

核电用 316L 不锈钢粉末增材制造研究现状

杨青峰, 高士鑫, 陈平, 廖楠, 周毅, 尹春雨, 段振刚, 尹泓卜

(中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都 610213)

摘要: 增材制造技术是一种无须模具、近净成形的先进制造工艺。不锈钢是一种在核电行业广泛应用的 structural 材料。实现不锈钢结构件的增材制造将进一步推动增材制造技术的发展, 也可为核行业带来革命性改变。以核电用 316L 不锈钢为例, 系统阐述了不锈钢粉末增材制造研究现状, 包括粉末制备工艺现状、增材制造成形工艺现状以及成形件的组织性能研究现状。目前, 增材制造用 316L 不锈钢粉末的制备工艺主要为雾化法, 粉末的物化性能受制粉工艺参数的影响。在激光粉末床熔融增材制造技术、电子束选区熔化技术和等离子增材制造技术中, 尤以激光粉末床熔融增材制造不锈钢的应用最为广泛。增材制造 316L 不锈钢的组织与性能存在各向异性, 但各向异性可通过增材制造的后处理技术消除。目前增材制造最为常用的后处理技术为热处理。与锻造 316L 不锈钢相比, 经热等静压处理的增材制造 316L 不锈钢的力学性能与辐照性能更优。目前, 核用不锈钢的增材制造技术还处于起始阶段, 后续应重点关注增材制造的成形机理及成形材料中子辐照性能等内容。

关键词: 增材制造; 核电; 316L 不锈钢; 研究现状

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.05.025

中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)05-0209-11

Current Research Status of Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel Powder for Nuclear Power

YANG Qing-feng, GAO Shi-xin, CHEN Ping, LIAO Nan, ZHOU Yi, YIN Chun-yu, DUAN Zhen-gang, YIN Hong-bu

(Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

ABSTRACT: Additive manufacturing is an advanced manufacturing process that does not require molds and is similar with net forming. Stainless steel is a kind of structural material which is widely used in the nuclear power industry. The realization of additive manufacturing for fabricating stainless steel will further promote the development of additive manufacturing, and also brings revolutionary changes to the nuclear industry. With 316L stainless steel as an example, the current research status of additive manufacturing of stainless steel powder for nuclear power was systematically described, including the current status of power preparation process, the present situation of additive manufacturing forming process, and the current research status of the

收稿日期: 2022-09-22

Received: 2022-09-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2019YFB1901000)

Fund: National Key R&D Program of China (2019YFB1901000)

作者简介: 杨青峰 (1995—), 男, 硕士。

Biography: YANG Qing-feng (1995-), Male, Master.

通讯作者: 陈平 (1981—), 男, 博士。

Corresponding author: CHEN Ping (1981-), Male, Doctor.

引文格式: 杨青峰, 高士鑫, 陈平, 等. 核电用 316L 不锈钢粉末增材制造研究现状[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 209-219.

YANG Qing-feng, GAO Shi-xin, CHEN Ping, et al. Current Research Status of Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel Powder for Nuclear Power[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 209-219.

microstructure and performance of the formed parts. At present, the preparation process of 316L stainless steel powder for additive manufacturing is mainly the atomization method, and the physical and chemical properties of the powder are affected by the parameters of the milling process. Among the three additive manufacturing technologies of selective laser melting technology, electron beam selective melting technology and plasma additive manufacturing technology, selective laser melting is more widely used. There is anisotropy in the structure and properties of additively manufactured 316L stainless steel, but the anisotropy can be eliminated by the post-processing technology of additive manufacturing. At present, the most commonly used post-processing technology for additive manufacturing is heat treatment. The mechanical properties and irradiation properties of the additively manufactured 316L stainless steel treated by hot isostatic pressing are even better than those of the forged 316L. At present, the additive manufacturing of stainless steel for nuclear industry is still in the initial stage, and the follow-up research should focus on the forming mechanism of additive manufacturing and the neutron irradiation performance of formed materials.

KEY WORDS: additive manufacturing; nuclear power; 316L stainless steel; current research status

随着我国核电事业的快速发展,部分核能设备的设计变得更加精密复杂^[1-3],这部分核能设备若采用传统制造工艺生产,则存在生产周期长、制造工序多的问题,而采用增材制造工艺可以实现具有复杂精密结构设备的高效生产^[4-5]。

增材制造(又称3D打印)技术是一种高效、清洁、近净成形的新型制造技术^[6-7]。其原理如下:首先将产品的三维设计模型分解成若干层平面切片,然后利用激光束、电子束等能量源将粉状或丝状的原材料进行逐层堆积,通过层层叠加最终形成具有良好冶金结合的产品^[8-10]。近些年,增材制造技术已逐步从实验室规模向工业规模发展。

不锈钢具备优良的抗氧化性能、力学性能和抗腐蚀性能,在核电领域具有广泛的应用^[11-12]。尤其是福岛事故之后,不锈钢(如FeCrAl铁素体不锈钢材料、316Ti和15-15Ti奥氏体不锈钢等)被选为轻水堆耐事故燃料(Accident Tolerant Fuel, ATF)材料的主要研发方向之一。此外,不锈钢材料具有良好的焊接性能^[13],因此采用增材制造技术可以实现其较好的冶金结合与成形,将增材制造技术引入核电领域必将有利于耐事故燃料材料的发展与应用。

与钛合金增材制造相比,目前关于耐事故不锈钢材料的增材制造研究明显较少,核电用不锈钢增材制造技术的研究是近些年来的研究热点之一^[14-17]。本文以核电用316L不锈钢为例,对不锈钢粉末增材制造的研究现状进行介绍,阐述了316L不锈钢粉末的制备工艺、增材制造成形工艺、增材制造316L不锈钢的组织性能以及辐照后成形件的性能,并对后续不锈钢增材制造的应用与研究提出了相关建议。

1 粉末制备工艺

增材制造用金属粉末的制备工艺主要有还原法、电解法、机械研磨法、雾化法等^[18-19]。其中,机械研磨法的生产效率较低,而还原法、电解法和雾化法的

生产效率较高,因此三者通常在工业生产中普遍应用,但是电解法和还原法仅适用于生产单质金属粉末,不适用于不锈钢等合金粉末的生产^[20-21]。目前,增材制造用316L不锈钢粉末的制备工艺主要为雾化法,优化雾化工艺可以控制粉末形状,改进雾化腔结构可以显著提高雾化效率^[22-23]。

雾化法是一种直接使金属熔液破碎成小尺寸颗粒的制粉方法^[24-25]。目前雾化法主要有等离子体旋转电极法(Plasma Rotating Electrode Method)、等离子雾化法(Plasma Atomization)和气雾化法(Aerosolization)等,其中气雾化法又可分为电极感应熔炼气雾化法(Electrode Induction Melting Gas Atomization Method)、真空感应熔炼气雾化法(Vacuum Induction Melting Gas Atomization Method)、紧耦合雾化法(Tightly Coupled Atomization)和层流雾化法(Laminar Atomization)等。不同雾化工艺的特点如表1所示^[26-28]。

