DOI: 10.3901/JME.2021.09.167

选区激光熔化工艺参数对燃料电池 316L 不锈钢双极板性能的影响^{*}

林开杰^{1,2} 董伟菴^{1,2} 顾冬冬^{1,2} 全景峰^{1,2} 乔竞驰^{1,2} 王超超^{1,2}

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院 南京 210016;

2. 南京航空航天大学江苏省高性能金属构件激光增材制造工程实验室 南京 210016)

摘要: 316L 不锈钢材料具有耐蚀性好、成形性好、成本低等优点,在燃料电池金属双极板领域有着良好的应用前景。基于传统等材、减材加工方法难以成形复杂结构燃料电池双极板的瓶颈,使用选区激光熔化技术可实现复杂结构 316L 不锈钢双极板的成形制造。针对燃料电池不锈钢金属双极板的应用背景,系统研究了不同激光工艺参数(激光功率、激光扫描速度)对所成形 316L 不锈钢材料微观组织及双极板所需耐蚀性和表面接触电阻的影响,并对比了传统锻造 316L 不锈钢与选区激光熔化 316L 不锈钢在显微组织和性能上的差异。结果表明,选区激光熔化成形 316L 不锈钢的致密度随着激光功率的增大而增大,随着扫描速度的增大而减少,并在激光功率为 300 W,扫描速度为 1 500~2 000 mm/s 时达到最大值。相比于具有等轴晶特征的锻造不锈钢试样,选区激光熔化成形不锈钢试样柱状晶组织有利于降低晶界对电流的阻碍作用,从而降低了表面接触电阻;同时,随着样品表面粗糙度的提高,选区激光熔化成形不锈钢试样的表面接触电阻降低。致密度高的选区激光熔化成形不锈钢试样的耐蚀性优于锻造成形不锈钢试样,且随着致密度的减小,选区激光熔化成形试样的耐蚀性逐渐降低。本研究结果表明选区激光熔化成形 316L 不锈钢材料可用于燃料电池金属双极板。

关键词: 选区激光熔化; 316L 不锈钢; 燃料电池; 金属双极板

中图分类号: V261

Effect of Laser Powder Bed Fusion Process Parameters on Performance of 316L Stainless Steel Bipolar Plates

LIN Kaijie^{1,2} DONG Weisong^{1,2} GU Dongdong^{1,2} QUAN Jingfeng^{1,2}
QIAO Jingchi^{1,2} WANG Chaochao^{1,2}

(1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016;

2. Jiangsu Provincial Engineering Laboratory for Laser Additive Manufacturing of High-Performance Metallic Components, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: Due to the advantages of high corrosion resistance, good formability and low cost, 316L stainless steel exhibits great potential in the application of fuel cell bipolar plates. However, retarded by the forming capability of traditional manufacturing methods, it is difficult to fabricate bipolar plates with complex flow-field structures. Therefore, laser powder bed fusion (LPBF) has been employed to fabricate 316L stainless steel bipolar plate, and the influence of laser parameters (laser power and laser scanning speed) on the microstructure, corrosion resistance and interfacial contact resistance (ICR) of LPDFed 316L stainless steel are systematically studied. Besides that, the differences in microstructures and performance between wrought 316L stainless steel and

^{*} 国家自然科学基金(51905269、51735005)、国防基础科研计划(JCKY2020605C007)、航空科学基金(2020Z049052001)、江苏省自然科学基金(BK20170787)、(BRA20190481)、江苏省第十五批“六大人才高峰”创新人才团队(TD-GDZB-001)、2017 年度江苏省高校优秀科技创新团队、国家自然科学基金创新研究群体(51921003)资助项目。20201008 收到初稿,20210310 收到修改稿

LPDFed 316L stainless steel are compared. The results show that with the increase of laser power or decrease of scanning speed, the density of the LPDFed 316L stainless steel specimens decreased. When the laser power is 300 W, and the scanning speed ranged from 1 500 mm/s to 2 000 mm/s, specimens with densities higher than 99% can be achieved. Compared with the wrought stainless-steel specimens with the microstructures of equiaxed grains, the columnar crystal structures of the LPDFed counterparts facilitated the flow of electron, thus contributing to the reduction of ICR value. In addition, the ICR value of LPDFed 316L stainless steel specimens decreased with the increase of the surface roughness. The results of electro-chemical tests show that the corrosion resistance of LPDFed 316L stainless steel specimens with high relative density was better than that of wrought counterparts. And the corrosion resistance of LPDFed 316L stainless steel specimens gradually deteriorated with the decrease of relative density. Our results revealed that LPBF method can be utilized to fabricate 316L stainless steel bipolar plates for the fuel cell application.

