

# 电子束熔丝沉积快速成形2319铝合金的 微观组织与力学性能

于菁<sup>1,2</sup> 王继杰<sup>2</sup> 倪丁瑞<sup>1</sup> 肖伯律<sup>1</sup> 马宗义<sup>1</sup> 潘兴龙<sup>3</sup>

1 中国科学院金属研究所 沈阳 110016

2 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院 沈阳 110036

3 桂林狮达机电技术工程有限公司 桂林 541004

**摘要** 选用直径2 mm的2319铝合金丝材进行电子束熔丝沉积快速成形,制备出尺寸为150 mm×35 mm×52 mm的打印样品。研究了样品在不同方向上的微观组织与力学性能。结果表明,通过控制电子束增材制造参数,可获得致密无宏观缺陷的块体材料,其致密度可达到99.3%。打印态2319铝合金的平均晶粒尺寸小于10 μm,并含有初晶Al<sub>2</sub>Cu相、细小析出相和粗大杂质相。样品中存在少量的微小孔洞,其尺寸为5~15 μm。样品在长、宽、高3个方向的拉伸强度分别约为161、174和167 MPa。经T6处理后,粗大相基本溶解,析出尺寸更细小、分布更均匀的沉淀强化相,孔洞尺寸有所增大。由于沉淀强化起了主导作用,T6处理后样品力学性能显著提高,3个方向的拉伸强度分别提高到约423、495和421 MPa。

**关键词** 铝合金,增材制造,电子束熔丝沉积快速成形,微观组织,力学性能

中图分类号 TG146.2

文章编号 0412-1961(2018)12-1725-10

## Microstructure and Mechanical Properties of Additive Manufactured 2319 Alloy by Electron Beam Freeform Fabrication

YU Jing<sup>1,2</sup>, WANG Jijie<sup>2</sup>, NI Dingrui<sup>1</sup>, XIAO Bolv<sup>1</sup>, MA Zongyi<sup>1</sup>, PAN Xinglong<sup>3</sup>

1 Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 College of Material Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110036, China

3 Guilin THD Mech. & Elec. Engineering Co. Ltd., Guilin 541004, China

Correspondent: NI Dingrui, professor, Tel: (024)83978630, E-mail: drni@imr.ac.cn

Supported by Pre-Research Project on Manned Spaceflight (No.030302)

Manuscript received 2018-02-05, in revised form 2018-05-21

**ABSTRACT** Aluminum alloys have the advantages of light weight and high strength, and they are important structural materials in aerospace field. The additive manufacturing technology of aluminum alloys has a potential application prospect in the field of on-orbit manufacturing in the future, and the technology of electron beam fuse deposition is the best process selection due to its unique technical advantages. In the present study, 2319 aluminum alloy wires with diameter of 2 mm were used for additive manufacturing (AM) by electron beam freeform fabrication (EBF<sup>3</sup>), with a sample of 150 mm×35 mm×52 mm being printed. The microstructure and mechanical properties of the printed sample in three directions were investigated. The results showed that bulk materials of the 2319 alloy can be printed without macroscopic defects under selective EBF<sup>3</sup> parameters, with a relative density of 99.3% compared to the initial wires. The average grain size of the printed sample was less than 10 μm, containing primary Al<sub>2</sub>Cu phases, fine

资助项目 载人航天预先研究项目 No.030302

收稿日期 2018-02-05 定稿日期 2018-05-21

作者简介 于菁,男,1993年生,硕士生

通讯作者 倪丁瑞, drni@imr.ac.cn, 主要从事有色金属及其复合材料、搅拌摩擦焊接与加工研究

DOI 10.11900/0412.1961.2018.00052

particles, and coarse impurity phases. There are some tiny voids in the printed sample, and the sizes of the voids are 5~15  $\mu\text{m}$ . The ultimate tensile strengths of the printed sample were 161, 174 and 167 MPa in the length, width and height directions. After a T6 treatment, the coarse phase were basically dissolved and some finer phases were re-precipitated. Due to the dominant effect of dispersion strengthening, the mechanical properties of the sample were significantly improved, and the ultimate tensile strengths of the sample in three directions were increased to 423, 495, and 421 MPa, respectively.

**KEY WORDS** Al alloy, additive manufacturing (AM), electron beam freeform fabrication (EBF<sup>3</sup>), microstructure, mechanical property

3D打印技术也称作增材制造或快速成形技术,它与传统制造方式不同,是一种逐层叠加的制造方法。近年来,3D打印因为其独有的设计自由和成形时间短的特点在很多制造领域得到关注,已经成为在一定条件下生产致密零件的快速方法,是传统制造工艺的重要补充,在汽车、航空航天、医疗、工程等领域得到日益广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。其中,金属材料(钢、Al及其合金、Ti及其合金等)的增材制造技术尤为引人关注<sup>[5-7]</sup>。

金属3D打印按热源主要分为激光、电子束和电弧等。原材料主要分为粉末和丝材。由于金属Al对激光的反射较强,损耗能量大,一般认为激光3D打印不适用于铝合金,而以电子束或电弧为热源则可避免这一问题<sup>[8]</sup>。与其它快速成形技术一样,电子束3D打印需要对零件的三维计算机辅助设计(CAD)模型进行分层处理,并生成加工路径。它利用电子束作为热源,熔化金属粉体或丝材,按照预定路径逐层堆积,并与前一打印层形成冶金结合,直至形成致密的金属零件。与激光相比,电子束的主要优势是能量损耗低,在真空环境进行打印成形,金属内在质量好、成形速率快、残余应力小、材料与加工成本低,其中丝材利用率也非常高<sup>[9-13]</sup>。

目前,美国 NASA Langley Research Center、Sciaky 公司、Lockheed Martin 公司以及国内一些科研院所对航空航天用钛合金增材制造进行了大量研究<sup>[14-16]</sup>。Brandl 等<sup>[17]</sup>对激光打印 Ti-6Al-4V 丝材沉积小液滴的微观形貌进行了研究,发现增加送丝速率或降低打印速率能使熔化区和热影响区的晶粒长大。Bush 和 Brice<sup>[18]</sup>对电子束丝材增材制造的 Ti-6Al-4V 和 Ti-8Al-1Er 合金进行高温表征,发现其力学性能可以与锻件相近。

与钛合金相比,目前对铝合金的3D打印研究相对较少,主要集中在 AlSi<sub>10</sub>Mg 粉末的激光选区熔融(laser selective melting, LSM)研究<sup>[19-21]</sup>。Read 等<sup>[19]</sup>对 AlSi<sub>10</sub>Mg 粉末进行 LSM 处理,发现临界能量密度为 60 J/m<sup>3</sup>,并且打印件的构建方向对拉伸和蠕变性能影响不大。Brandl 等<sup>[20]</sup>研究了 LSM 制备的 AlSi<sub>10</sub>Mg 合金的微观组织、高周疲劳和断裂行为,发现材料的