粉末的物化性能受制粉方法和制粉工艺的影响,研究发现,真空感应熔炼气雾化法的制粉工艺参数对粉末化学成分均匀性、粉末粒径分布、松装密度、球形度等物化性能有着十分重要的影响,而且不同尺寸的粉末具有不同的微观组织形貌^[29]。粉末的形貌、粒度及分布、松装密度等物化性能对后续增材制造的成形性有着重要影响,粉末质量处理不好,不仅会影响增材制造的成形质量,甚至会造成打印过程无法连续进行,因此需要严格控制不锈钢粉末的粒度及分布、松装密度等物化性能。

2 增材制造工艺

根据所用能量源的不同,核电用316L不锈钢粉末的增材制造工艺主要有激光增材制造、电子束增材制造和等离子束增材制造,粉末的供给方式主要有铺粉和同轴送粉2种。

激光粉末床熔融增材制造技术。激光粉末床熔融

表 1 不同雾化工艺的特点
Tab.1 Characteristics of different atomization processes

Processing technology	Advantages	Disadvantages
Plasma rotating electrode method	The powder has high sphericity, purity, and good flowability. This process can be used to produce high-purity powders of high melting point metals and active metals	Due to low motor speed, the yield of fine powder is low
Plasma atomization	The powder has high sphericity and narrow particle size distribution	There are many planetary powder present in the powder
Electrode induction melting gas atomization method	There are fewer non-metallic inclusions and low oxygen content in powder	The porosity of powder is high
Vacuum induction melting gas atomization method	The powder has high sphericity. The single melting capacity of the process is large	The powder particle size distribution is wide, and the instrument is prone to contamination during the preparation process
Tightly coupled atomization	The particle size distribution of the powder is narrow. This process can be used to prepare ultrafine powder with size below 2 μm	High atomization pressure may cause nozzle blockage
Laminar atomization	The particle size distribution of the powder is narrow	This atomization technology is difficult to control and it is unstable

增材制造 (SLM) 技术的工艺流程如下: 铺粉机构首先在舱室的基板上均匀铺一层粉末, 然后激光按照预先设定的路径施加能量, 粉末吸收激光能量后发生熔化并凝固, 完成该层扫描后, 基板下降, 铺粉机构继续铺粉, 依次循环直至样件完成, 激光粉末床熔融增材制造示意图如图 1 所示^[30-31]。通过研究激光粉末床熔融增材制造工艺参数对 316L 不锈钢试样的影响^[32], 发现随着扫描功率的增加, 试样组织中的孔洞和裂纹等缺陷减少, 而随着扫描速度和扫描间距的增加, 试样的致密度有所降低, 并通过优化 SLM 工艺参数, 最终制得了致密度为 95.62% 的试样。采用激光粉末床熔融增材制造技术打印 316L 不锈钢, 虽然成形效率较低 (3.12 mm³/s), 但样品的致密度可达 99.3%~99.5%^[33]。除激光粉末床熔融增材制造的工艺参数外, 扫描路径方式的选择也会对成形件的组织性能产生影响。通过研究 S 形正交和旋转分区 2 种激光扫描方式对激光粉末床熔融增材制造 316L 不锈钢组织和性能的影响^[34], 发现采用旋转分区方式进行扫描, 样件的室温拉伸强度要高于 S 形正交扫描样件的室温拉伸强度。

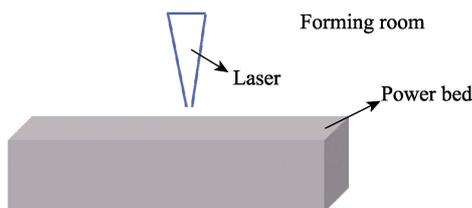


图 1 激光粉末床熔融增材制造示意图

Fig.1 Schematic diagram of selective laser melting technology

电子束选区熔化技术。电子束选区熔化技术与激光粉末床熔融增材制造技术非常相似, 该工艺只是将成形能量源由激光换为电子束^[30]。另外与激光粉末床

熔融增材制造技术相比, 电子束选区熔化技术的成本明显降低, 这主要是由于电子束选区熔化技术所使用的粉末粒径通常要大于激光粉末床熔融增材制造技术所使用的粉末粒径^[35-36]。通过研究电子束选区熔化技术的工艺参数对成形件表面粗糙度的影响^[37], 发现先采用低电子束功率扫描, 再采用高电子束功率扫描, 可显著改善成形件的表面粗糙度。除采用工艺实验来保障成形件质量外, 还可采用理论计算与实验分析相结合的方法 (如研究电子束成形过程中粉末的熔化机制) 保障成形件的质量^[38-39]。

基于同轴送粉的等离子增材制造技术。基于同轴送粉的等离子增材制造技术是将等离子束作为热源, 相较于铺粉工艺, 采用同轴送粉工艺可显著提高粉末的利用率, 而且采用同轴送粉工艺可不受成形方向和零件复杂程度的限制, 因此同时也提高了成形效率。通过研究等离子增材制造成形工艺参数对焊道尺寸的影响^[40], 发现电流参数对焊道宽度的影响大于送粉速度参数的影响, 通过优化工艺, 打印 316L 不锈钢的拉伸强度可达 560 MPa, 其性能明显高于铸件水平。

以上 3 种增材制造技术的优缺点如表 2 所示, 在这 3 种增材制造技术中, 尤以激光粉末床熔融增材制造技术的应用最为广泛, 因此后文关于增材制造 316L 不锈钢组织性能的研究主要集中于激光粉末床熔融增材制造 316L 不锈钢的组织性能。

3 成形件组织与性能

3.1 辐照前

增材制造 316L 不锈钢的组织形貌与增材制造过程中的热量场分布状态密切相关, 在 3D 打印过程中, 熔池的冷却速率可达 $10^2 \sim 10^6$ K/s, 因此增材制造

表2 不同增材制造工艺的对比

Tab.2 Comparison of different additive manufacturing technologies

Additive manufacturing process	Heat resource	Advantages	Disadvantages
Selective laser melting	Laser	This process has high forming accuracy and good forming quality	This process has high cost and low efficiency. There is a problem of powder contamination
Electron beam selective melting	Electron beam	This process has high energy utilization rate and fast forming speed	There is powder spheroidization
Plasma additive manufacturing technology based on coaxial powder feeding	Plasma beam	This process has high forming efficiency and powder utilization rate	This process has low forming accuracy

316L 不锈钢的组织呈现典型的快速凝固特征^[41-42]。另外在 3D 打印过程中,当打印下一层材料时,上一层已沉积的材料会受到往复退火/回火处理,从而使增材制造成形件的组织呈现出“铸态+不完全热处理”复杂的组织特征^[43-45]。增材制造这些特有的成形过程恰好可实现组织优化的目标,使增材制造成形件具有良好的力学性能。