Key words: laser powder bed fusion; 316L stainless steel; fuel cell; metal bipolar plate

0 前言

近年来,增材制造(Additive manufacturing, AM)技术逐渐成为材料成形及加工领域的研究热点,研究人员针对不同应用领域的需求开展了大量相关研究,极大地丰富了增材制造技术的基础理论和材料体系^[1-2]。相对于传统的减材制造(机加工等)和等材制造(铸造、锻造等),增材制造技术具有材料利用率高、加工周期短、无需模具、能制造复杂结构等诸多优点。因此,增材制造技术被广泛地用于航空航天、医疗、汽车等领域^[3-5]。相对于以上领域,增材制造技术在能源的储存和转化领域同样展现出了巨大的应用潜力。增材制造技术能够成形出具有高比面积的复杂结构,从而提高能源储存和转化设备的能量密度及能量转换效率以满足人们对高性能能源储存和转化设备的需求。例如,增材制造三维立体结构电极的锂离子电池和超级电容器具有相比于传统二维平面电极更大的表面积和更优越的电池性能^[6]。近年来,研究人员已经利用增材制造技术成功制备了包括锂电池、燃料电池、太阳能电池、超级电容器和风能等多种能源装置中众多关键元件,并表现出更为优异的性能^[7-9]。

质子交换膜燃料电池(Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)是一种无需经过卡诺循环、直接将化学能转化为电能的装置。因此,PEMFC具有无污染、低噪声、能量转换效率高等优点。双极板作为 PEMFC 的关键零件,其主要功能为支撑燃料电池组、传导电流等^[10]。316L 不锈钢双极板相对于石墨双极板和复合材料双极板,具有成本低、耐腐蚀性好、成形性好等优点,吸引了大量研究人员的关注^[11]。双极板表面的流道场结构的主要功能是使反应气体均匀分布、并及时排除反应生成产物,流道场结构的优劣直接影响着燃料电池的性能。金属双极板表面流道场结构的传统成形方法为机加

工、冲压和铸造^[12],以上方法难以成形具有复杂结构和复杂截面的双极板流道场,极大限制了通过流道结构优化实现燃料电池性能提升的技术途径^[13]。

目前,利用选区激光熔化技术成形金属双极板已有初步的研究。ARENAS 等^[14]利用选区激光熔化技术成功制备了三维多孔镍/不锈钢电极,并测试了其电化学性能。结果表明,相对于传统平面电极和网状电极,多孔电极展现出更强传质特性。YANG 等^[15]利用选区激光熔化技术成功实现气体扩散层、双极板、垫片和集流板的一体化成形制造。结果表明,一体化的结构不但成功地降低了电池的重量、缩小了电池的体积还提高了产氢率。SCOTTI 等^[16]利用选区激光熔化技术成功制备具有不同结构的封闭流道,结果表明封闭流道的功率密度是传统开放式流道的 1.53 倍。从目前的研究可知,激光增材制造成形金属双极板能够实现高性能流道场的成形,并实现构件的一体化、轻量化设计。但是,目前的研究大多集中在不同双极板结构对燃料电池性能的影响,对激光增材制造成形金属双极板材料的燃料电池性能研究较少。

本研究以选区激光熔化技术为成形手段,研究了不同激光工艺参数对所成形的 316L 不锈钢材料显微组织、相组成及表面粗糙度的影响;结合燃料电池应用背景,评价不同激光工艺参数对所成形 316L 不锈钢表面接触电阻及模拟燃料电池工作环境下耐蚀性的影响规律;最后,结合显微组织表征及燃料电池性能,提出面向燃料电池不锈钢双极板应用的选区激光熔化工艺优化方法。

1 试验材料及方法

1.1 样品制备

本研究中使用的气雾化球形 316L 粉末由 Powder Alloy 公司提供,粉末的平均粒径为 30 μm ,如图 1 所示。粉末的主要合金元素的质量分数为:

Ni 10.4%、Cr 16.8%、Mo 2.0%、Mn 1.4%、Si 0.2% 和 C 0.01%。本研究中使用的选区激光熔化成形设备由本单位自主研发, 设备详细参数见^[17]。所成形块体样品的尺寸为 10 mm × 10 mm × 5 mm。激光功率变化范围从 250 W 到 350 W, 扫描速度变化范围从 1 500 mm/s 到 3 000 mm/s, 铺粉层厚度设定为 30 μm, 扫描间距设定为 50 μm, 采用分区岛状扫描策略, 层间偏转 90°。从系列试样中挑选出三个具有代表性显微组织的试样进行深入的显微组织及性能分析, 三个样品的具体成形参数如表 1 所示。为了评价选区激光熔化成形 316L 不锈钢的性能, 本研究选用传统锻造工艺成形的 316L 不锈钢作为对照。

(a) SEM图片

(b) 粒径分布图

图 1 316L 不锈钢粉末 SEM 图片和粒径分布图

表 1 用于显微组织分析及性能表征样品的激光成形工艺参数

样品编号	扫描速度/ (mm/s)	激光功率 /W	层厚 /μm	扫描间距 /μm
LPBF-1	1 500			
LPBF-2	2 000	300	30	50
LPBF-3	3 000			

1.2 材料表征

本研究采用阿基米德排水法测量试样的致密

度。316L 不锈钢的理论密度取 7.98 g/cm³, 每个样品测三次后取平均值。用于显微组织表征的样品首先用 200 #、400 #、800 #和 1200 #的砂纸预磨, 然后用金刚石悬浮液进行抛光。采用成分为 50% HNO₃、25% HCl 和 25% H₂O 的腐蚀液腐蚀样品, 最后使用光镜(OM, Olympus PMG3)和扫描电子显微镜(SEM, Tescan LYRA3)观察样品的显微组织。使用共聚焦激光扫描显微镜(CLSM, Zeiss LSM 700)观察样品的表面三维形貌并测定表面粗糙度。使用 X 射线衍射仪(XRD, RIGAKU XD-3A)表征样品的相组成, 扫描速度为 3°/min。

1.3 性能测试

使用电化学站(CH Instruments Ins, CHI760E), 以饱和甘汞电极作为参比电极、铂电极作为对电极, 通过动电位极化曲线表征试样的耐蚀性。为了模拟质子交换膜燃料电池的工作环境, 腐蚀介质为 0.5 mol/L H₂SO₄ 和 2 ppm HF(1 ppm=10⁻⁶)组成的溶液。在动电位极化测试中, 扫描速度设定为 1 mV/s, 起始电压和终止电压分别设置为-0.6 V 和 1.2 V。

表面接触电阻采用文献^[18]所描述的方法进行测定。首先, 为了尽可能地避免非测试面粗糙度对测试结果的影响, 将试样的下表面(非测试面)按照相同的金相制备过程进行打磨, 而试样上表面(测试面)不做任何处理; 然后, 将在乙醇中超声清洗后的试样放置于两片碳纸的中间, 分别于两片碳纸的外侧放置两块表面镀金的铜板, 铜板连接电阻测量仪; 最后, 将两块硬质塑料厚板分别置于铜板及万能测试机压头之间。利用万能试验机对表面电阻测量单元进行加载, 加载速度设定为 1 N/s, 达到最大载荷 140 N 时保持载荷不变, 待电阻测量仪上数值稳定后记录读数, 每个试样测试 3 次后取平均值用于计算表面电阻值。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织形貌和相组成

图 2a 为不同激光工艺参数成形试样的抛光未腐蚀光学显微镜照片。通过光镜照片的对比, 可以明显看出激光工艺参数对试样孔隙数量的影响规律, 即: 随着激光扫描速度的提高, 孔隙数量逐渐提高; 随着激光功率的提高, 孔隙数量逐渐降低。利用阿基米德排水法测量不同激光工艺参数成形试样的致密度数值, 并通过致密度云图的方式展示在激光功率及扫描速度共同作用下致密度的变化情况(图 2b)。从致密度云图中可以看出, 试样的致密度

