

Inconel625 及其去 Mo 和 Alloy686 粉末激光熔凝性能研究

王进才¹ 霍晓阳¹ 李雷² 樊贝贝¹ 米国发¹
(1.河南理工大学材料科学与工程学院; 2.上海电机学院材料学院)

摘要 为延长 20G 高压锅炉管的使用寿命,采用激光熔凝技术在 20G 钢板表面制备了 Inconel625 及其去 Mo 和 Alloy686 镍基合金粉末的熔凝层,研究了 3 种镍基合金对激光熔凝层微观组织、硬度、抗拉强度,及 550 ℃ 时高温耐腐蚀性能的影响。结果表明,Inconel625 的晶粒更集中偏向<001>方向,其次是 Inconel625 去 Mo 的晶粒,Alloy686 合金的晶粒虽有部分偏向于<101>方向,但主要方向还是<001>方向且晶粒大小更均匀。另外,Alloy686 合金的硬度和抗拉强度最高,耐腐蚀性能最好,但塑性最差,伸长率只有 10.8%。综合考虑,Inconel625 熔凝层最适用于制备锅炉管的耐腐蚀层。

关键词 激光熔凝;晶粒取向;抗拉强度;耐腐蚀性能

中图分类号 TG456.7 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.10.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Laser Melting Solidification Properties of Inconel625, Mo-free Inconel625 and Alloy686 powders

Wang Jincai¹, Huo Xiaoyang¹, Li Lei², Fan Beibei¹, Mi Guofa¹
(1.School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University;
2.Institute of Materials, Shanghai Dianji University)

Abstract: In order to improve the service life of 20G high pressure boiler tube, the melting-solidified layer of Inconel625, Mo-free Inconel625 and Alloy686 nickel-base alloy powder was prepared on the surface of 20G steel plate by laser melting solidification. Effects of nickel-based alloys on microstructure, hardness, tensile strength and high temperature corrosion resistance of laser melting-solidified layer at 550 ℃ were investigated. The results indicate that the grain size of Inconel625 is inclined to concentrate to <001> direction, followed by the grain of Mo-free Inconel625. The grain size of Alloy686 is partial inclined to <101> direction, however, the primary direction is <001> direction with homogeneous grain. The hardness, tensile strength and corrosion resistance of Alloy686 are optimal, while the plastic toughness is the worst, where the elongation is only 10.8%. After overall consideration, melting-solidified layer of Inconel625 is most suitable for the corrosion resistant layer of boiler tube.

Key Words: Laser Melting Solidification, Grain Orientation, Tensile Strength, Corrosion Resistance

在我国,垃圾焚烧发电已逐渐取代传统的垃圾填埋,成为主要的垃圾处理方式之一。但与火力发电不同,垃圾焚烧时产生的烟气含有大量的氯化物和硫化物,对锅炉管的腐蚀远大于火力发电,常造成锅炉泄露等事故^[1,2]。为延长锅炉管的使用寿命,常在管壁外表面堆焊一层耐腐蚀的 Inconel625 镍基合金^[3~5]。但常用的 TIG/MIG 堆焊^[6~9]技术因对基体的热输入量过大,导致堆焊层中 Fe 稀释率高达 5%~15%,而 Fe 在熔凝层中的富集会大幅度降低 Inconel625 合金的高温

耐腐蚀性,且堆焊法的残余热应力很大,大面积熔凝时会造成工件应力场分布极不均匀而导致翘曲变形,甚至开裂。激光熔凝技术通过在基体表面以冶金结合的形式熔化凝固功能层,具有稀释率低、晶粒细小、组织均匀致密、基体热影响区小、厚度可控等特点^[10,11]。采用激光熔凝技术在 20G 表面制备 Inconel625 熔凝层,保证熔凝层与基材冶金结合的前提下,严格控制熔凝层的厚度与稀释率,能使高温腐蚀环境下的工件使用寿命极大地延长。另外,激光功率与速度不匹配时,会在复合层

收稿日期:2022-01-25;修改稿收到日期:2022-02-27
基金项目:上海市科委“科技创新行动计划”重大专项基金资助项目(19511105402)
第一作者简介:王进才,男,1996 年出生,硕士研究生,河南焦作(454000),E-mail:1933625054@qq.com
通信作者:李雷,男,1975 年出生,教授,上海(200240),E-mail:lilei1975@163.com
引用格式:王进才,霍晓阳,李雷,等. Inconel625 及其去 Mo 和 Alloy686 粉末激光熔凝性能研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(10):1 256-1 262.
WANG J C, HUO X Y, LI L, et al. Laser melting solidification properties of Inconel625, Mo-free Inconel625 and alloy686 powders[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(10):1 256-1 262.