疲劳性能可以达到铸件水平,而且发现基板加热到 300 °C 与峰时效(T6 处理)结合使用可以提高抗疲劳强度并抵消不同方向上疲劳寿命的差异。Krishnan 等<sup>[21]</sup>研究了 LSM 制备 AlSi<sub>10</sub>Mg 粉末过程参数对力学性能的影响,发现 2 条连续扫描路径的距离是影响性能的重要参数,而扫描速率也是影响打印件密度和硬度的重要参数。

电子束熔丝沉积快速成形(electron beam free-form fabrication, EBF<sup>3</sup>)技术是近年来发展的新型增材制造技术,具有成形速率快、保护效果好、材料利用率高、能量转化率高等特点,可用于 Ti、Al 等金属零件的成形制造和结构维修<sup>[22]</sup>。与电子束选区熔化方法相比,EBF<sup>3</sup>工艺使用丝材,其成本比粉末大大降低,而且沉积速率更快。另外,在一些特殊环境中,如太空环境中的失重条件下,不适合采用粉末作为原材料,而丝材则不受限制,因此 EBF<sup>3</sup>在工艺技术方面具有突出优点,是目前金属增材制造的重要方法。Taming 等<sup>[23-27]</sup>基于便携式设备(电压 10~60 kV)研究了 EBF<sup>3</sup>制备的 2219 与 2319 铝合金的成形工艺、微观组织与力学性能,通过调节参数获得了性能良好的 3D 打印样品,热处理后的强度达到约 420 MPa,延伸率约 11%。然而关于打印与热处理材料的微观组织演变还缺乏系统研究,尤其是材料中的微孔与第二相的形貌、分布及其对力学性能影响的研究还未见报道。

2319 铝合金与 2219 铝合金成分几乎相同,是轻质高强合金,由于具有良好的低温力学性能、断裂韧性以及抗应力腐蚀性能,广泛应用于航空航天等领域(用作 2219 铝合金焊接的焊丝材料)。本工作通过电子束熔丝沉积方法对 2319 铝合金焊丝进行 3D 打印,对其成形性能特别是微观组织演变特征进行研究,并分析了热处理对力学性能的影响。

## 1 实验方法

3D 打印实验在 THDW-12 型电子束快速成形设备上进行。设备由电子枪、高压电源、真空系统、观察系统、XYZ 三维工作台、送丝系统组成。电子枪的技术参数为:加速电压 85 kV,最大束流 140 mA,最

大功率 12 kW。加工过程中,电子枪、送丝系统和三维工作台通过综合控制系统协调,达到自动化操作的要求,保证熔丝沉积过程稳定进行。实验采用直径为 2 mm 的商用 2319 铝合金焊丝,主要化学成分(质量分数,%)为: Cu 6.3, Mn 0.3, Zn 0.25, Zr 0.18, Ti 0.15, V 0.10, Fe<0.3, Si<0.2, Al 余量。实验前用酒精对丝材进行清洗,并用碱性溶液清洗去除铝合金基板表面的油污,然后打磨去除基板表面的氧化膜,最后用丙酮擦拭干净。实验过程中没有辅助加热。实验中优化了参数对电子束 3D 打印成形性能的影响,工艺参数为丝径 1.2 mm,高压 60 kV,束流 12~20 mA,聚焦 243 mA (散焦 10 mA),送丝速率 2000 mm/min,打印速率 1200 mm/min。

3D 打印样品沿长(L)、宽(W)、高(H)方向的尺寸分别为 150、35 和 52 mm。对打印好的样品进行 T6 处理(固溶时效): 535 °C 固溶处理 40 min,水淬,175 °C 时效 12 h。利用 MEF4A 型万能光学显微镜(OM)、Supra 55 型扫描电镜(SEM)和 Tecnai Spirit TEM T12 型透射电镜(TEM)对微观组织进行观察和分析。在长度、宽度、高度方向分别取金相样品,样品经打磨、抛光后,用体积比为 HNO<sub>3</sub>:HCl:HF:H<sub>2</sub>O=2.5:1.5:1:95 的 Keller 试剂腐蚀,进行金相观察。通过 Archimedes 法测量密度并计算致密度,孔洞数量根据 SEM 图片进行统计。TEM 样品取自高度方向,经粗磨、精磨至 70 μm,采用双喷电解减薄仪减薄,双喷液为 30% HNO<sub>3</sub>+70% CH<sub>3</sub>OH (体积分数的混合溶液,温度 -25 °C,电压 10 V。利用 D/MAX2400 型 X 射线衍射仪(XRD)对热处理前后的样品进行物相分析。

拉伸样品分别从打印件的长、宽、高 3 个方向取样:长、宽方向试样尺寸的平行段尺寸为 2.5 mm×4 mm×30 mm;高度方向平行段尺寸为 2.5 mm×4 mm×10 mm。每组拉伸样品取 3 个,拉伸结果取其平均值。拉伸实验在 SANS-CMT5205 电子万能试验机上进行,初始应变速率为 1×10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>。

## 2 实验结果

### 2.1 微观组织

图 1 为电子束熔丝沉积快速成形 2319 铝合金样品宏观形貌。可以看出,样品成形规整,没有明显孔洞类缺陷。图 2a 为打印态 2319 铝合金样品在长度方向(打印方向)的 OM 像。可以观察到明显的由孔洞与析出相组成的条带状组织,析出相可能是在逐层叠加的过程中由于冷却速率过快发生了成分偏析而形成的。大块的黑色区域为孔洞,孔洞大多存在于层与层之间,这也是在打印过程中由于凝固速率



图 1 电子束熔丝沉积快速成形 2319 铝合金样品宏观形貌

Fig.1 Macromorphology of 2319Al samples printed by electron beam freeform fabrication with dimension 150 mm×35 mm×52 mm (X: length; Y: width; Z: height)

过快、多层先后凝固形成的。图 2b 为打印态 2319 铝合金样品在高度方向上的 OM 像。可以观察到白色块状共晶组织和细小 Al<sub>2</sub>Cu 颗粒。对比图 2a 和 b,也可以看出高度方向上的金相组织没有方向性。图 2c 和 d 分别为 T6 处理后 2319 铝合金长度方向、高度方向的 OM 像。可以看出,条带状组织的方向性变弱,这是由于共晶相的固溶和再析出使得粗大相的尺寸减小,同时图 2d 中可以观察到黑色骨棒状的未溶解完全的粗大相。OM 像中黑色颗粒状和棒状的相为 Al、Fe、Mn、Si 元素构成的杂质相,是铝合金中的常见杂质相,含量相对较少。