并不是随着扫描速度或激光功率单调变化,而是在激光功率 280~330 W、扫描速度 1 500~2 300 mm/s 的范围内存在一个可获得高致密度($\geq 99\%$)试样的工艺参数窗口。当激光能量密度较低时(低功率高扫描速度),316L 不锈钢粉末未能充分熔化,且熔体温度较低黏度较高,导致液态金属流动性不佳、容易形成如图 2a 中 250 W、3 000 mm/s 试样的大尺寸不规则未熔孔隙。随着能量输入的提高(激光功率提高、扫描速度降低),不锈钢粉末熔化更加充分,熔体温度提高、黏度下降、流动性提高,使得未熔孔隙数量和尺寸降低、致密度提高(300 W、2 000 mm/s)。但是,当能量输入过高时(高功率低扫描速度),液态熔体中马兰戈尼流加剧、熔池稳定性下降,导致小尺寸较规则气孔的产生(350 W、1 500 mm/s),致使致密度降低。基于致密度结果,选取致密度为 98.9% 的 LPBF-1、99.2% 的 LPBF-2 及 95.8% 的 LPBF-3 试样进行进一步的显微组织分析及性能表征。

图 2 不同激光功率和扫描速度成形试样抛光未腐蚀的光镜图和成形试样的致密度云图

对锻造试样及三个典型 SLM 成形试样(LPBF-1、LPBF-2 及 LPBF-3)的三个截面($x-y$ 、 $y-z$ 、 $x-z$)均进行了金相腐蚀,并对拍摄得到的光镜照片进

行了重构,得到如图 3 所示的三维金相组织图。传统锻造加工试样的显微组织呈等轴状,且在 $y-z$ 面及 $x-z$ 面存在因锻造工艺产生的明显条带状组织(图 3a),该带状组织走向与 $x-y$ 面平行,带间距约为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。选区激光熔化成形不锈钢呈现出与锻造不锈钢截然不同的显微组织:试样的 $y-z$ 面由鱼鳞状熔池组织构成,“鱼鳞”的宽度约 $100\text{ }\mu\text{m}$ 、深度约 $50\text{ }\mu\text{m}$;在 $y-z$ 面上可以观察到许多沿成形方向生长的柱状晶组织,且柱状晶贯穿多层熔池;在 $x-z$ 面上可以观察到明显带状组织,该组织为平行与激光扫描方向的熔道;在 $x-y$ 面同样也能观察到带状的熔道形貌,但是熔道的形貌不规则,此外在该面上可以观察到不规则形状的晶粒。

图 3 三维金相组织光镜照片

图 4 所示是样品腐蚀后的 SEM 图。由图所示,锻造不锈钢的晶粒呈多边形,晶界多为直线,且晶粒内部的亚结构不明显,晶粒尺寸在 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右。在选区激光熔化成形试样的低倍 SEM 照片中,可以观察到明显的熔道边界,且随着扫描速度的提高,熔道的不规则程度提高。这是由于扫描速度的增大导致熔池内部熔体不稳定性加剧,熔体难以均匀的铺展,使得熔道形貌变得不规则^[19]。在高倍 SEM 照片中,选区激光熔化成形不锈钢的晶粒形状不规则,晶界多为曲线,且晶粒尺寸变化较大。此外,

在晶粒内部可以观察到密集排布的、尺寸为 700~1 000 nm 的亚晶结构。此类亚晶结构为选区激光熔化成形不锈钢特有的组织结构,是 316L 不锈钢的元素组成以及熔池内部温度梯度和冷却速度共同作用的结果^[20]。

图 4 样品的低倍及高倍 SEM 图

图 5 为锻造及选区激光熔化成形不锈钢试样的 XRD 谱图,由图可见锻造不锈钢和 LPBF 不锈钢的物相均为奥氏体。将锻造样品和 LPBF 样品的 2θ 角与标准 PDF 卡片进行对比,可以发现其都存在一定程度的晶格畸变。而 LPBF-3 样品的畸变程度最大,这是因为扫描速度越快,熔池尺寸越小,冷却速度越快,材料内部热应力越大^[20],导致晶格畸变越严重。对比试样的半高宽值可以发现,选区激光熔化成形试样的半高宽值均大于锻造试样。这说明通过选区激光熔化成形试样的晶粒尺寸小于锻造试样,此结论与文献[21]报道一致。选区激光熔化成形过程中的冷却速度为 $10^3 \sim 10^8$ K/s^[22]远大于锻造的冷却速度,从而细化了晶粒。在选区激光熔化成形试样中,LPBF-2 试样的半高宽的值最大,这说明该试样具有最小的晶粒尺寸,其原因可能是 LPBF-2 试