内产生气孔^[12], Inconel625 合金的熔凝工艺参数对熔凝层的组织和性能有很大影响^[13]。

常用的 Inconel625 合金因硬度较低,在使用过程中无法有效防止烟气的冲刷腐蚀,使锅炉管的腐蚀速率加快。Alloy686 是在 Inconel625 的基础上加入适量的 W、Si 等元素进行组元间的合金化,生成耐磨硬质相,在满足耐腐蚀性能的前提下提高了材料的硬度及其耐磨性能^[14]。Alloy686 合金中含有较多的 Mo,而 W、Mo 因热导率较高,室温下分别为 173 W/(m·K)和 138 W/(m·K),因此,该熔凝合金具有较高的热导率,对提高传热效率、降低管排熔凝层表面温度、提高耐腐蚀性较好。虽然 Inconel625 和 Alloy686 两种镍基材料在锅炉管耐腐蚀方面都能满足使用需求,但其成本太高,而采用 Inconel625 去 Mo 镍基粉末作为管排的耐腐蚀熔凝层,将 Inconel625 中价格昂贵的 Mo 去除来降低成本,但会降低熔凝层的耐腐蚀性能。鉴于此,本课题研究在 20G 表面激光熔凝 Inconel625 及其去 Mo、Alloy686 镍基合金,通过对熔凝层的微观组织、力学性能、耐腐蚀性能的比较,来寻求 3 种镍基合金粉末的最佳使用条件。

1 试验材料与方法

采用 Laser-6000W 型激光器进行激光熔凝,基材尺寸为 200 mm×150 mm×12 mm 的 20G 钢板,熔凝材料为 Inconel625、Inconel625 去 Mo、Alloy686 等 3 种高温镍基合金气雾化球形粉末,图 1 为 3 种合金粉末的粒度及形貌,化学成分见表 1。从图 1a 和图 1c 看出, Inconel625 与 Alloy686 粉末尺寸都在 45~135 μm 之

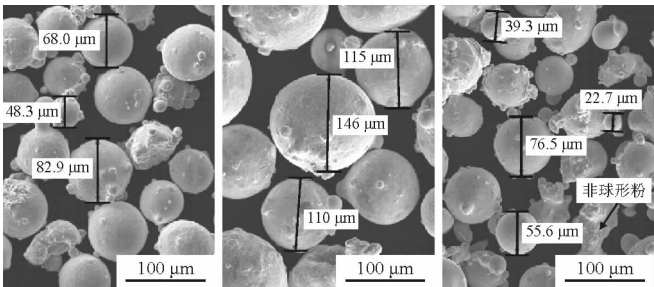


图 1 3 种合金粉末粒度及形貌

Fig.1 Particle size and morphology of powder

表 1 3 种镍基合金粉末化学成分

Tab.1	Chemical composition of nickel-based alloys powder										%
合金	w _B										
	C	Mn	Mo	Si	Nb	Ti	Cr	Co	Fe	W	Ni
Inconel625	0.035	0.15	9.56	0.3	3.8	0.15	22	0.03	1.5	—	余量
Inconel625 去 Mo	0.035	0.15	—	0.3	3.8	0.15	22	0.03	1.5	—	余量
Alloy686	0.01	<0.1	16	0.9	—	0.02	21	—	<0.1	4	余量

间,而 Inconel625 去 Mo 合金粉末的尺寸为 70~150 μm 见图 1b。对单颗粉末表面进行观察,发现表面存在粘附的卫星粉末及不平凸起,特别是 Alloy686 粉末中存在非球形粉,这类粉末的存在在一定程度上影响了合金的流动性及成形品质,存在潜在的缺陷,见图 1c。

对 20G 钢板进行超声清洗,用无水乙醇擦洗并干燥。将粉末置于真空干燥箱内在 140 ℃干燥 2 h。采用氩气作为载流气体和保护气,载流气为 4 L/min。激光器焦距 W_{DH}=278 mm,圆形光斑直径为 4.0 mm,搭接率为 67.5%。通过工艺参数试验,获得无裂纹、气孔等缺陷的熔凝层。