图 3 为打印态与 T6 处理后的 2319 铝合金的 XRD 谱。可以看出,2 种状态合金中,除主相 Al 外,析出相主要为 Al<sub>2</sub>Cu,并含有一定量的杂质相。研究<sup>[28-30]</sup>表明,2319 铝合金的主要杂质元素有 Mn、Fe、Si 等,杂质相主要为 Al<sub>6</sub>Mn,还有 Al、Fe、Si、Mn 元素构成的亚稳相,但是含量较少,在 XRD 谱中无法分辨。

图 4 为打印态 2319 铝合金的 TEM 像。从图 4a 和 b 可以看出,晶界处存在 2 种形式的亚结构:一种是由大量位错形成的不规则亚晶界;另一种是较平直的晶界。同时,晶粒内还存在大量的位错。晶粒为近似等轴的多边形状,平均晶粒尺寸小于 10 μm;晶粒内存在大量的细小弥散相。图 4c 为高倍下的弥散相形貌,为近似等轴的块状结构。如图 4d 所示,基体中还存在少量比较粗大的“棒骨”状析出相,轴向尺寸 1~5 μm,径向尺寸 0.5~1 μm,是铝合金中的杂质相。图 4d 中的插图 of 杂质相的 EDS 分析结果,表明该相主要元素为 Al、Fe、Si、Mn。

图 5 为样品经 T6 处理后的 TEM 像。从图 5a 可以看出,T6 处理后,晶粒尺寸与热处理前相比变化

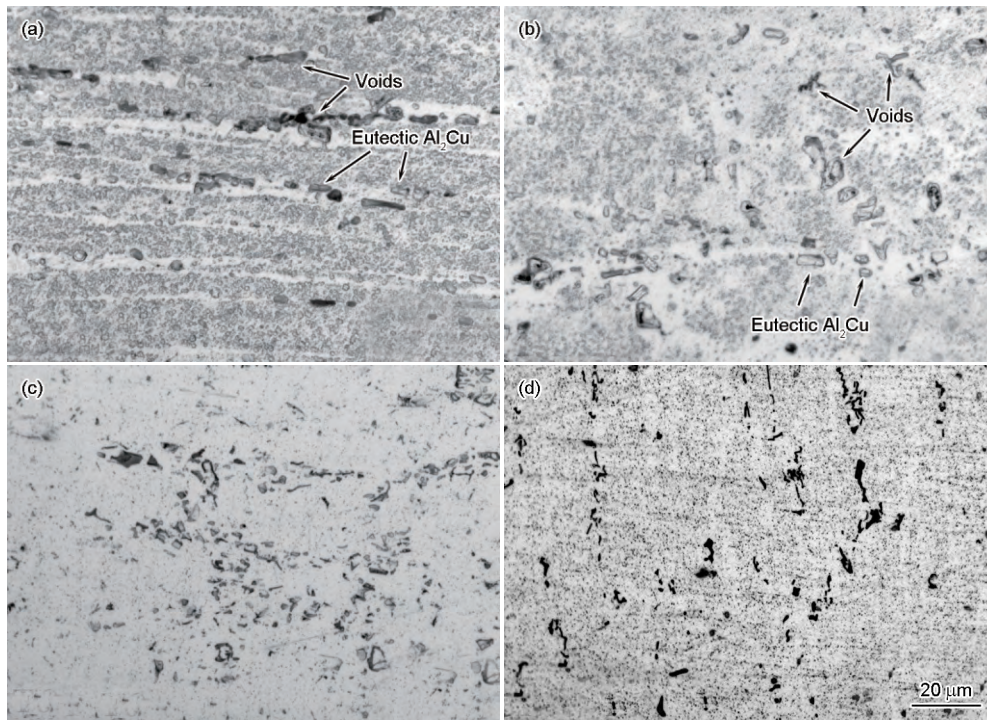


图2 打印态与T6态2319铝合金在长度和高度方向的OM像

Fig.2 OM images of as-printed (a, b) and T6 treated (c, d) 2319Al samples at X (a, c) and Z (b, d) directions

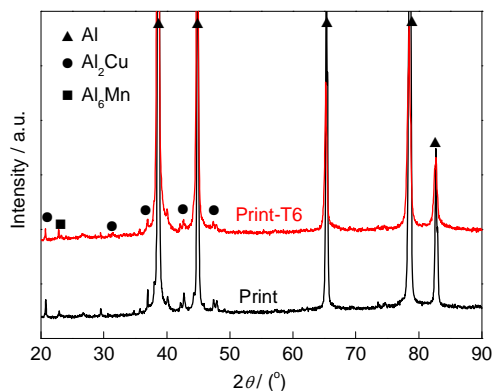


图3 打印态与T6态2319铝合金的XRD谱

Fig.3 XRD spectra of as-printed and T6 treated 2319Al samples

不大,但晶界形貌发生明显变化,原来由大量位错形成的不规则晶界消失,晶界清晰、平直、干净,为典型的三叉晶界。晶粒内的位错密度较低,分布着大量弥散分布的沉淀析出相。从图5b可以看出,基体中沉淀相的分布较为均匀,为颗粒状结构,其尺寸小于200 nm,应为 $\theta''$ ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ )相。对于Al-Cu合金,固溶后时效的脱溶序列为G.P.区 $\rightarrow\theta''$ ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) $\rightarrow\theta'$ ( $\text{Cu}_2\text{Al}_{3.6}$ ) $\rightarrow\theta$ ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ),当 $\theta'$ 相形成之前强化效果最佳。因为 $\theta''$ ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ )相的取向与母相( $\alpha$ )平行( $\{001\}_{\theta''}/\{001\}_{\alpha}$ ),成共格界面,在界面区域形成很大的点阵畸变,从而强化合金<sup>[31]</sup>。

固溶处理后, $\text{Al}_2\text{Cu}$ 经历了固溶和再析出,形貌

发生了变化,尺寸也变的细小。从图5c和d可以看到,因为成分偏析存在的粗大相并未完全溶解(EDS分析主要元素为Al、Fe、Si、Mn,图5c中插图)。这种粗大相主要分布在晶内,少量分布在晶界处,经过T6处理之后粗大相减少,而在粗大相周围无弥散析出相。形成这种粗大相的原因是由于固溶过程不充分,元素的扩散不充分所致。

对比图4和5,在沉积态2319铝合金样品中可以明显观察到的灰色棒状相为 $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,因为观察位置不同,也可以显示为圆形颗粒,分布比较杂乱,无明显规律。在T6态2319铝合金样品中析出相更加细小、均匀,对位错起到很好的阻碍作用,所以强化效果提高。