样熔池的过冷度使得晶核的形成速率大于晶粒长大速率,从而实现晶粒的细化。

(a) X射线衍射谱线

样品编号	$2\theta/(^\circ)$	FWHM/rad
标准	43.583	—
Wrought 316L	43.600	0.372
LPBF-1	43.580	0.392
LPBF-2	43.580	0.405
LPBF-3	43.620	0.392

(b) 最强峰位及其半高宽

图 5 不同试样 X 射线衍射谱线和最强峰位及其半高宽

2.2 表面接触电阻

双极板材料的表面接触电阻对于燃料电池的性能至关重要。表面接触电阻越小,双极板材料消耗的电量越少、输出的电量越高。由文献[23]可知,对于相同的材料,表面粗糙度对接触电阻有较大的影响:通常表面粗糙度越高,相应的表面接触电阻越低;但当粗糙度大于一定数值后,表面接触电阻值趋于稳定。图 6 所示为锻造及选区激光熔化成形不锈钢试样的表面粗糙度及表面接触电阻。为了排除表面粗糙度对试样表面接触电阻的影响,锻造样品的上表面用 60 #砂纸打磨,使其粗糙度与选区激光熔化成形样品接近。对比锻造试样及 LPBF-1 试样,在表面粗糙度接近的情况下,LPBF-1 试样的 ICR 值较锻造试样降低了近 $70 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。对比两者的物相(图 5),均为奥氏体结构且峰位基本一致,因此也可忽略物相差异对表面接触电阻的影响。对比两者的显微组织,锻造样品为等轴晶组织而选区激光熔化样品呈现出明显的平行与成形方向的柱状晶组织(图 6c)。当电流通过锻造试样时,其晶界上错排的原子将对电子起到散射的作用,从而增大了电阻^[24];同时从一个取向的晶粒进入取向偏差较大的晶粒也会对电子的流动起到阻碍地作用^[24]。当电流通过选

区激光熔化成形试样时, 电子的流动方向与柱状晶的生长方向平行, 使得电流在流动方向上穿过的晶界较少; 此外, 选区激光熔化成形试样的晶粒取向较为接近^[25-26], 降低了对电子流动的阻碍作用。综上分析, 选区激光熔化成形试样的柱状晶组织及相似的晶粒取向是造成其表面接触电阻低于锻造成形试样的主要原因。

选区激光熔化试样的 ICR 值随着试样表面粗糙度的增加, 呈现逐渐降低的趋势。对比三个选区激光熔化成形样品, 随着激光扫描速度的提高, 熔池内熔体的稳定性减低, 容易出现球化和飞溅(图 6a), 导致试样表面粗糙度显著提高^[27]。表面粗糙度越大, 在压力作用下柔性碳布与刚性样品表面的实际接触面积越大, 使得表面接触电阻下降。因此, 随着试样表面粗糙度的提高, 选区激光熔化成形样品的表面接触电阻逐渐减低。对于 LPBF-3 试样, 表面粗糙度的大幅提高并未带来表面接触电阻的大幅度降低, 其原因可能是由于 LPBF-3 试样的致密度低于其他两个选区激光熔化成形试样(图 2)。孔隙数量的提高不利于电子的流动^[28], 从而导致了表面接触电阻降低幅度的减小。