用线切割沿垂直于激光头运动方向截取试样,得到 10 mm×10 mm×13 mm 熔凝层试样,试样打磨抛光后,利用 HXD-1000TMC/LCD 显微硬度计测量试样横截面显微硬度,加载载荷为 2 N,保压时间为 10 s;利用 MTS 拉伸试验机测试熔凝试样的抗拉强度,拉伸试样的尺寸见图 2。采用模拟腐蚀环境的熔盐腐蚀法,将熔凝层用线切割机切出 20 mm×10 mm×3 mm 的试样,放置在 ZnCl₂、KCl、CaCl₂、Na₂SO₄ 质量比为 2:2:3:3 的盐粉末中,并在 550 ℃的马弗炉中保温 360 h,腐蚀后使用解胶剂浸泡并超声波清洗去除腐蚀试样表面粘结的杂质,测量腐蚀前后的质量损失率,每种熔凝层测 3 个试样取平均值,腐蚀结果见表 2。利用 HITACHI S3400N 扫描电镜测试熔凝层的厚度、Fe 稀释率、拉伸试样的断口形貌和腐蚀试样的腐蚀形貌特征。并采用 10% 的高氯酸乙醇溶液进行电解抛光,电压为 20 V,电解时间为 20 s,进行 EBSD 测试,观察熔凝层中晶粒的大小及取向。

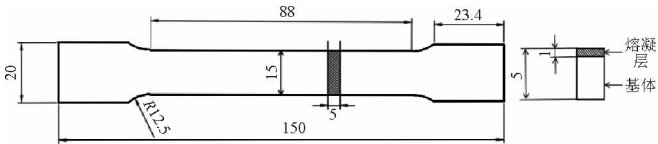


图 2 拉伸试样

Fig.2 Dimension of tensile specimen

表 2 试样腐蚀前后质量变化

Tab.2 Weight variation of specimens before and after corrosion				
材料	腐蚀前 质量/g	腐蚀后 质量/g	质量损失/ g	质量损失 率/%
20G	3.821 5	0	3.821 5	100
Inconel625	4.581 8	4.135 1	0.446 7	9.75
Inconel625 去 Mo	4.011 5	2.726 9	1.284 6	32.02
Alloy686	4.395 4	4.024 9	0.370 5	8.43

2 试验结果与分析

2.1 激光熔凝参数及宏观形貌

熔凝时发现,采用单层熔凝时难以控制熔凝层中

Fe 稀释率在 5% 以下, 故采用双层熔凝工艺。先熔凝 0.5 mm 的底层, 再熔凝 0.5~0.7 mm 厚的面层, 既保证熔凝层的厚度又确保面层较低的稀释率。图 3 为 Inconel625 及其去 Mo 和 Alloy686 合金的熔凝层宏观形貌。对比发现, Alloy686 熔凝时所需的能量密度最大, 这是因为 Alloy686 粉末中含有较多的 W、Mo 等高熔点元素, 而 Inconel625 去 Mo 虽然高熔点的元素较少, 但因粉末粒径相对较大, 所需的能量密度也较高, 图 4 为对熔凝层进行着色探伤后的图片。可以发现, 熔凝层表面探伤后无裂纹、无气孔, 宏观形貌较好。