## 2.2 孔洞缺陷

对于增材制造来说,快速成形过程中极易生成孔洞类缺陷,其尺寸与分布将影响打印件的力学性能。图6为打印态与T6态2319铝合金在长度和高度方向上的孔洞分布情况。从图6a和b中的打印态样品可以看出,长度、高度方向孔洞尺寸基本相当,高倍下可见孔洞呈不规则的长条状形貌,尺寸约为5~15  $\mu\text{m}$ (图6a中插图)。如图6c和d所示,经T6处理后,孔洞的数量有了一定程度的增加,这是由于一部分粗大 $\text{Al}_2\text{Cu}$ 颗粒与杂质相经溶解扩散到基体合金中所致。统计结果表明,打印态2319铝合金在长度和高度方向上

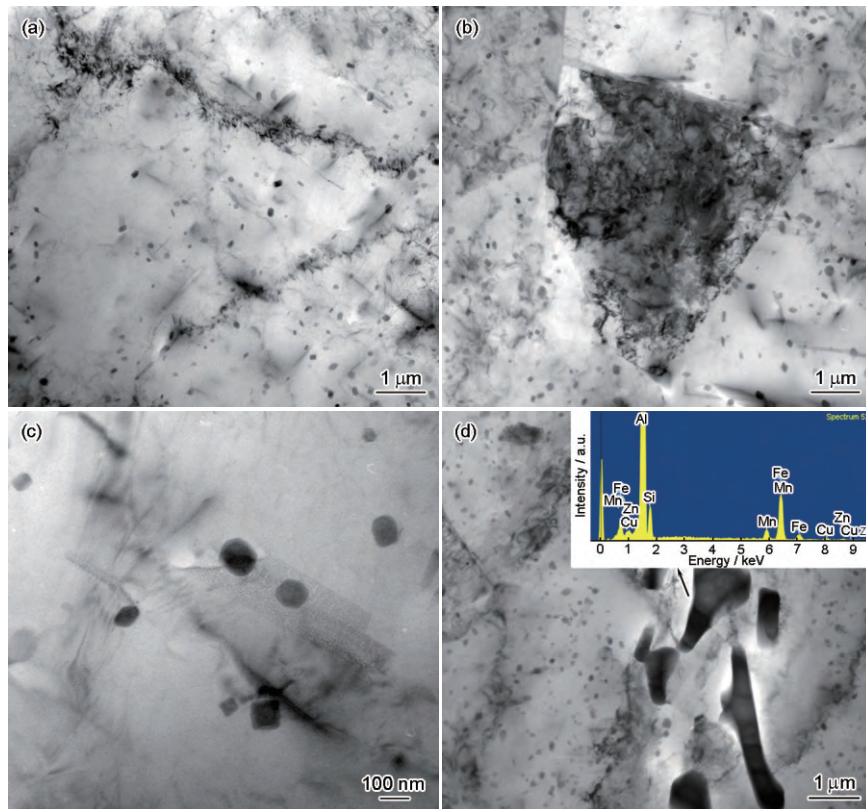


图4 打印态 2319 铝合金的 TEM 像

Fig.4 TEM images of as-printed 2319Al samples

- (a) subgrain boundaries formed by dislocations      (b) straight grain boundaries  
(c) morphology of dispersed phases      (d) coarse impurity phases (Inset shows the EDS)

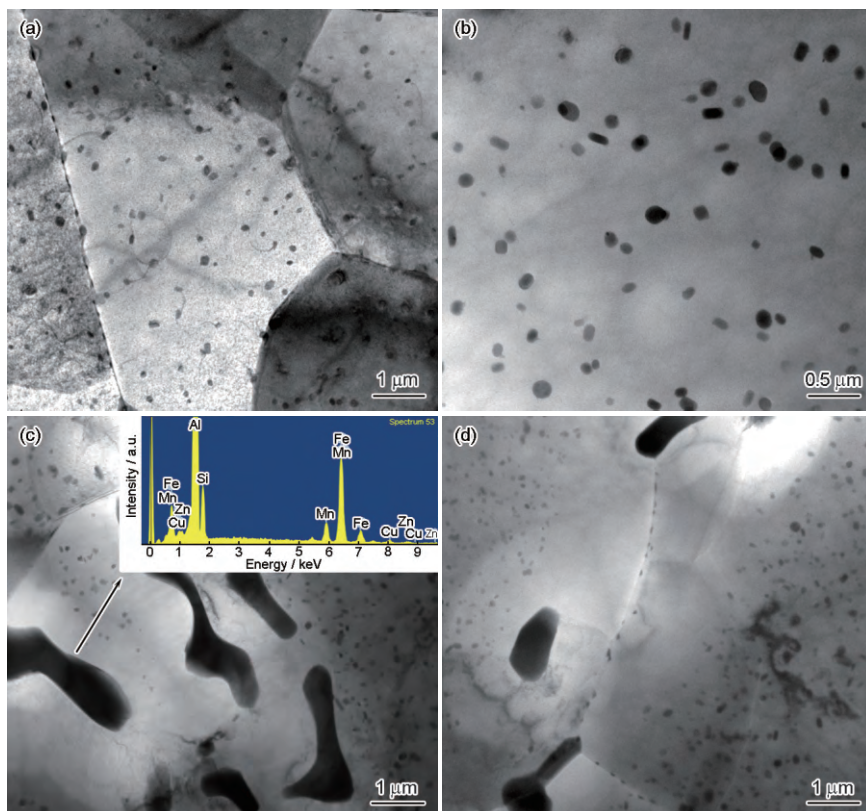


图5 T6 态 2319 铝合金的 TEM 像

Fig.5 TEM images of T6 treated 2319Al samples

- (a) triple grain boundary junction and grain morphology      (b) distribution of precipitated  $\theta'$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ )  
(c) coarse impurity phases in grains (Inset shows the EDS)      (d) coarse impurity phases on grain boundaries

的孔洞数量分别为 94 和  $31 \text{ mm}^{-2}$ , T6 态为 206 和  $94 \text{ mm}^{-2}$ 。可以看出, 打印态 2319 铝合金长度方向的孔洞数量远高于高度方向, 约为后者的 3 倍; 热处理后 2 个方向的孔洞数量都明显增加, 约为热处理前的 2~3 倍。表 1 所示为原始 2319 丝材与打印