增材制造与轧制工艺。冷轧和激光粉末床熔融增材制造 2 种成形工艺制造的 316L 不锈钢组织如图 2 所示^[46]。可以看到,打印 316L 不锈钢的金相中有 3D 打印特有的层带结构,这是打印过程中许多微小熔池凝固后形成的。冷轧不锈钢的组织为细小的等轴晶,在 SLM-316L 不锈钢的组织中,在熔线附近分布着不同的亚晶结构(胞状和柱状)。通过对比激光粉末床熔融增材制造 316L 不锈钢和冷轧 316L 不锈钢的拉

伸性能,发现与冷轧 316L 不锈钢相比,激光粉末床熔融增材制造 316L 不锈钢的抗拉强度和伸长率较低,但屈服强度较高。

增材制造与锻造工艺。对激光粉末床熔融增材制造 316L 不锈钢分别进行去应力退火(SR)和热等静压处理(HIP),发现经去应力退火处理的 3D 打印 316L 不锈钢试样的微观结构具有各向异性^[47]。316L 不锈钢背散射电子图如图 3 所示。可知,在 $x-y$ 平面内为等轴晶,在 $y-z$ 平面内为柱状晶,亚晶粒沿打印高度方向明显变长,3D 打印 316L 不锈钢经热等静压处理后晶粒发生长大,晶粒尺寸增加,而且经热等静压处理后的 3D 打印 316L 不锈钢试样的组织形貌与锻造 316L 不锈钢的非常相似。拉伸结果表明,经去应力退火处理的 3D 打印 316L 不锈钢试样的拉伸性能存在各向异性^[47],与打印高度方向相比,沿垂直

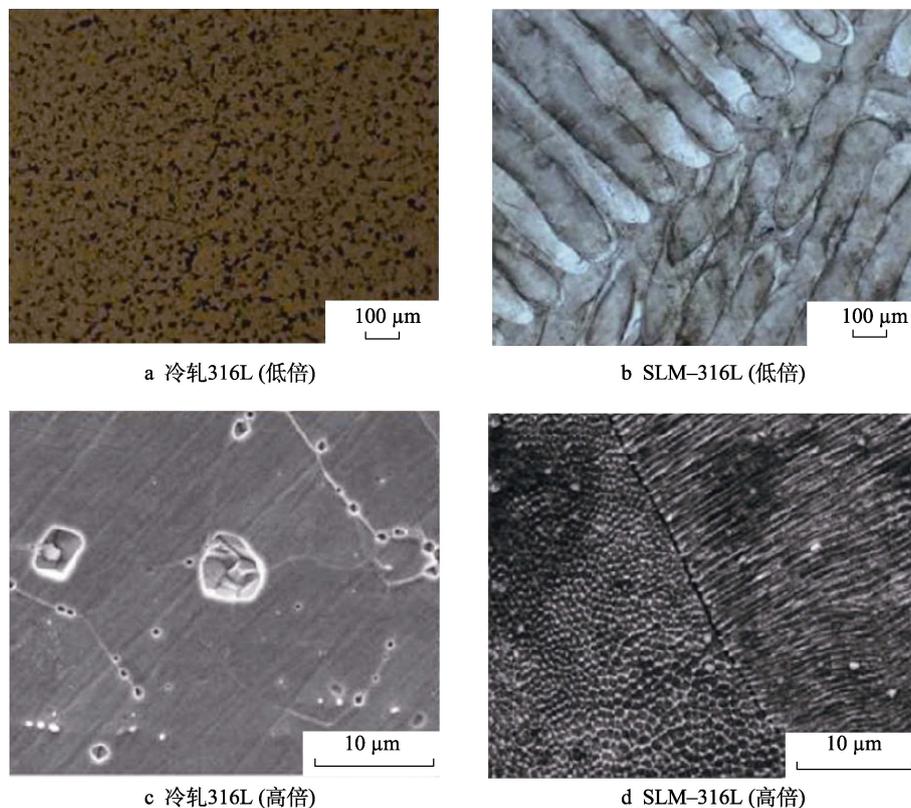
图2 冷轧 316L 不锈钢和 SLM-316L 不锈钢金相及 SEM 图^[46]

Fig.2 Metallographic and SEM images of cold-rolled 316L stainless steel and SLM-316L stainless steel: a) cold-rolled 316L (low power); b) SLM-316L (low power); c) cold-rolled 316L (high power); d) SLM-316L (high power)^[46]

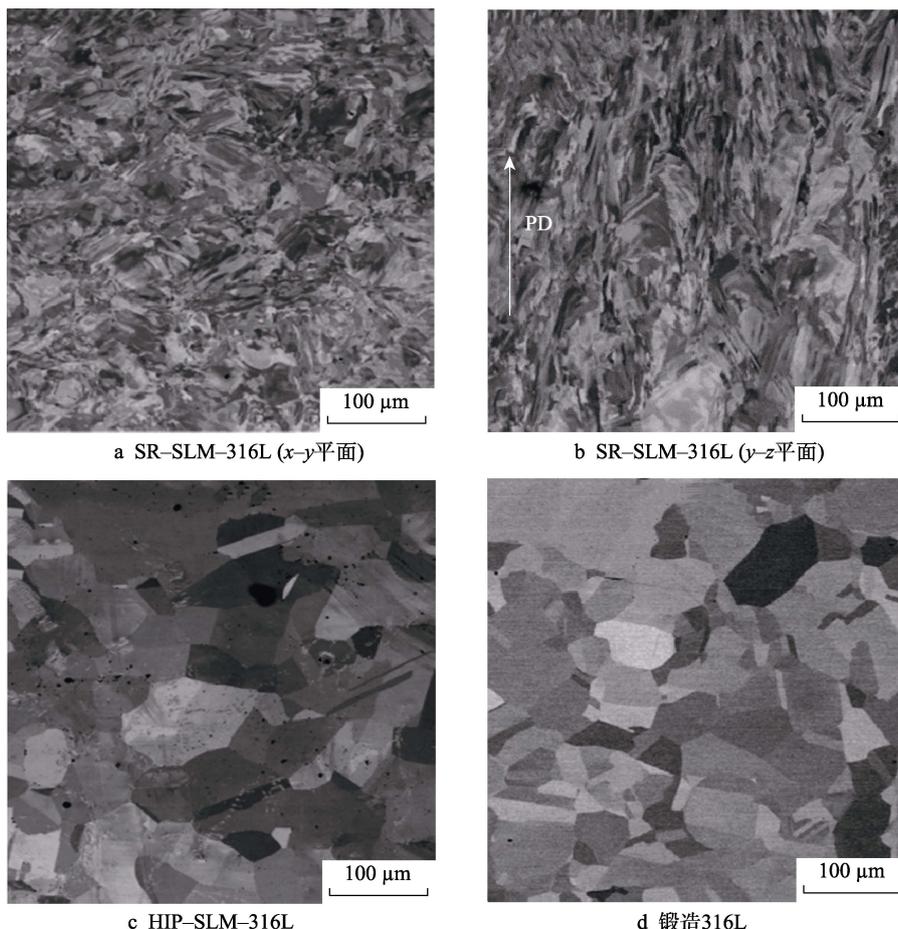


图 3 316L 不锈钢背散射电子图^[47]