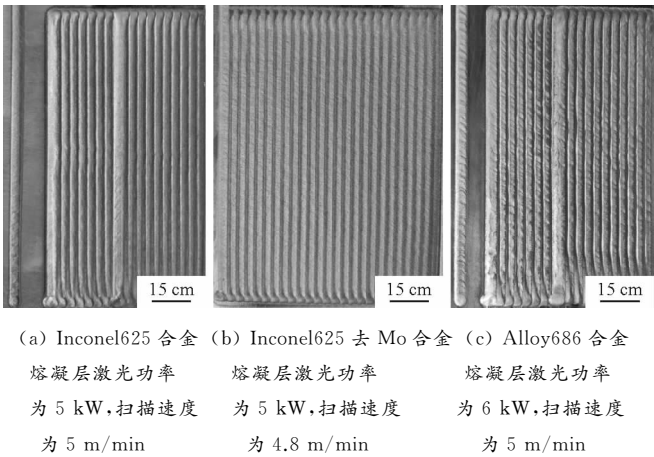
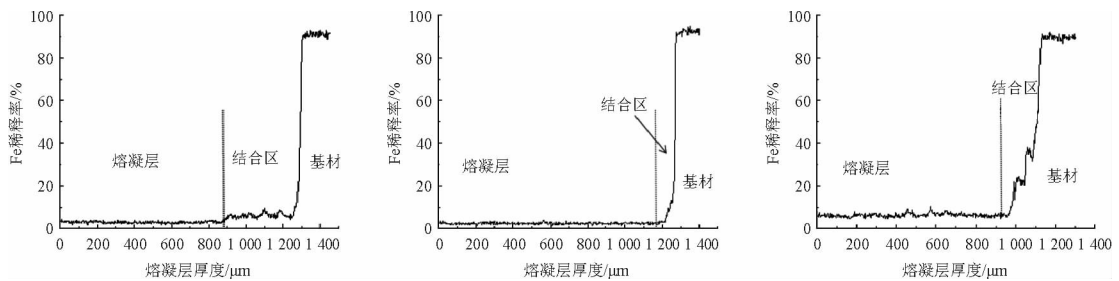


图 3 熔凝层宏观形貌

Fig.3 Macro morphologies of melting-solidified layer



(a) Inconel625 合金熔凝层 (b) 去 Mo 的 Inconel625 合金熔凝层 (c) Alloy686 合金熔凝层
图 5 3 种合金熔凝层中 Fe 的稀释率

Fig.5 Dilution rate of Fe element in melting-solidified layer of three kinds of alloys

表明激光熔凝时能量密度稍大, 可适当降低功率或提高熔凝速度。

2.2 微观组织特征分析

图 6~图 8 分别为 Inconel625 及其去 Mo 和 Alloy686 合金熔凝层的 EBSD 晶粒及晶粒取向图。从图 6a 可以看出, Inconel625 合金熔凝层晶粒大小相差较大, 范围在 20~200 μm 之间, 晶粒平均尺寸为 114.027 μm 。从图 6b 可以看出, 晶粒取向几乎全偏向 $\langle 001 \rangle$ 方向, 这是因为镍基合金作为面心立方的晶体结构, 晶粒生长择优取向为 $\langle 001 \rangle$ 方向。从图 7a 看出, Inconel625 去 Mo 合金晶粒更多呈窄条状, 晶粒平均尺寸为 96.865 4 μm , 细小的晶粒明显增多, 这是因为熔凝时

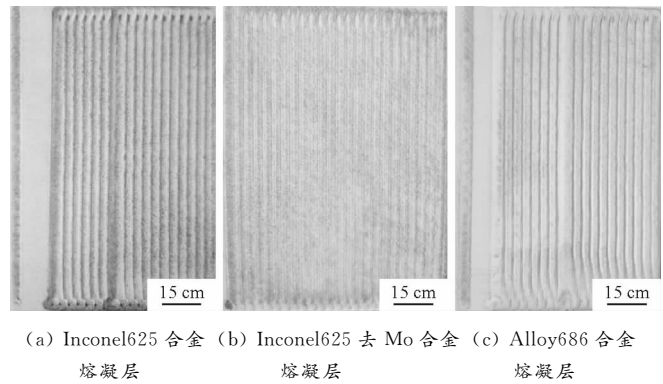
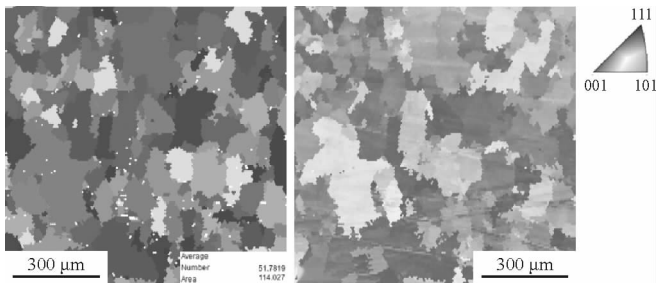