态、T6 态块体样品的密度与致密度。可以看到, 打印态材料的致密度达到丝材的 99.3%, 经 T6 处理后, 略有下降约为 98.6%。

### 2.3 力学性能

表 2 所示为打印态与 T6 态 2319 铝合金在不同

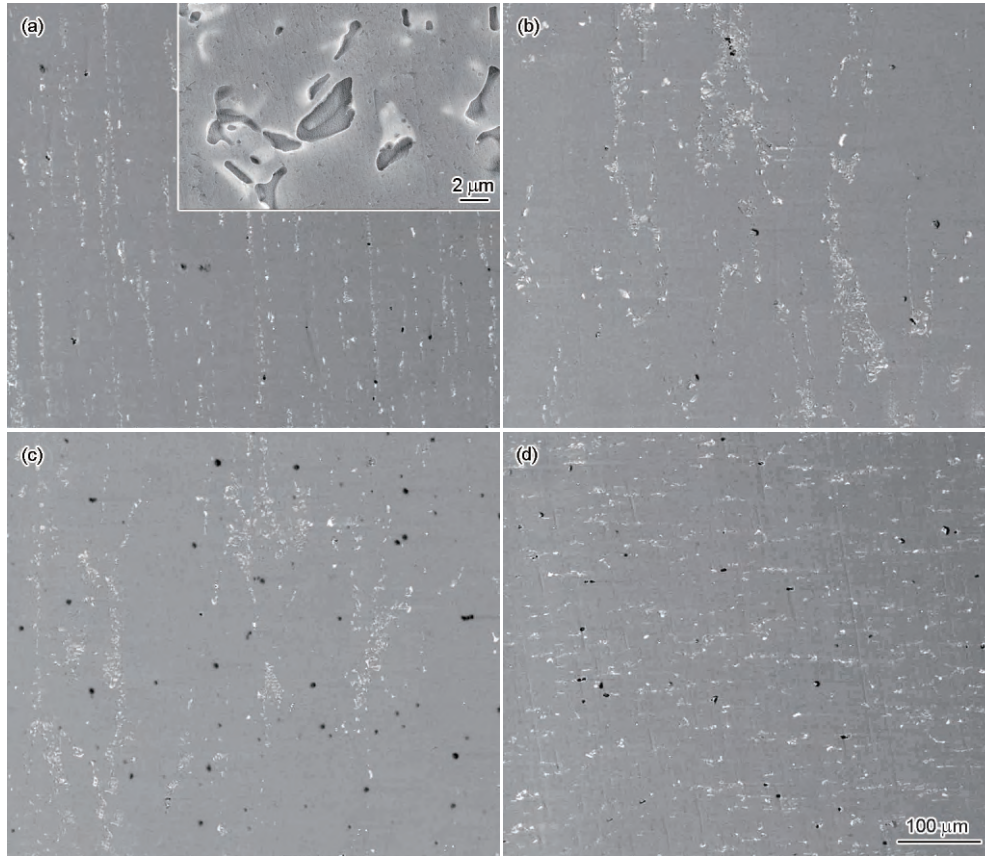


图 6 打印态与 T6 态 2319 铝合金在长度和高度上的孔洞分布

Fig.6 Distributions of pores in as-printed (a, b) and T6 treated (c, d) 2319Al samples at X (a, c) and Z (b, d) directions (Inset in Fig.6a shows typical morphology of pores)

表 1 原始 2319 丝材与打印态、T6 态块体样品的密度与致密度

Table 1 Densities and relative densities of raw 2319 wire, as-printed and T6 treated bulk samples

Sample	Density / ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Relative density / %
Wire	2.814	100.0
As-printed	2.794	99.3
T6 treated	2.776	98.6

表 2 打印态与 T6 态 2319 铝合金在不同方向的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of as-printed and T6 treated 2319Al samples at different directions

Sample	Direction	Ultimate tensile strength / MPa	Elongation / %
As-printed	X	$161\pm 7$	$1.0\pm 0.17$
	Y	$174\pm 8$	$2.5\pm 0.26$
	Z	$167\pm 8$	$1.0\pm 0.09$
T6 heat-treated	X	$423\pm 21$	$2.7\pm 0.55$
	Y	$495\pm 10$	$4.9\pm 0.11$
	Z	$421\pm 20$	$2.7\pm 0.18$

方向上的拉伸性能。打印态样品在长、宽、高3个方向的拉伸强度分别约为161、174和167 MPa。经T6处理后,样品的拉伸性能显著提升,3个方向的拉伸强度分别约为423、495和421 MPa。这是由于沉淀强化起了主导作用,从而使样品的力学性能显著提高。同时,T6处理后,长、宽、高3个方向的延伸率也有所提升,分别由约1.0%、2.5%、1.0%提升到约2.7%、4.9%、2.7%。

图7为打印态与T6态2319铝合金在宽度与高度方向的拉伸断口形貌。从宏观形貌(图7a、c、e和g)上看,所有样品表现出脆性断裂特征,断口与拉伸方向呈90°夹角,断口平整,没有明显的颈缩现象,类似于铸造铝合金的断口形貌。从微观形貌(图7b、d、f和h)上看,断口上具有一些韧窝与撕裂棱,同时在微区上显示出明显的准解理断裂特征;热处理后微观形貌上的撕裂棱与解理面减少,并且韧窝数量有