Fig.3 Backscattered electron images of 316L stainless steel: a) SR-SLM-316L (x-y plane); b) SR-SLM-316L (y-z plane); c) HIP-SLM-316L; d) forged 316L^[47]

于打印高度方向具有更高的屈服应力和极限拉伸应力,但在该方向上的伸长率较低。经热等静压处理后的 3D 打印 316L 不锈钢试样的屈服应力和极限拉伸应力略高于锻造 316L 的,但两者的伸长率相当。

腐蚀性能。通过电化学实验对比研究了 SLM 成形 316L 不锈钢和锻造不锈钢的耐腐蚀性能^[48],结果表明,与锻造不锈钢相比,SLM 打印 316L 不锈钢具有更好的耐点蚀性能。对去应力退火的 SLM 打印 316 不锈钢和锻造 316L 不锈钢开展了应力腐蚀开裂实验^[49],发现去应力退火的 SLM 打印 316 不锈钢的应力腐蚀具有各向异性。在氧化性水中,SLM 打印 316 不锈钢沿打印高度方向的裂纹扩展速率远高于垂直于打印高度方向和锻造 316L 不锈钢的裂纹扩展速率。在还原性水中,所有试样的应力腐蚀开裂速率显著降低,但 SLM 打印 316 不锈钢沿打印高度方向的裂纹扩展速率仍稍高于垂直于打印高度方向和锻造 316L 不锈钢的裂纹扩展速率。

增材制造后处理工艺的影响。通过研究不同热处理工艺对激光粉末床熔融增材制造 316L 不锈钢组织与性能的影响^[50],发现对激光粉末床熔融增材制造 316L 不锈钢进行去应力退火后,其胞状亚结构未发

生明显变化,但对激光粉末床熔融增材制造 316L 不锈钢进行完全退火处理和热等静压处理后,激光粉末床熔融增材制造 316L 不锈钢中的胞状亚结构消失,其疲劳强度出现了明显降低,但其塑性得到了改善。即使采用同一类型的热处理工艺,当热处理温度不同时,激光粉末床熔融增材制造 316L 不锈钢的组织与性能也会存在不同^[51]。研究发现,在未经热处理的激光粉末床熔融增材制造 316L 不锈钢中存在较多的亚晶结构,随着热处理温度的升高,亚晶结构逐渐消失,大角度晶界比例增加,并且随着热处理温度的升高,激光粉末床熔融增材制造 316L 不锈钢的硬度有所下降。

3.2 辐照后

中子辐照。目前国内外对增材制造 316L 不锈钢的辐照性能已展开了相关研究,但更多的研究主要集中于增材制造 316L 不锈钢离子辐照性能,其中关于中子辐照性能的研究较少。美国西屋公司于 2019 年对增材制造 316L 不锈钢中子辐照后(约 1 dpa)的拉伸性能进行了检测,发现中子辐照后,增材制造 316L 不锈钢的拉伸强度和屈服强度有所增加,而伸长率有

轻微的降低^[52]。

质子辐照。针对去应力退火的选区激光熔化成形 316L 不锈钢试样(以 SR-SLM-316L 表示),研究了质子辐照(360 °C, 2.5 dpa)后 SR-SLM-316L 不锈钢的微观组织以及辐照诱导应力腐蚀断裂(IASCC)现象^[47]。发现质子辐照后,在 SR-SLM-316L 不锈钢试样中发生了明显的回复和再结晶现象,并观察到了辐照诱导产生的气孔、位错环和 γ' 相。相较于热等静压处理的选区激光熔化成形 316L 不锈钢试样(以 HIP-SLM-316L 表示),SR-SLM-316L 不锈钢中位错环密度更高。与锻造 316L 不锈钢相比,辐照后打印 316L 不锈钢(SR-SLM-316L 和 HIP-SLM-316L)中位错环密度更高、尺寸更小。辐照后,SR-SLM-316L 试样的应力腐蚀开裂具有各向异性,沿平行于打印高度方向具有较低的敏感性。与锻造 316L 不锈钢相比,HIP-SLM-316L 具有更好的抗肿胀性能和高抗辐照诱导应力腐蚀断裂性能。

氦离子辐照。通过氦离子对选区激光熔化成形 316L 不锈钢进行辐照,研究不同辐照温度对选区激光熔化成形 316L 不锈钢组织与辐照硬化行为的影响^[53]。可以发现,辐照后在激光熔化成形 316L 不锈钢中出现的微观缺陷主要是氦泡和位错环,两者的数密度均随着温度的升高而降低,而两者的尺寸均随着温度的升高而逐渐增大,但相比之下,氦泡的温度敏感性要略高于位错环的。此外,SLM 成形 316L 不锈钢的辐照硬化随温度的升高而降低,氦泡对 SLM 成形 316L 不锈钢的辐照硬化起到的贡献要大于位错环的贡献。随着辐照剂量的增加,SLM 打印 316L 不锈钢中的氦泡尺寸也随之增大,但与传统 316L 不锈钢相比,SLM 打印 316L 不锈钢中的氦泡密度和肿胀率均比较小。辐照后在 SLM 打印 316L 不锈钢和传统工艺制备的 316L 不锈钢中均出现了辐照硬化现象,但与传统工艺制备的 316L 不锈钢相比,SLM 打印 316L 不锈钢辐照硬化的程度更低^[54]。

3.3 小结

通过以上研究发现增材制造 316L 不锈钢的晶粒尺寸较细小,且与传统锻造不锈钢相比,增材制造 316L 不锈钢具有更好的耐点蚀性能。但增材制造 316L 不锈钢的组织形貌在打印高度方向和打印水平方向存在明显的不均匀性,在打印水平方向上,选区激光熔化成形 316L 不锈钢具有等轴晶,而在打印高度方向上晶粒有所拉长,组织上的差异导致其不同方向上的性能存在各向异性。各向异性在核电应用上是不利的,但可通过增材制造的后处理技术进行消除。目前增材制造最为常用的后处理技术为热处理,特别是热等静压处理。经热等静压处理的增材制造 316L 不锈钢的组织与锻造不锈钢的组织相似,与锻造 316L 不锈钢相比,其屈服强度和极限拉伸应力更