图 4 熔凝层着色探伤

Fig.4 Tinting flaw detection of melting-solidified layer

因 Fe 含量过高处容易被腐蚀而形成腐蚀源, 导致熔凝层的耐腐蚀性降低, 因此, 激光熔凝过程中要严格控制 Fe 稀释率在 5% 以下。采用 EDS 线扫描从熔凝层顶端到基材处进行 Fe 的稀释率测试, 见图 5。从图 5a 可以看出, 在熔凝层厚度为 800~1 200 μm 的结合区, Fe 稀释率在 8% 左右, 表明在结合处熔凝层与基材具有良好的冶金结合; 从图 5b 看出, 在 1 200~1 300 μm 处 Fe 含量逐渐升高, 表明去 Mo 的 Inconel625 合金熔凝层与基材冶金结合区厚度较小; 从图 5c 可以看出, Alloy686 合金熔凝层在 950~1 100 μm 时有过渡区域, 表明熔凝层与基材冶金结合较好, 但熔凝层在 0~950 μm 处 Fe 的稀释率为 6%~7%, 稀释率稍高,

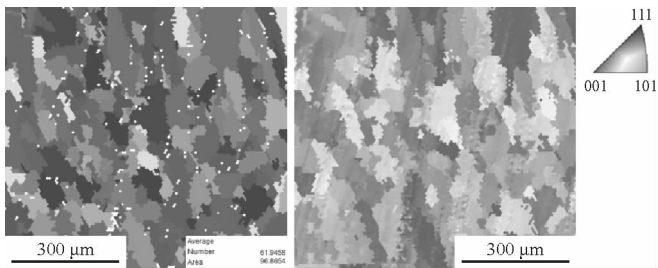
能量密度较高, 其熔池凝固过程中温度梯度更大, 形核率更高, 晶粒来不及长大就被优先生长方向的晶粒截断, 最终冷却后形成很多细小的晶粒^[15]。从图 7b 来看, 晶粒取向仍偏向于 $\langle 001 \rangle$ 方向, 有很小部分开始偏向 $\langle 101 \rangle$ 方向。从图 8a 可以看出, Alloy686 合金熔凝层的晶粒较均匀, 晶粒平均尺寸为 106.429 μm , 晶粒取向虽然主要偏向 $\langle 001 \rangle$ 方向, 但与 Inconel625 和 Inconel625 去 Mo 合金熔凝层相比, 有较多的晶粒开始偏向 $\langle 101 \rangle$ 方向, 这是因为 Alloy686 合金熔凝时能量密度最高, 熔凝层内含有较大的能量, 导致晶粒内部能量较高, 故晶粒开始偏向表面能更高的 $\langle 101 \rangle$ 方向。而 $\langle 001 \rangle$ 方向晶粒的腐蚀速率小于 $\langle 101 \rangle$ 方向的,



(a) 晶粒 (b) 晶粒取向

图 6 Inconel625 熔凝层 EBSD 晶粒及晶粒取向

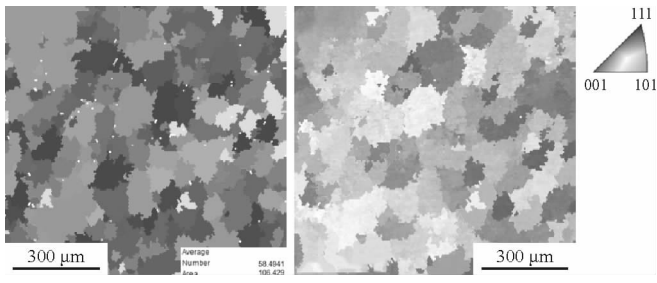
Fig.6 EBSD grains and grain orientation of melting-solidified layer in Inconel625



(a) 晶粒 (b) 晶粒取向

图 7 Inconel625 去 Mo 熔凝层 EBSD 晶粒及晶粒取向

Fig.7 EBSD grains and grain orientation of melting-solidified layer in Mo-free Inconel625