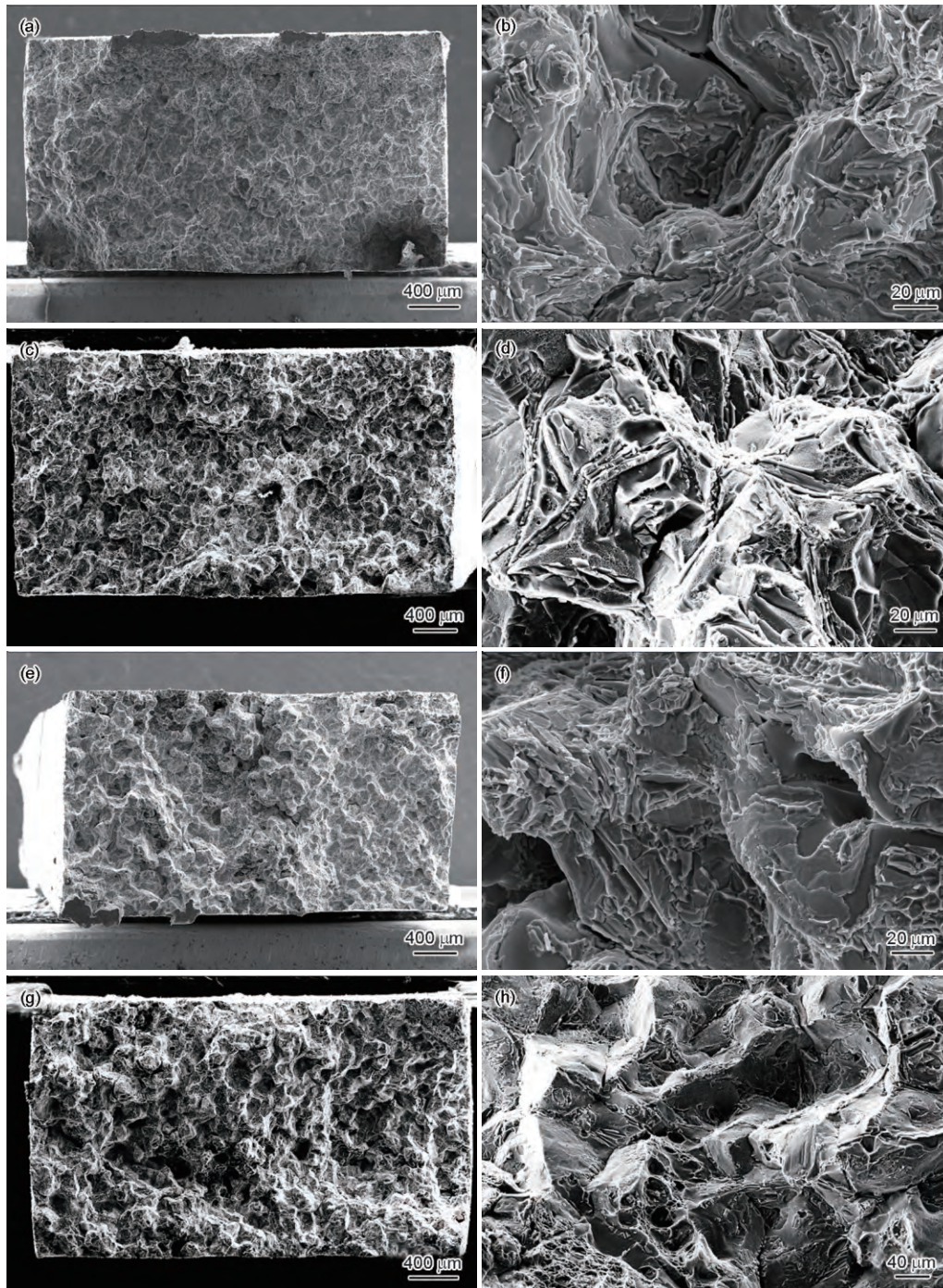


图7 打印态与T6态2319铝合金在宽度和高度方向的拉伸断口形貌

Fig.7 Low (a, c, e, g) and high (b, d, f, h) magnified SEM fracture surfaces images of as-printed and T6 treated 2319Al samples at different directions

(a, b) as-print, Y direction

(c, d) T6 treated, Y direction

(e, f) as-print, Z direction

(g, h) T6 treated, Z direction

所增加,深度也有明显增加。韧窝比较细小,与第二相和夹杂物的溶解与细化有关<sup>[28]</sup>。

### 3 分析讨论

#### 3.1 微观组织

作为一种增材制造技术,电子束熔丝沉积快速成形过程中,金属丝在熔池中熔化,熔池在快速移动过程中不断凝固,实现金属层沉积,这种特殊的凝固方式会导致与常规凝固状态不同的微观组织,即微观组织上产生方向性(图2a和b),从而引起力学性能的各向异性。需要指出的是,本工作中的晶粒为近似等轴的多边形状,平均晶粒尺寸小于10  $\mu\text{m}$ (图4a和b、图5a),这与Domack等<sup>[25]</sup>报道的EBF<sup>3</sup>制备的2219/2319铝合金差别很大,他们的研究发现2种类型的晶粒组织:一种是占大多数的尺寸为100~200  $\mu\text{m}$ 的不规则粗大晶粒;另一种是分布于打印层与层之间的尺寸为10~25  $\mu\text{m}$ 的等轴状晶粒。这种差别可能是源于不同的打印工艺。孙汝剑等<sup>[32]</sup>研究表明,电弧增材2319铝合金微观组织中的晶粒尺寸约69  $\mu\text{m}$ ,经激光冲击强化后细化至34  $\mu\text{m}$ 。与之相比,本工作中的晶粒尺寸更加细小,这是由于电子束热源的能量更集中、成形速率更快产生的效果。

Brice等<sup>[29]</sup>研究了电子束打印2139铝合金的沉淀相变化,发现Mg元素在打印过程中发生蒸发,而Mg又是控制合金机械性能的关键,所以通过加入额外的Mg元素来抵消Mg蒸发造成的损失,结果表明添加了一定量的Mg之后峰值硬度可以与T8态的锻造2139铝合金相当。本工作中,由于所选用的ER2319丝材中的Mg含量非常低(<0.02%),因此无法考察Mg元素的变化。与焊接过程类似,电子束熔丝沉积快速成形过程中熔池的冷却速率要远高于常规铸造过程,因此熔池的冷却速率将会显著影响材料的微观组织与力学性能。Tomus等<sup>[33]</sup>对电子束打印Al-2Sc合金的沉淀强化进行研究,发现电子束打印过程中Al-2Sc合金的硬度比利用传统的固溶时效方法要高,这是因为电子束熔丝沉积较快的冷却速率会增加Sc在 $\alpha(\text{Al})$ 中的溶解度,可以达到常规溶解度的2倍,从而为后续沉淀强化提供了条件。Brice和Dennis<sup>[34]</sup>通过研究二次枝晶臂间距分析了电子束增材制造2219铝合金中熔池的冷却速率,发现冷却速率受基板温度等热边界条件影响较大,可在5~350 K/s的范围内变化,而过快的冷却速率可使凝固过程严重偏离微观组织平衡。本工作中,打印态2319铝合金微观组织沿打印方向呈明显的条带状分布,正是由于冷却速率过快导致元素来不及充分扩散从而产生成分偏析所形成的(图2a和b)。

这种组织上的不均匀性可以通过后续的热处理工艺进行改善(图2c和d)。

在打印过程中,如果参数选择不当,将会产生大量的孔洞缺陷(图6)。铝合金中的孔洞主要是未溶解的 $\text{H}_2$ 所形成的,这是由于液相和固相溶解度的差异较大所致<sup>[35]</sup>。而增材制造与单道焊的主要区别就是沉积的金属为多层,由于冷却速率过快,层与层之间结合不紧密将会引起孔洞形成。另外,后一层堆叠的热输入会对前面的堆叠层起到热处理的作用,这也是合金多道次打印时易产生孔洞的原因。在T6态2319铝合金样品中,共晶产物 $\text{Al}_2\text{Cu}$ 在固溶处理时发生溶解,形成新的孔洞<sup>[36]</sup>,导致孔洞数量的增加。