高、抗肿胀性能和抗辐照诱导应力腐蚀断裂性能更好,而二者伸长率较为接近。

经过辐照后,增材制造 316L 不锈钢出现辐照硬化现象,其拉伸强度和屈服强度有所增加,而伸长率下降,但与传统工艺制备的 316L 不锈钢相比,增材制造 316L 不锈钢辐照硬化的程度较低。经过氦离子辐照后,增材制造 316L 不锈钢中出现的辐照缺陷主要是氦泡和位错环,与传统工艺制备的 316L 不锈钢相比,增材制造 316L 不锈钢中的氦泡密度和肿胀率均较小。对于增材制造 316L 不锈钢,不同的增材制造后处理工艺导致其辐照后缺陷有所不同,质子辐照后,相较于热等静压处理的选区激光熔化成形 316L 不锈钢,去应力退火的选区激光熔化成形 316L 不锈钢中位错环密度更高,且其应力腐蚀开裂具有各向异性。

4 核电 316L 不锈钢要求

对于核电用 316L 不锈钢的指标要求,需要考虑不锈钢特殊的使用环境,特别是对于直接工作在核反应堆芯内的不锈钢,如核燃料组件用不锈钢,因为服役环境的限制,不锈钢需要耐腐蚀、耐疲劳、耐辐照蠕变,同时不会因辐照产生过多的放射性材料^[55]。

4.1 化学成分

在不锈钢的化学成分中,对部分元素有特别要求。下文介绍了部分元素在核电领域的要求。

钴(Co)元素。Co 的质量分数应控制 0.12%,且越低越好^[56]。因为钴元素在核反应堆芯辐照后,可能产生放射性同位素钴(⁶⁰Co),其半衰期长达 5.27 年,在核电站维修、燃料后处理阶段会对操作人员造成伤害。

碳(C)元素:C 的质量分数应控制 0.035%^[57]。碳元素在奥氏体不锈钢中的溶解度为 0.02%~0.03%,超过此范围后,多余的碳会在晶界形成碳化铬沉淀,使晶界附近形成“贫铬区”。若在后续的加工处理过程中不加以控制,易产生局部腐蚀,从而影响构件的耐腐蚀性能。

铬(Cr)元素:Cr 的质量分数应控制在 18.50%~20.00%^[58]。当钢中 Cr 的原子数分数不低于 12.5%时,可有效阻止电化学腐蚀的发生。另外考虑到构件的塑性及抗辐照蠕变要求,应严格控制铬元素含量在一定范围内。

4.2 性能要求

在前文中提到,核用不锈钢除在拉伸、冲击等常规力学性能方面有相应要求外,一般还要求其耐腐蚀、耐疲劳、耐辐照蠕变,且力学性能指标一般比国标中规定的指标要高。例如,在 GB/T 3280 中要求不锈钢的屈服强度要不小于 180 MPa,在核电领域对部

分不锈钢要求屈服强度要不小于 210 MPa^[55]。打印态 SLM-316L 的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率分别为 409~680 MPa、509~773 MPa、12%~87%^[59], 根据核电对部分不锈钢的性能要求(屈服强度、抗拉强度、断后伸长率分别为 210 MPa、485 MPa、40%)^[55], 可以发现 SLM 打印 316L 不锈钢的性能可以满足核电需求。

在 SLM 打印 316L 不锈钢过程中, 由于熔池中的温度梯度较大, 最后凝固形成的晶粒尺寸较小。根据 Hall-Petch 公式, 晶粒尺寸越小, 材料的屈服强度越高。关于 SLM 打印 316L 不锈钢高强高韧化机理, 目前的观点主要有凝固后形成的胞结构、高位错密度、位错网络结构、 $\langle 011 \rangle$ 织构诱导的 TWIP 效应、纳米氧化物颗粒、晶体层片状结构及非均匀层级结构^[59]。SLM 制备的高强高韧化 316L 不锈钢构件对不锈钢在核电领域的应用是有利的。

在 SLM 打印过程中, 在打印下一层 316L 不锈钢粉末时, 已经凝固的 316L 不锈钢会受到热的作用, 也就是说, 在打印过程中, 316L 材料经历了复杂的热处理过程, 导致打印 316L 不锈钢中通常存在较大的残余应力, 这对 316L 不锈钢在核电领域的应用是不利的。因此, 一般打印 316L 不锈钢需要进行打印后热处理, 以消除打印构件的残余应力。

在 SLM 打印 316L 不锈钢构件组织中, 通常会存在一些气孔、未熔合及裂纹等缺陷。孔洞的形成主要与制粉工艺、粉末的铺粉密度及粉末本身的特征有关, 产生未熔合缺陷主要是由于输入到粉末床的能量不足, 产生裂纹主要是因为熔池内部具有较高的温度梯度和凝固速率, 从而导致成形件的内应力较大。以上这些缺陷的存在会降低打印 316L 不锈钢的力学性能和耐腐蚀性能^[60]。在核电堆芯应用的结构件绝大多数都需要进行无损检测, 不允许有超过标准伤当量的缺陷存在。

一些研究认为 Cr 和 Mo 元素会在 SLM 打印 316L 不锈钢胞结构的胞壁上形成微观偏析, 而溶质分布和微观结构的不均匀性会降低材料的耐蚀性^[61]。但也有一些学者认为 SLM 打印 316L 不锈钢在凝固过程中具有极高的冷却速度, 使得成形件中不含 MnS 夹杂物, 也不会形成贫 Cr 区, 可以抑制点蚀形核位点的形成^[62]。因此, 关于 SLM 打印 316L 不锈钢的耐蚀性能还有待进一步研究。

5 应用实例

2015 年, 法马通公司在德国埃尔兰根实验室启动增材制造项目, 该项目重点在于使用增材制造技术制造不锈钢和镍基合金燃料组件, 这批不锈钢和镍基合金部件于 2019 年进入戈斯根核电厂反应堆进行辐照考验, 并于 2020 年 11 月完成了反应堆的首个辐照

检测周期^[63]。

2016 年, 中国广核集团有限公司利用激光粉末床熔融增材制造技术打印 316L 不锈钢, 制造了核电站复杂流道仪表阀多通道阀体(尺寸为 140 mm×76 mm×56 mm)。打印的阀体没有发现表面缺陷, 表面粗糙度为 3.2 μm。经测试, 其化学成分和基本力学性能均满足国际核电标准 RCC-M 要求^[6]。

2019 年, 美国橡树岭国家实验室牵头实施“转型挑战反应堆”(TCR) 建设计划, 于 2023 年建成一座微型反应堆。TCR 的制造方法之一就是金属(316L 和 Inconel 718) 零件使用激光粉末床熔融增材制造^[63]。

2020 年 5 月 4 日, 西屋电气公司在伊利诺伊州的 Exelon Byron 1 号反应堆内安装了 3D 打印阻流塞装置, 如图 4 所示, 该阻流塞装置由粉末床熔融金属 3D 打印 316L 不锈钢和 304 不锈钢材料通过激光热丝焊接技术连接而成, 这也是全球首个安装到商业核反应堆的 3D 打印燃料结构件^[4]。



图 4 西屋公司采用增材制造工艺制备的阻流塞^[4]

Fig.4 Choke plugs made by additive manufacturing process by Westinghouse^[4]