(a) 晶粒 (b) 晶粒取向

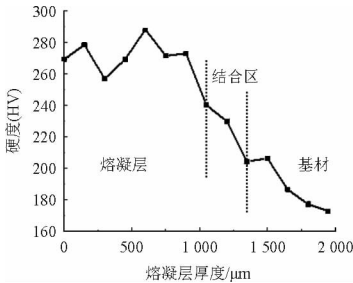
图 8 Alloy686 熔凝层 EBSD 晶粒及晶粒取向

Fig.8 EBSD grains and grain orientation of melting-solidified layer in Alloy686

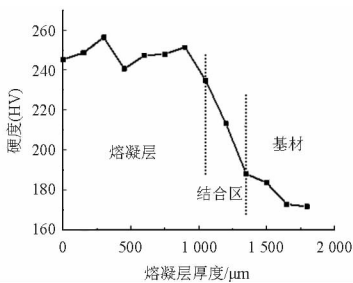
仅从晶粒取向来看,熔凝层的晶粒越偏向于<001>方向,耐腐蚀性能更好。

2.3 显微硬度分布

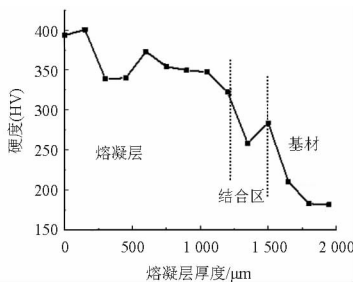
硬度测试从熔凝层最外层开始直至基体,每隔 150 μm 测试一个点,结果见图 9。可以看出,Inconel625 合金硬度熔凝层硬度(HV)为 256.6~288,均值为 268.1; Inconel625 去 Mo 合金熔凝层硬度(HV)为 234.9~256.3,均值为 246.5; Alloy686 合金熔凝层硬度(HV)为 338.8~400.2,均值为 362.1。Inconel625 合金相比去 Mo 粉末激光熔凝层的硬度更高,因为激光熔凝成形



(a) Inconel625 合金熔凝层



(b) Inconel625 去 Mo 合金熔凝层



(c) Alloy686 合金熔凝层

图 9 3 种合金熔凝层硬度

Fig.9 Hardness of melting-solidified layer of three kinds alloy

过程中冷却速率非常快(约为 10⁶ K/s),提高了 Mo 的固溶度,加强了固溶强化效果^[16]。Alloy686 合金中 W、Si 等元素与其他组元经冶金反应生成硬质相,其硬度较 Inconel625 合金熔凝层提高了 36%。

2.4 力学性能

对 Inconel625 及其去 Mo 和 Alloy686 镍基合金粉末熔凝层的试样进行拉伸试验,拉伸速度为 1 mm/min,拉伸试样应力-应变曲线见图 10。抗拉强度(σ_b)计算如下^[17]:

σ_b = F_m / S₀ (1)

式中,F_m为试样拉伸时的最大拉力;S₀为拉伸试样的原始横截面积,75 mm²。

伸长率(δ)计算如下:

δ = (L_a - L₀) / L₀ × 100 (2)

式中,L_a为试样的断后标距;L₀为试样的原始标距,88 mm;L_a-L₀即试样的应变量。

Inconel625 及其去 Mo 和 Alloy686 镍基合金的力学性能见表 2。通过比较发现,Inconel625 合金熔凝层拉伸试样的塑韧性高于基体且抗拉强度提高了 19.9%,而 Inconel625 去 Mo 合金熔凝层的拉伸试样其塑韧性降低,抗拉强度比基体高 29.5%。Alloy686 合金熔凝层试样的抗拉强度最大,比基体高 33.5%,一是 W、Si 等元素的合金化,生成耐磨硬质相提高了抗拉强度,二是含有很高的强化元素 Mo 固溶在 γ 基体中,导致材料基体的晶格发生畸变,对位错起到束缚和钉扎作用,提高了塑性变形抗力。但 Alloy686 合金熔凝层的伸长率