(a) LPBF-1 及 LPBF-3 试样表面 SEM 照片

(b) 不同试样的表面粗糙度及表面接触电阻

(c) 不同试样显微组织对电流传导的影响

图 6 不同试样表面 SEM 照片、表面粗糙度及表面接触电阻及其显微组织对电流传导的影响

2.3 耐蚀性

金属双极板需要长时间工作于燃料电池高湿度、弱酸性的工作环境中, 对材料的耐蚀性要求较高。图 7a 为锻造试样和选区激光熔化成形试样的 Tafel 曲线图。

(a) Tafel 曲线

(b) 腐蚀电流和腐蚀电位图

图 7 不同样品的 Tafel 曲线、腐蚀电流和腐蚀电位图

由图 7 可以看出, 四个试样的 Tafel 曲线较为相似, 均包括极化区、钝化区及过钝化区。其中, 锻造试样、LPBF-1 及 LPBF-2 试样的钝化电流十分接近、曲线基本重叠。而 LPBF-3 试样的钝化电流明显高于其余样品, 该试样较高的孔隙率是造成其钝化电流较高的原因。通过放大 Tafel 曲线的极化区可见, LPBF-2 试样具有最高的腐蚀电位, 其次是 LPBF-1 试样、锻造试样及 LPBF-3 试样。从 Tafel 曲线计算得到的定量化腐蚀电位及腐蚀电流数据见图 7b, 可见锻造试样的腐蚀电流高于所有的选区激光熔化成形试样, 这表明锻造试样的耐蚀性低于选区激光熔化成形试样。相对于选区激光熔化成形试样的快速凝固过程, 锻造样品有大量的杂质析出而且容易形成带状组织, 最终导致锻造试样的耐蚀性低于选区激光熔化成形样品^[28]。相对于锻造样品, 选区激光熔化成形样品表面形成的氧化膜的稳定性更好, 因而表现出更为优异的耐蚀性^[29]。对于不同工艺参数的选区激光熔化成形试样, 腐蚀电流随扫描速度的提高而升高。其原因是随着扫描速度的提高, 试样表面粗糙度提高(图 6b), 使得材料与腐蚀

溶液的接触面积增大, 导致腐蚀电流提高。腐蚀电位体现了材料发生腐蚀的难易程度, 材料孔隙率越大、钝化膜越不完整, 导致材料越易发生腐蚀。对比三个选区激光熔化成形样品, LPBF-2 试样的致密度高、LPBF-1 试样次之、LPBF-3 试样最低, 因此腐蚀电位的变化趋势与致密度变化相同。

3 结论

(1) 在激光功率 280~330 W、扫描速度 1 500~2 300 mm/s 的工艺范围内, 选区激光熔化成形 316L 不锈钢的致密度可达 99%以上。

(2) 选区激光熔化成形 316L 不锈钢的柱状晶组织及晶粒间相似的晶粒取向使得其表面接触电阻低于锻造成形试样; 随着激光扫描速度的提高, 试样表面粗糙度提高, 使得表面接触电阻进一步降低。

(3) 选区激光熔化成形 316L 不锈钢试样的耐蚀性优于锻造样品; 随着激光扫描速度的提高, 试样孔隙率提高导致耐蚀性的下降。

基于以上结论, 选区激光熔化成形 316L 不锈钢材料的耐蚀性及导电性均优于传统锻造不锈钢材料。结合激光增材制造技术成形复杂结构的优势, 选区激光熔化技术在成形燃料电池高性能 316L 不锈钢双极板构件领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] GU Dongdong, MEINERS W, WISSENBAACH K, et al. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms[J]. International Materials Reviews, 2013, 57(3): 133-164.
- [2] GUO Meng, GU Dongdong, XI Lixia, et al. Selective laser melting additive manufacturing of pure tungsten: Role of volumetric energy density on densification, microstructure and mechanical properties[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 84: 105025.
- [3] WEN Shifeng, JI Xiantai, ZHOU Yan, et al. Corrosion behavior of the S136 mold steel fabricated by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(6): 58-68.
- [4] 杨永强, 宋长辉, 王迪. 激光选区熔化技术及其在个性化医学中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(21): 140-151.
- [5] LI Yuxin, GU Dongdong, ZHANG Han, et al. Effect of trace addition of ceramic on microstructure development and mechanical properties of selective laser melted AlSi10Mg alloy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(2): 64-76.
- [6] SADEQ S M, JIE L, JONGHYUN P, et al. 3D printed hierarchically-porous microlattice electrode materials for exceptionally high specific capacity and areal capacity lithium ion batteries[J]. Additive Manufacturing, 2018, 23: 70-78.
- [7] ZHAHEYEV A, WANG P, ZHANG L, et al. Additive manufacturing: Unlocking the evolution of energy materials[J]. Advanced Science, 2017, 4(10): 1700187.
- [8] LIN Kaijie, GU Dongdong, DU Lei, et al. Additive manufacturing (AM) technologies for clean energy applications: A Review with a perspective on the role played by lasers[J]. Lasers in Engineering, 2018, 41(4-6): 235-262.
- [9] AZHARI A, MARZBANRAD E, YIMAN D, et al. Binder-jet powder-bed additive manufacturing (3D printing) of thick graphene-based electrodes[J]. Carbon, 2017, 119: 257-266.
- [10] 邢丹敏, 侯中军, 燕希强, 等. 国产质子交换膜燃料电池关键材料及部件的电池组性能[J]. 机械工程学报, 2010, 46(6): 16-20.
- [11] XING Danmin, HOU Zhongjun, YAN Xiqiang, et al. Investigation on proton exchange membrane fuel cell stacks of domestic key materials and components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(6): 16-20.
- [12] 潘欢欢, 徐洪峰, 孙昕, 等. 不锈钢用作质子交换膜燃料电池双极板的化学改性方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 51-55.
- [13] PAN Huanhuan, XU Hongfeng, SUN Xin, et al. Chemical modification on stainless steel as bipolar plate of polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 51-55.
- [14] MASANORI Y, SHIN Y, HISAMICHI K, et al. Production of metallic glassy bipolar plates for PEM fuel cells by hot pressing in the supercooled liquid state[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(20): 5678-5685.
- [15] ARVAY A, FRENCH J, WANG J C, et al. Nature inspired flow field designs for proton exchange membrane fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(9): 3717-3726.
- [16] ARENAS L F, PONCE, C, WALSH F C, 3D-printed porous electrodes for advanced electrochemical flow reactors: A Ni/stainless steel electrode and its mass transport characteristics[J]. Electrochemistry Communications, 2017,