6 展望

目前, 关于核用 316L 不锈钢增材制造技术的研究尚处于起步阶段, 距离工业化、大批量的生产还存在很大距离。为此, 后续针对核用 316L 不锈钢增材制造的应用研究, 应重点关注以下 3 个方面。

1) 研究增材制造成形过程中不锈钢与热源之间的作用机理。研究增材制造过程中热源(如激光、电子束、等离子束等)与不锈钢粉末的相互影响机制, 探索不同成形工艺与成形件组织性能的关系, 建立粉末材料、成形工艺、组织性能之间的数据库, 以实现在设计阶段可对成形件组织性能进行预测及优化的目标。

2) 探索合适的增材制造后处理工艺以改善打印件的组织性能。大量文献数据已表明, 对于增材制造

316L 不锈钢, 其性能存在各向异性, 不同的增材制造后处理工艺对打印件的组织性能会产生不同影响, 因此需要根据实际应用环境需求, 探索合适的增材制造后处理工艺。

3) 系统全面评价增材制造 316L 不锈钢中子辐照后的性能。目前关于增材制造 316L 不锈钢组织性能的研究更多集中于辐照前的组织性能。对于中子辐照后其组织性能的变化研究相对较少, 目前仅获得了其辐照后的拉伸性能, 这是远不能满足增材制造不锈钢在核电领域应用需求的, 需要系统全面评价其中子辐照后的性能(如热物性能、力学性能、腐蚀性能、焊接性能等)。

7 结语

在工业 4.0 背景下, 增材制造技术因具有高效、清洁等优点得到了快速的发展, 特别是在制造具有复杂结构零部件等方面具有无可比拟的优势。不锈钢作为核电领域广泛应用的一种结构材料, 实现其增材制造结构件的应用必将给核行业带来更好的发展, 并且也能进一步推动增材制造技术在核领域的推广与应用。针对增材制造不锈钢的研究, 后续除开展粉末制备工艺及增材制造工艺研究外, 更应详细开展增材制造过程中熔池行为及增材制造后处理工艺研究, 并系统全面评价其中子辐照性能。

参考文献:

- [1] ZINKLE S J, WAS G S. Materials Challenges in Nuclear Energy[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(3): 735-758.
- [2] 王磊, 卢秉恒. 我国增材制造技术与产业发展研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(4): 202-211.
WANG Lei, LU Bing-heng. Development of Additive Manufacturing Technology and Industry in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(4): 202-211.
- [3] 孙毅, 罗穆雄. 美国智能制造的发展及启示[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(11): 1316-1325.
SUN Yi, LUO Mu-xiong. The Development and Enlightenment of American Intelligent Manufacturing[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(11): 1316-1325.
- [4] 伍浩松, 张焰, 戴定. 3D 核电打印现状及前景[J]. *中国核工业*, 2017(7): 45-47.
WU Hao-song, ZHANG Yan, DAI Ding. Current Situation and Prospects of 3D Nuclear Power Printing[J]. *China Nuclear Industry*, 2017(7): 45-47.
- [5] YUSUF S M, CHEN Y, YANG S F, et al. Microstructural Evolution and Strengthening of Selective Saser Melted 316L Stainless Steel Processed by High-Pressure Torsion[J]. *Materials Characterization*, 2020, 159(C): 110012.
- [6] 谭磊, 赵建光. 金属 3D 打印技术核电领域研究现状及应用前景分析[J]. *电焊机*, 2019, 49(4): 339-343.
TAN Lei, ZHAO Jian-guang. Analysis on the Present Research Situation and Application Prospect of Metal 3D Printing Technology in Nuclear Power Field[J]. *Electric Welding Machine*, 2019, 49(4): 339-343.
- [7] MASSEY C P, GUSSEV M N, HAVRILAK C J, et al. On the Efficacy of Post-Build Thermomechanical Treatments to Improve Properties of Zirconium Fabricated Using Ultrasonic Additive Manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 59: 103110.
- [8] ZHONG Y, RANNARB L E, WIKMAN S, et al. Additive Manufacturing of ITER First Wall Panel Parts by Two Approaches: Selective Laser Melting and Electron Beam Melting[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2017, 116: 24-33.
- [9] HERZOG D, SEYDA V, WYCISK E, et al. Additive Manufacturing of Metals[J]. *Acta Materialia*, 2016, 117: 371-392.
- [10] 郭绍庆, 刘伟, 黄帅, 等. 金属激光增材制造技术发展研究[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(3): 56-62.
GUO Shao-qing, LIU Wei, HUANG Shuai, et al. Research on the Development of Metal Laser Additive Manufacturing Technology[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(3): 56-62.
- [11] SÜMER S, MUSTAFA Ü. A Review on the Potential Use of Austenitic Stainless Steels in Nuclear Fusion Reactors[J]. *Journal of Fusion Energy*, 2008, 27(4): 271-277.
- [12] 王龙, 李学军. 核电用 316L 不锈钢零部件电弧增材制造工艺[J]. *焊接技术*, 2022, 51(4): 45-48.
WANG Long, LI Xue-jun. Arc Additive Manufacturing Process of 316L Stainless Steel Parts for Nuclear Power[J]. *Welding Technology*, 2022, 51(4): 45-48.
- [13] 孙全平, 梁元凯, 冯春梅, 等. 316 不锈钢选区激光熔化成形工艺优化[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(16): 65-68.
SUN Quan-ping, LIANG Yuan-kai, FENG Chun-mei, et al. Optimization of Selective Laser Melting Forming Technology for 316 Stainless Steel[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(16): 65-68.
- [14] PACE M L, GUARNACCIO A, DOLCE P, et al. 3D Additive Manufactured 316L Components Microstructural Features and Changes Induced by Working Life Cycles[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 418: 437-445.
- [15] MOWER T M, LONG M J. Mechanical Behavior of Additive Manufactured, Powder-Bed Laser-Fused Materials[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 651: 198-213.
- [16] 卢秉恒. 增材制造技术——现状与未来[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(1): 19-23.
LU Bing-heng. Additive Manufacturing Technology—Present and Future[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(1): 19-23.
- [17] 曾绍连. 金属增材制造技术的研究进展[J]. *中国金属通报*, 2022(4): 186-188.