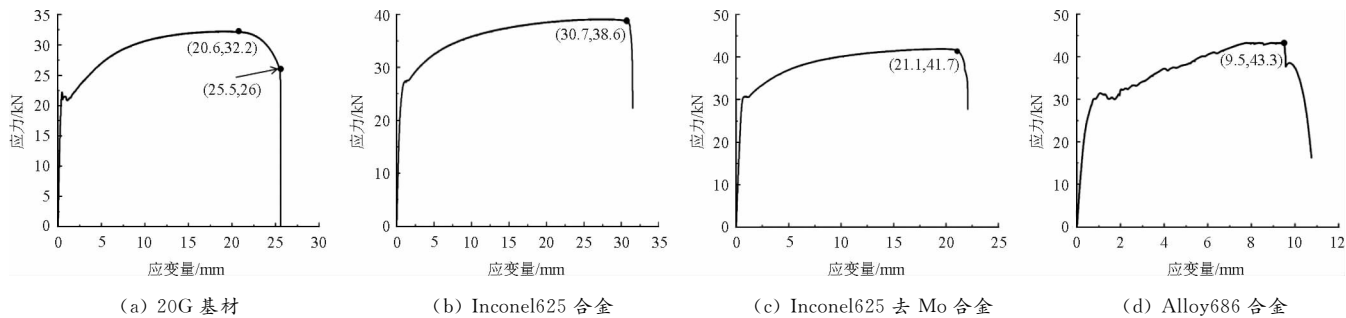


图 10 基材、Inconel625 及其去 Mo 和 Alloy686 合金应力-应变曲线

Fig.10 Stress-strain curves of the matrix, Inconel625, Mo-free Inconel625 and Alloy686 nickel-based alloy

表 2 4 种拉伸试样的力学性能

Tab.2 Mechanical proprtities of four kinds of alloys						
试样	F_m/kN	L_u-L_0/mm	L_0/mm	S_0/mm^2	σ_b/MPa	$\delta/\%$
20G	32.2	25.5	88	75	429.3	30.0
Inconel625	38.6	30.7	88	75	514.7	34.9
Inconel625 去 Mo	41.7	21.1	88	75	556.0	24.0
Alloy686	43.3	9.5	88	75	573.3	10.8

只有 10.8%，这是因为熔凝层先断裂而基材部分还未断开造成的。

4 种试样拉伸断口形貌见图 11。可以看出,20G 基材的断裂面有大量大且深的韧窝存在,呈明显的韧性断裂见图 11a。Inconel625 和 Inconel625 去 Mo 合金熔凝层的断口形貌呈韧窝型,见图 11b 和图 11c,韧窝数目明显增多,分布更加均匀且细小,说明材料在拉伸过程中受力更加均匀。此外,在图 11b 和图 11c 还发现了气孔,是熔凝层内部的缺陷。从图 11d 可看出,Alloy686 合金断口几乎无韧窝的痕迹,但有大量的撕裂棱存在,沿解理面呈明显的脆性断裂,这也是 Alloy686 合金熔

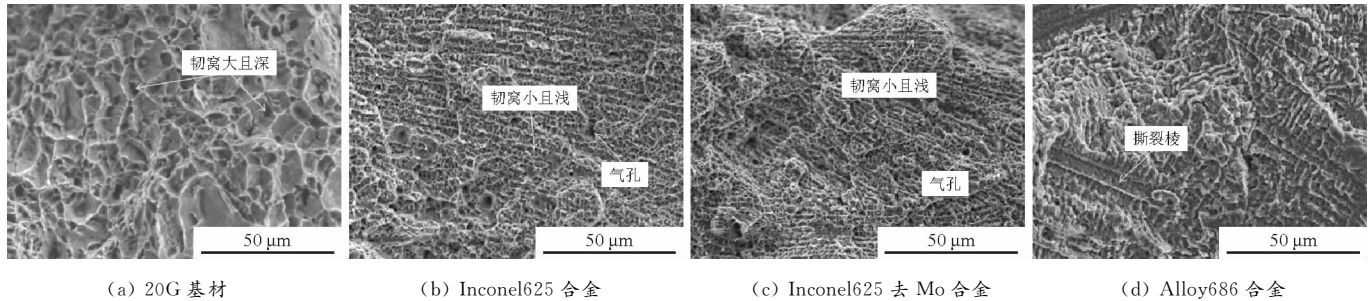


图 11 基材、Inconel625 及其去 Mo 和 Alloy686 合金拉伸试样断口形貌

Fig.11 Fracture morphologies of tensile specimen of the matrix, Inconel625, Mo-free Inconel625 and Alloy686 nickel-based alloy

凝层试样的伸长率只有 10.8% 的原因。4 种试样的断口形貌进一步证实了 3 种镍基合金激光熔凝的抗拉强度比基体有明显的提高,而 Inconel625 去 Mo 和 Alloy686 合金熔凝层的塑性降低。