Gu等<sup>[36,37]</sup>利用熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW)作为热源对ER2319合金进行沉积成形,并研究了后续热处理与层间冷加工强化(轧制)对样品的微观组织与力学性能的影响。结果表明,沉积样品中存在一定数量的孔洞,通过对直径大于5  $\mu\text{m}$ 的孔洞进行统计,发现平均直径为13.5  $\mu\text{m}$ ,面积占比为0.176%;经T6处理后,孔洞平均直径为15.5  $\mu\text{m}$ ,面积占比为0.657%。即后续热处理增大了孔洞的含量,特别是直径小于20  $\mu\text{m}$ 的小孔洞含量大幅增加。他们认为,Ostwald熟化与H扩散主导了孔洞的生长,共晶相颗粒的溶解致使新孔洞产生,这与本工作的研究结果一致。而且Gu等<sup>[37]</sup>还发现采用一定压力下的层间轧制可以有效消除沉积样品中的孔洞;后续热处理也没有产生大尺寸的孔洞,但存在一些2~3  $\mu\text{m}$ 的小孔洞。

在时效过程中析出弥散分布的 $\text{Al}_2\text{Cu}$ 相(图5b),其尺寸远小于共晶 $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,这将对基体起到沉淀强化的作用。2319铝合金组织的第二相主要以粒状、针状的 $\theta''(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相为主,粗大相以Al、Fe、Si、Mn元素生成的杂质相为主(图4d、图5c和d)。杂质相形成的原因是因为快速成形时冷却速率过快,元素来不及扩散导致了成分偏析形成了粗大相。热处理前后晶界变化明显,但晶粒尺寸的变化不大(图4a和b、图5a),因此对力学性能的影响不大。

#### 3.2 力学性能

打印态2319铝合金样品3个方向的拉伸强度均较低,但经T6处理后,样品的强度显著提升(表2),这表明尽管T6处理后孔洞增多,但是由于沉淀强化占据主导作用,使强度提高。同时,样品的延伸率也有明显提升,这是由于热处理使得元素分布更加均匀,特别是层与层之间由于元素扩散结合效果更好,因此T6态2319铝合金样品在宽度方向表现出最高



的延伸率。孙进宝等<sup>[38]</sup>的研究也表明, T6 态 2219-T852 铝合金锻件样品在 3 个方向的拉伸强度均优于 AMS4144F-2011 美国标准 2219-T852 铝合金锻件和锻环的性能规范, 但延伸率略低。

与 Taminger 等<sup>[23-26]</sup>报道的 EBF<sup>3</sup> 制备的 2219、2319 铝合金的拉伸强度(约 270 MPa)相比, 本工作中的打印样品的强度较低, 这是由于本工作中的打印态 2319 铝合金中含有大量的粗大第二相, 从而降低了固溶效果。但 T6 热处理后, 样品的拉伸强度比 Taminger 等的数据(约 420 MPa)有所提高, 但延伸率还有很大差距(约 11%)<sup>[23-26]</sup>。与孙进宝等<sup>[38]</sup>报道的稳定化处理 2219-T852 铝合金锻件纵向、横向、高向的强度 409~422 MPa、407~428 MPa、401~415 MPa 相比, 拉伸强度相当; 但与其纵向、横向、高向的延伸率 10.1%~11.4%、6.6%~7.7%、6.9%~8.9% 相比相差较大。这表明, 一方面电子束熔丝沉积快速成形的 2319 块体材料具有良好的强度, 可以达到甚至优于锻件的水平; 另一方面, 打印材料的延伸率偏低, 不利于其工程应用, 是今后需要解决的问题。通过进一步优化打印工艺, 并结合合适的后续热处理工艺, 有望进一步减少孔洞的含量、改善层间结合, 从而使电子束熔丝沉积快速成形技术发展成为制备大尺寸的沉淀强化铝合金构件的可行的工艺路线。

#### 4 结论

(1) 通过选用优化的参数, 利用电子束熔丝沉积的方法制备出尺寸为 150 mm×35 mm×52 mm 的无宏观缺陷的打印件。打印态样品中存在少量的微小孔洞, 尺寸为 5~15 μm, 材料致密度约 99.3%。经 T6 热处理后孔洞含量有所增加, 材料致密度为 98.6%。

(2) 打印态微观组织沿打印方向呈比较明显的条带状, 这些条带状组织主要由一些粗大相和孔洞组成。这种粗大相是由于冷却速率过快, 元素来不及充分扩散导致成分偏析所形成的。粗大相大部分分布在晶内, 少量在晶界, 经 T6 处理后仍有部分未完全溶解。

(3) 打印态 2319 铝合金的平均晶粒尺寸小于 10 μm, 并含有共晶 Al<sub>2</sub>Cu 相、θ''相和少量粗大杂质相。经 T6 热处理后, 共晶 Al<sub>2</sub>Cu 与部分杂质相固溶并重新析出 θ''相, 因此第二相的尺寸变得更加细小, 但仍有部分粗大杂质相存在。

(4) 打印态样品在长、宽、高 3 个方向的拉伸强度分别约为 161、174 和 167 MPa, 经 T6 处理后分别可达约 423、495 和 421 MPa。同时, 长、宽、高 3 个方向的延伸率分别由约 1.0%、2.5%、1.0% 提高到约 2.7%、4.9%、2.7%。