- ZENG Shao-lian. Research Progress of Metal Additive Manufacturing Technology[J]. China Metal Bulletin, 2022(4): 186-188.
- [18] 姚妮娜, 彭雄厚. 增材制造金属粉体的制备方法[J]. 四川有色金属, 2013(4): 48-51.
YAO Ni-na, PENG Xiong-hou. Method for Preparing Metal Powder for Additive Manufacturing[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2013(4): 48-51.
- [19] 何杰, 马士洲, 张兴高, 等. 增材制造用金属粉末制备技术研究现状及展望[J]. 机械工程材料, 2020, 44(11): 46-52.
HE Jie, MA Shi-zhou, ZHANG Xing-gao, et al. Research Status and Prospect of Metal Powder Preparation Technology for Additive Manufacturing[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(11): 46-52.
- [20] 覃思思, 余勇, 曾归余, 等. 3D 打印用金属粉末的制备研究[J]. 粉末冶金工业, 2016, 26(5): 21-24.
QIN Si-si, YU Yong, ZENG Gui-yu, et al. Research on The Preparation of Metal Powder for 3D Printing[J]. Powder Metallurgy Industry, 2016, 26(5): 21-24.
- [21] 张雪良, 陶宇, 贾建, 等. 电极感应熔化气体雾化制粉工艺气体流场模拟研究[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(4): 8-16.
ZHANG Xue-liang, TAO Yu, JIA Jian, et al. Simulation of Gas Flow Field in Electrode Induction Melting Gas Atomization Pulverizing Process[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(4): 8-16.
- [22] 朱盼星, 石生荷, 杨剑, 等. 气体雾化技术制备金属粉末研究综述[J]. 粉末冶金工业, 2021, 31(4): 82-87.
ZHU Pan-xing, SHI Sheng-he, YANG Jian, et al. A Review of Research on Preparation of Metal Powders by Gas Atomization Technology[J]. Powder Metallurgy Industry, 2021, 31(4): 82-87.
- [23] 王超宁. 电子束 3D 打印铺粉系统及不锈钢粉末成形工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 6-7.
WANG Chao-niang. The Research on the Laying Power System of Electron Beam 3D Printing and the Process of Stainless Steel Powder Forming[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, China, 2016: 6-7.
- [24] 王建军. 中国雾化制粉技术现状简介[J]. 粉末冶金工业, 2016, 26(5): 1-4.
WANG Jian-jun. A Brief Introduction to the Current Situation of Atomization and Milling Technology in China[J]. Powder Metallurgy Industry, 2016, 26(5): 1-4.
- [25] 倪国龙. 高压气雾化法高氮钢粉末的制备及 SLM 成形基础研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2021: 13-16.
NI Guo-long. Preparation of High Nitrogen Steel Powder by High Pressure Gas Atomization and Basic Research on SLM Forming[D]. Tangshan: North China University of Technology, 2021: 13-16.
- [26] 董世运, 闫世兴, 冯祥奕, 等. 激光增材制造钢粉体材料研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011407.
DONG Shi-yun, YAN Shi-xing, FENG Xiang-yi, et al. Research Status of Steel Powder Materials for Laser Additive Manufacturing[J]. Advances in Lasers and Optoelectronics, 2018, 55(1): 011407.
- [27] 马乐, 贾庆功, 李扬扬, 等. PREP 设备雾化室直径与粉末熔滴冷却结晶匹配研究[J]. 中国设备工程, 2019(17): 173-175.
MA Le, JIA Qing-gong, LI Yang-yang, et al. Research on Matching Between Diameter of Atomizing Chamber of PREP Equipment and Cooling Crystallization of Powder Droplets[J]. China Equipment Engineering, 2019(17): 173-175.
- [28] 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.
HAN Shou-bo, ZHANG Yi-wen, TIAN Xiang-jun, et al. Research and Application of High-Quality 3D Printing Metal Powder for Aerospace[J]. Powder Metallurgy Industry, 2017, 27(6): 44-51.
- [29] 吴文恒, 吴凯琦, 肖逸凡, 等. 气雾化压力对 3D 打印用 316L 不锈钢粉末性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2017, 35(2): 83-88.
WU Wen-heng, WU Kai-qi, XIAO Yi-fan, et al. Influence of Gas Atomization Pressure on Properties of 316L Stainless Steel Powder for 3D Printing[J]. Powder Metallurgy Technology, 2017, 35(2): 83-88.
- [30] 马青原, 杜沛南, 彭英博, 等. 金属增材制造技术在核工业领域的应用与发展[J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(1): 86-94.
MA Qing-yuan, DU Pei-nan, PENG Ying-bo, et al. Application and Development of Metal Additive Manufacturing Technology in Nuclear Industry[J]. Powder Metallurgy Technology, 2022, 40(1): 86-94.
- [31] 杨延华. 增材制造(3D 打印)分类及研究进展[J]. 航空工程进展, 2019, 10(3): 309-318.
YANG Yan-hua. The Classification and Research Progress of Additive Manufacturing (3D Printing)[J]. Aeronautical Engineering Progress, 2019, 10(3): 309-318.
- [32] 王沛, 黄正华, 戚文军, 等. 基于 SLM 技术的 3D 打印工艺参数对 316 不锈钢组织缺陷的影响[J]. 机械制造文摘: 焊接分册, 2016(2): 2-7.
WANG Pei, HUANG Zheng-hua, QI Wen-jun, et al. Influence of 3D Printing Process Parameters Based on SLM Technology on Microstructure Defects of 316 Stainless Steel[J]. Machinery Manufacturing Digest: Welding Volume, 2016(2): 2-7.
- [33] KAMATH C, EL-DASHER B, GALLEGOS G F, et al. Density of Additively Manufactured, 316L SS Parts Using Laser Powder-Bed Fusion at Powers up to 400 W[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(1/2/3/4): 65-78.
- [34] 尹燕, 蔡伟军, 肖梦智, 等. 扫描方式对激光选区熔化成形 316L 组织和性能的影响[J]. 应用激光, 2018, 38(3): 339-344.
YIN Yan, CAI Wei-jun, XIAO Meng-zhi, et al. Influ-

