-entropy Alloy: Effect of Heat Treatment on Microstructure, Residual Stress and Mechanical Property[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 785: 1144—1159.
- [24] CHEW Y, BI G J, ZHU Z G, et al. Microstructure and Enhanced Strength of Laser Aided Additive Manufactured CoCrFeNiMn High Entropy Alloy[J]. *Materials Science and Engineering Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2019, 744: 137—144.
- [25] FUJIEDA T S, SHIRATORI H S, KUWABARA K K, et al. First Demonstration of Promising Selective Electron Beam Melting Method for Utilizing High-entropy Alloys as Engineering Materials[J]. *Materials Letters*, 2015, 159: 12—15.
- [26] SHIRATORI Hiroshi, FUJIEDA Tadashi, YAMANAKA Kenta, et al. Relationship Between the Microstructure and Mechanical Properties of an Equiatomic AlCoCrFeNi High-entropy Alloy Fabricated by Selective Electron Beam Melting[J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2016, 656: 39—46.
- [27] KUWABARA Kosuke, SHIRATORI Hiroshi, FUJIEDA Tadashi, et al. Mechanical and Corrosion Properties of AlCoCrFeNi High-entropy Alloy Fabricated with Selective Electron Beam Melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 23: 264—271.