- 77: 133-137.
- [15] YANG Gaoqiang, MO Jingke, KANG Zhenye, et al. Fully printed and integrated electrolyzer cells with additive manufacturing for high-efficiency water splitting[J]. *Applied Energy*, 2018, 215: 202-210.
- [16] SCOTTI G, KANNINEN P, MATILAINEN V P, et al. Stainless steel micro fuel cells with enclosed channels by laser additive manufacturing[J]. *Energy*, 2016, 106: 475-481.
- [17] CHEN Hongyu, GU Dongdong, XIONG Jiapeng, 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.
- [18] WANG H L, SWEIKART M A, TURNER J A. Stainless steel as bipolar plate material for polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. *Journal of Power Sources* 2003, 115: 243-51.
- [19] GUO Meng, GU Dongdong, XI Lixia, et al. Formation of scanning tracks during selective laser melting (SLM) of pure tungsten powder: Morphology, geometric features and forming mechanisms[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, 79(2): 37-46.
- [20] GU Dongdong, MA Chenglong, XIA Mujian, et al. A multiscale understanding of the thermodynamic and kinetic mechanisms of laser additive manufacturing[J]. *Engineering*, 2017, 5(3): 675-684.
- [21] BARTOLOMEU F, BUCIUMEANU M, PINTO E, et al. 316L stainless steel mechanical and tribological behavior—A comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting[J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 16: 81-89.
- [22] 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.
- [23] AVASARALA B, HALDAR P. Effect of surface roughness of composite bipolar plates on the contact resistance of a proton exchange membrane fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 188(1): 225-229.
- [24] DYOS G T. *The Handbook of Electrical Resistivity: New Materials and Pressure Effects*, The Institution of Engineering and Technology, London, 2012
- [25] Additively manufactured hierarchical stainless steels with high strength and ductility[J]. *Nature Materials*, 2018, 17(1): 63-70.
- [26] LIN Kaijie, GU Dongdong, XI Lixia, et al. Selective laser melting processing of 316L stainless steel: effect of microstructural differences along building direction on corrosion behavior[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104: 2679.
- [27] SUN Dongsheng, GU Dongdong, LIN Kaijie, et al. Selective laser melting of titanium parts: Influence of laser process parameters on macro- and microstructures and tensile property[J]. *Powder Technology*, 2018(9): 342.
- [28] BRANDON, NIGEL P, BILLY, et al. Electrical conductivity and porosity in stainless steel 316L scaffolds for electrochemical devices fabricated using selective laser sintering[J]. *Materials and Design*, 2016, 106(9): 51-59.
- [29] LODHI M J K, DEEN K M, GREENLER M C, et al. Additively manufactured 316L stainless steel with improved corrosion resistance and biological response for biomedical applications[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 27: 8-19.

作者简介: 林开杰, 男, 1988 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为高性能金属构件的增材制造。

E-mail: kaijie_lin@nuaa.edu.cn

顾冬冬(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为高性能金属构件的增材制造。

E-mail: dongdonggu@nuaa.edu.cn