#### 参 考 文 献

- [1] Gao W, Zhang Y B, Ramanujan D, et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering [J]. *Comput.-Aided Des.*, 2015, 69: 65
- [2] Zeltmann S E, Gupta N, Tsoutsos N G, et al. Manufacturing and security challenges in 3D printing [J]. *JOM*, 2016, 68: 1872
- [3] Bourell D, Kruth J P, Leu M, et al. Materials for additive manufacturing [J]. *CIRP Ann.*, 2017, 66: 659
- [4] Herzog D, Seyda V, Wycisk E, et al. Additive manufacturing of metals [J]. *Acta Mater.*, 2016, 117: 371
- [5] Zhang X J, Tang S Y, Zhao H Y, et al. Research status and key technologies of 3D printing [J]. *J. Mater. Eng.*, 2016, 44(2): 122  
(张学军, 唐思熠, 肇恒跃等. 3D 打印技术研究现状和关键技术 [J]. *材料工程*, 2016, 44(2): 122)
- [6] Yang P H, Gao X X, Liang J, et al. Development trend and NDT progress of metal additive manufacture technique [J]. *J. Mater. Eng.*, 2017, 45(9): 13  
(杨平华, 高祥熙, 梁菁等. 金属增材制造技术发展动向及无损检测研究进展 [J]. *材料工程*, 2017, 45(9): 13)
- [7] Liang J J, Yang Y H, Jin T, et al. Research status of 3D printing technology for metals in space [J]. *Manned Spaceflight*, 2017, 23: 663  
(梁静静, 杨彦红, 金涛等. 金属材料空间 3D 打印技术研究现状 [J]. *载人航天*, 2017, 23: 663)
- [8] Huang D, Zhu Z H, Geng H B, et al. TIG wire and arc additive manufacturing of 5A06 aluminum alloy [J]. *J. Mater. Eng.*, 2017, 45(3): 66  
(黄丹, 朱志华, 耿海滨等. 5A06 铝合金 TIG 丝材-电弧增材制造工艺 [J]. *材料工程*, 2017, 45(3): 66)
- [9] Basak A, Das S. Epitaxy and microstructure evolution in metal additive manufacturing [J]. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 2016, 46: 125
- [10] Zhai Y W, Galarraga H, Lados D A. Microstructure evolution, tensile properties, and fatigue damage mechanisms in Ti-6Al-4V alloys fabricated by two additive manufacturing techniques [J]. *Procedia Eng.*, 2015, 114: 658
- [11] Babu S S, Goodridge R. Additive manufacturing [J]. *Mater. Sci. Technol.*, 2015, 31: 881
- [12] Sames W J, List F A, Pannala S, et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing [J]. *Int. Mater. Rev.*, 2016, 61: 315
- [13] Chen Z Y, Suo H B, Li J W. The forming character of electron beam freeform fabrication [J]. *Aerospace Manuf. Technol.*, 2010, (1): 36  
(陈哲源, 锁红波, 李晋炜. 电子束熔丝沉积快速制造成型技术与组织特征 [J]. *航天制造技术*, 2010, (1): 36)
- [14] Brice C A, Henn D S. Rapid prototyping and freeform fabrication via electron beam welding deposition [A]. *Proceedings of International Institute of Welding Conference* [C]. Copenhagen, Denmark, 2002
- [15] Huang Z T, Gong S L, Suo H B, et al. Microstructure and properties of TC4 titanium alloy manufactured by electron beam rapid manufacturing [J]. *Titanium Ind. Prog.*, 2016, 33(5): 33  
(黄志涛, 巩水利, 锁红波等. 电子束熔丝成形的 TC4 钛合金的组织与性能研究 [J]. *钛工业进展*, 2016, 33(5): 33)
- [16] Yang Y, Suo H B, Chen Z Y, et al. Effect of solution temperature

- on microstructure and mechanical properties of TC17 alloy fabricated by electron beam wire deposition [J]. *Heat Treat. Met.*, 2016, 41(9): 141  
(杨洋, 锁红波, 陈哲源等. 固溶温度对电子束熔丝成形 TC17 合金组织与性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2016, 41(9): 141)
- [17] Brandl E, Michailov V, Viehweger B, et al. Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire, part I: Microstructural properties of single beads [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2011, 206: 1120
- [18] Bush R W, Brice C A. Elevated temperature characterization of electron beam freeform fabricated Ti-6Al-4V and dispersion strengthened Ti-8Al-1Er [J]. *Mater. Sci. Eng.*, 2012, A554: 12
- [19] Read N, Wang W, Essa K, et al. Selective laser melting of Al-Si10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development [J]. *Mater. Des.*, 2015, 65: 417
- [20] Brandl E, Heckenberger U, Holzinger V, et al. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior [J]. *Mater. Des.*, 2012, 34: 159
- [21] Krishnan M, Atzeni E, Canali R, et al. On the effect of process parameters on properties of AlSi10Mg parts produced by DMLS [J]. *Rapid Prototyping J.*, 2014, 20: 449.
- [22] Yang Z Y, Zhao J Y. *Additive Manufacturing and 3D Print Technology & Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 1  
(杨占尧, 赵敬云. 增材制造与 3D 打印技术及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 1)
- [23] Taminger K M B, Hafley R A. Characterization of 2219 aluminum produced by electron beam freeform fabrication [A]. *Proceedings of the 13th Solid Freeform Fabrication Symposium* [C]. Austin, TX: NASA, 2002: 482
- [24] Taminger K M B, Hafley R A. Electron beam freeform fabrication: A rapid metal deposition process [A]. *Proceedings of the 3rd Annual Automotive Composites Conference* [C]. Troy, Michigan: NASA, 2003: 1
- [25] Domack M S, Taminger K M B, Begley M. Metallurgical mechanisms controlling mechanical properties of aluminium alloy 2219 produced by electron beam freeform fabrication [J]. *Mater. Sci. Forum*, 2006, 519-521: 1291
- [26] Taminger K M, Hafley R A. Electron beam freeform fabrication for cost effective near-net shape manufacturing [A]. *NATO/RTO AVT-139 Specialists' Meeting on Cost Effective Manufacture via Net Shape Processing* [C]. Amsterdam: NASA, 2006: 1
- [27] Taminger K M, Hafley R A, Domack M S. Evolution and control of 2219 aluminium microstructural features through electron beam freeform fabrication [J]. *Mater. Sci. Forum*, 2006, 519-521: 1297
- [28] Cai Y. Research on the microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy sheet during stretch forming [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012  
(蔡洋. 2219 铝合金板材拉形过程微观组织和力学性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012)
- [29] Brice C, Shenoy R, Kral M, et al. Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing [J]. *Mater. Sci. Eng.*, 2015, A648: 9
- [30] Wan S X. The effects of hot extrusion and aging process on the microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016  
(万升祥. 热挤压时效工艺对 2219 铝合金微观组织及力学性能的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016)
- [31] Cui Z Q, Liu B X. *Metallurgy and Heat Treatment Theory* [M]. 3rd Ed., Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007: 1  
(崔忠圻, 刘北兴. 金属学与热处理原理 [M]. 第 3 版, 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 1)
- [32] Sun R J, Zhu Y, Li L H, et al. Effect of laser shock peening on microstructure and residual stress of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2018, 55: 011412  
(孙汝剑, 朱颖, 李刘合等. 激光冲击强化对电弧增材 2319 铝合金微观组织及残余应力的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55: 011412)
- [33] Tomus D, Qian M, Brice C A, et al. Electron beam processing of Al-2Sc alloy for enhanced precipitation hardening [J]. *Scr. Mater.*, 2010, 63: 151
- [34] Brice C A, Dennis N. Cooling rate determination in additively manufactured aluminum alloy 2219 [J]. *Metall. Mater. Soc. Trans.*, 2015, 46A: 2304
- [35] Cong B Q, Ding J L, Williams S. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2015, 76: 1595
- [36] Gu J L, Ding J L, Williams S W, et al. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy [J]. *Mater. Sci. Eng.*, 2016, A651: 18
- [37] Gu J L, Ding J L, Williams S W, et al. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2016, 230: 26
- [38] Sun J B, Wang S H, Sun G, et al. Microstructures and mechanical properties of 2219-T852 aluminum alloy forgings [J]. *Heat Treat. Met.*, 2017, 42(2): 83  
(孙进宝, 王少华, 孙刚等. 2219-T852 铝合金锻件的显微组织与力学性能 [J]. *金属热处理*, 2017, 42(2): 83)

(责任编辑:肖素红)