- ence of Scanning Mode on Microstructure and Properties of Laser Selective Melting Forming 316L[J]. Applied Laser, 2018, 38(3): 339-344.
- [35] 袁宏, 何戈宁, 李磊, 等. 3D 打印技术在核电领域的发展应用情况综述[J]. 科技视界, 2020(17): 118-122.
YUAN Hong, HE Ge-ning, LI Lei, et al. A Review of the Development and Application of 3D Printing Technology in the Field of Nuclear Power[J]. Science and Technology Vision, 2020(17): 118-122.
- [36] 齐海波, 林峰, 颜永年. 316L 不锈钢粉末的电子束选区熔化成形[J]. 清华大学学报, 2007, 47(11): 1941-1944.
QI Hai-bo, LIN Feng, YAN Yong-nian. Electron Beam Selective Melting of 316L Stainless Steel Powder[J]. Journal of Tsinghua University, 2007, 47(11): 1941-1944.
- [37] 郭超, 林峰, 葛文君. 电子束选区熔化成形 316L 不锈钢的工艺研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(21): 152-158.
GUO Chao, LIN Feng, GE Wen-jun. Study on the Fabrication Process of 316L Stainless Steel via Electron Beam Selective Melting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(21): 152-158.
- [38] 张向东, 马文娟, 莫力林. 316L 粉末电子束熔化成形的熔合机制的研究[J]. 粉末冶金工业, 2020, 30(5): 55-59.
ZHANG Xiang-dong, MA Wen-juan, MO Li-lin. Study on Fusion Mechanism of 316L Powder Electron Beam Melting[J]. Powder Metallurgy Industry, 2020, 30(5): 55-59.
- [39] WANG C C, TAN X P, LIU E J, et al. Process Parameter Optimization and Mechanical Properties for Additively Manufactured Stainless Steel 316L Parts by Selective Electron Beam Melting[J]. Materials & Design, 2018, 147: 157-166.
- [40] 杨永强, 翁昌威, 周权, 等. 316L 不锈钢等离子增材制造工艺与尺寸预测模型研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(15): 31-38.
YANG Yong-qiang, WENG Chang-wei, ZHOU Quan, et al. Research on The Process and Prediction Model for Size of 316L Stainless Steel Fabricated by Plasma Arc Additive Manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(15): 31-38.
- [41] ULLAH A Z, YASIR K M, EHTSHAM U R, et al. A Review on Laser Cladding of High-Entropy Alloys, Their Recent Trends and Potential Applications[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 225-273.
- [42] YANG Y H. Analysis of Classifications and Characteristic of Additive Manufacturing (3D Print)[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(3): 309-318.
- [43] 李文扬. 增材制造技术与产业的发展及前景分析[J]. 现代经济信息, 2020(6): 170-173.
LI Wen-yang. Development and Prospect Analysis of Additive Manufacturing Technology and Industry[J]. Modern Economic Information, 2020(6): 170-173.
- [44] SUN L B, JIANG F C, HUANG R S, et al. Anisotropic Mechanical Properties and Deformation Behavior of Low-Carbon High-Strength Steel Component Fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 787(10): 139514.
- [45] 董博伦, 柏久阳, 林三宝, 等. 激光/电弧增材制造金属的热处理工艺研究现状与发展[J]. 焊接, 2016(4): 17-22.
DONG Bo-lun, BAI Jiu-yang, LIN San-bao, et al. Research Status and Development of Heat Treatment Technology for Laser/Arc Additive Manufacturing of Metals[J]. Welding & Joining, 2016(4): 17-22.
- [46] 林基伟. 选区激光熔化成形 316L 不锈钢氢/辐照损伤及其耦合效应研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020: 15-16.
LIN Ji-wei. Research on Hydrogen/Irradiation Damage and Its Coupling Effect of 316L Stainless Steel Formed by Selective Laser Melting[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020: 15-16.
- [47] SONG M, WANG M, LOU X Y, et al. Radiation Damage and Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking of Additively Manufactured 316L Stainless Steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2019, 513: 33-44.
- [48] SANDER G, THOMAS S, CRUZ V, et al. On the Corrosion and Metastable Pitting Characteristics of 316L Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2017, 164(6): C250-C257.
- [49] LOU X Y, MIAO S M, PAUL W E, et al. On the Stress Corrosion Crack Growth Behaviour in High Temperature Water of 316L Stainless Steel Made by Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing[J]. Corrosion Science, 2017, 128:140-153.
- [50] ELANGESWARAN C, CUTOLO A, MURALIDHARAN G K, et al. Microstructure Analysis and Fatigue Crack Initiation Modelling of Additively Manufactured 316L after Different Heat Treatments[J]. Materials & Design, 2020, 194: 108962.
- [51] 吕稀, 王云鹏, 王曦, 等. 热处理对增材制造核用不锈钢微观结构的影响[J]. 精密成形工程, 2022, 14(7): 77-85.
LYU Xi, WANG Yun-peng, WANG Xi, et al. Effect of Heat Treatment on the Microstructure of Nuclear Stainless Steel Fabricated by Additive Manufacturing[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(7): 77-85.
- [52] WILLIAM C, ARTEM A, DAVID H, et al. Development of Additive Manufacturing at Westinghouse[C]// Top Fuel, Seattle, 2019: 760.
- [53] 付崇龙, 李健健, 白菊菊, 等. 增材制造 316L 不锈钢辐照硬化行为的温度效应研究[J]. 核技术, 2022, 45(9): 27-36.
FU Chong-long, LI Jian-jian, BAI Ju-ju, et al. Temperature Effect Study on Irradiation-Hardening Behavior of 316L Stainless Steel in Additive Manufacturing[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(9): 27-36.
- [54] 孙翔宇. 选区激光熔化成形 316L 不锈钢的离子辐照

- 损伤效应研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 28-41.
- SUN Xiang-yu. Ion Radiation Damage Effect of 316L Stainless Steels Fabricated by Selective Laser Melting[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019: 28-41.
- [55] 邓话, 秦国鹏. 核燃料零部件的金属增材制造技术研发[J]. 燃料循环, 2020, 13(6): 769-773.
- DENG Hua, QIN Guo-peng. Research and Development of Metal Additive Manufacturing Technology for Nuclear Fuel Components[J]. Fuel Cycle, 2020, 13(6): 769-773.
- [56] LIANG Zheng-qiang, YIN Zhen-guo, LI Xin-yue. Research and Development of CN-101 Radioactive Source[J]. Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 2010(1): 181.
- [57] 赵金福, 崔玉琴. 热处理温度对奥氏体不锈钢碳化物形态、强度及腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 1992(8): 31-34.
- ZHAO Jin-fu, CUI Yu-qin. Effect of Heat Treatment Temperature on Carbide Morphology, Strength and Corrosion Properties of Austenitic Stainless Steel[J]. Metal Heat Treatment, 1992(8): 31-34.
- [58] 崔占金, 孙正国. 工程材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 101.
- CUI Zhan-jin, SUN Zheng-guo. Engineering Materials[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003: 101.
- [59] 蒋华臻, 房佳汇钰, 陈启生, 等. 激光选区熔化成形 316L 不锈钢工艺、微观组织、力学性能的研究现状[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 1402804.
- JIANG Hua-zhen, FANG Jia-hui-yu, CHEN Qi-sheng, et al. Research Status of Laser Selective Melting Forming 316L Stainless Steel Technology, Microstructure and Mechanical Properties[J]. Chinese Laser, 2022, 49(14): 1402804.
- [60] ZHANG B, LI Y T, BAI Q. Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 515-527.
- [61] SAEIDI K, GAO X, LOFAJ F, et al. Transformation of Austenite to Duplex Austenite-Ferrite Assembly in Annealed Stainless Steel 316L Consolidated by Laser Melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 633: 463-469.
- [62] CHAO Q, CRUZ V, THOMAS S, et al. On the Enhanced Corrosion Resistance of A Selective Laser Melted Austenitic Stainless Steel[J]. Scripta Materialia, 2017, 141: 94-98.
- [63] 国外核工业领域 3D 打印技术应用[EB/OL]. (2021-04-08)[2022-09-22]. <http://www.scjg.gov.cn/news/5097.html>.
- Application of 3D Printing Technology in Foreign Nuclear Industry[EB/OL]. (2021-04-08)[2022-09-22]. <http://www.scjg.gov.cn/news/5097.html>, 2021-04-08/2022-09-22.

责任编辑: 蒋红晨