2.5 耐腐蚀性能

通过比较质量损失率的发现在 550 ℃ 高温腐蚀环境中基材已被完全腐蚀,而 3 种镍基合金熔凝层腐蚀质量损失率最高的是 Inconel625 去 Mo 合金熔凝层(32.02%),这是因为 Inconel625 合金是以 Mo、Nb 为强化元素的固溶强化型 Ni 基变形高温合金,其具有优良的耐腐蚀和抗氧化性能,且耐盐雾气氛下的应力腐蚀,Inconel625 去 Mo 合金耐腐蚀性能会极大降低。腐蚀质量损失率最低的是 Alloy686 合金熔凝层,比 Inconel625 合金熔凝层(9.75%)还低,依照 Alloy686 合金中的 Mo 含量比 Inconel625 高 9.56%,其耐腐蚀性应更好,但实际提升不明显。这是因为在 EBSD 测试中发现 3 种镍基合金粉末的晶粒取向虽然都偏向于<001>

方向,但 Inconel625 合金晶粒取向偏向{001}方向的程度最大,Inconel625 去 Mo 合金其次,Alloy686 合金最低。有研究指出,不同取向晶粒的主动腐蚀速率和穿透腐蚀速率,均遵循{001}<{101}<{111} [18]。总体腐蚀敏感性从具有最低敏感性的{001}面的晶粒到具有最高敏感性的{111}面的晶粒排列,且与合金溶解产生的物质无关,故 Alloy686 合金熔凝层 Mo 含量虽然最高,但晶粒的主动腐蚀速率和穿透腐蚀速率较高,导致其耐腐蚀性能实际提升不明显。

图 12~图 14 为 Inconel625 及其去 Mo 和 Alloy686 镍基合金腐蚀试样的腐蚀形貌及成分分布。从图 12 可以看出,试样熔凝层腐蚀处凹坑较深,凹坑外的区域表面仍较光洁,被腐蚀处的元素主要是 Ni、Cr 元素的富集处,而 Mo、Nb 富集处的腐蚀很轻,且很不规则,主要原因是熔凝层中元素分布不均,一个位置一旦形成腐蚀源,腐蚀产物就会在该处聚集,同时接触面增大,加速了腐蚀的进程。在面腐蚀条件下,局部先发生

点蚀,形成小的腐蚀坑,腐蚀坑逐渐长大,并互相连接,最终形成腐蚀面的整体脱落^[19]。从图 13 可以看出,Inconel625 合金去 Mo 熔凝层表面几乎完全被腐蚀,腐蚀处呈灰色,无光泽,也无明显偏聚,这是因为材料表面腐蚀严重,表面所有元素都被腐蚀掉。从图 14 可以看

出,Alloy686 熔凝层腐蚀凹坑较深,凹坑处有大量疏松的气孔状结构。凹坑处的元素主要是 Ni、Cr、W,而 Mo 含量较高处腐蚀较轻。综合来看,除 Inconel625 去 Mo 熔凝层以外,Inconel625 和 Alloy686 合金熔凝层能完全达到锅炉管对耐腐蚀性能的需求。

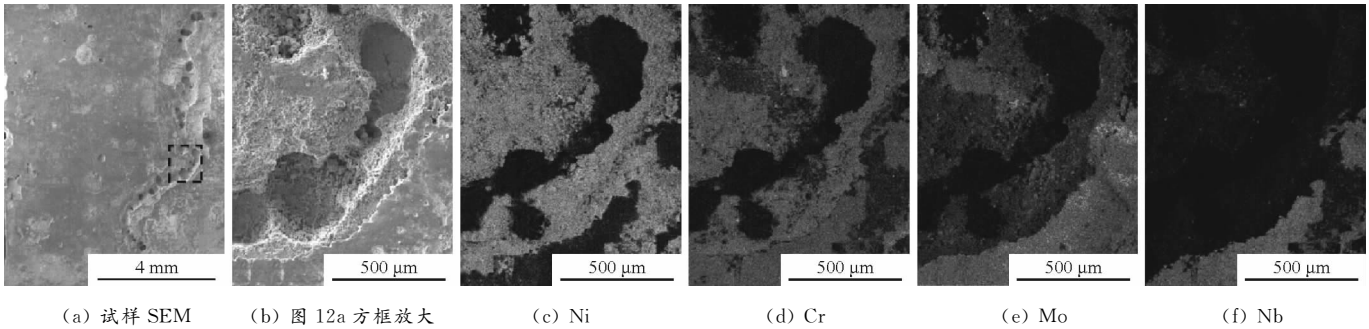


图 12 Inconel625 合金试样腐蚀形貌及成分面扫描分布

Fig.12 Corrosion morphologies and composition face scanning distribution of Inconel625 alloy specimens

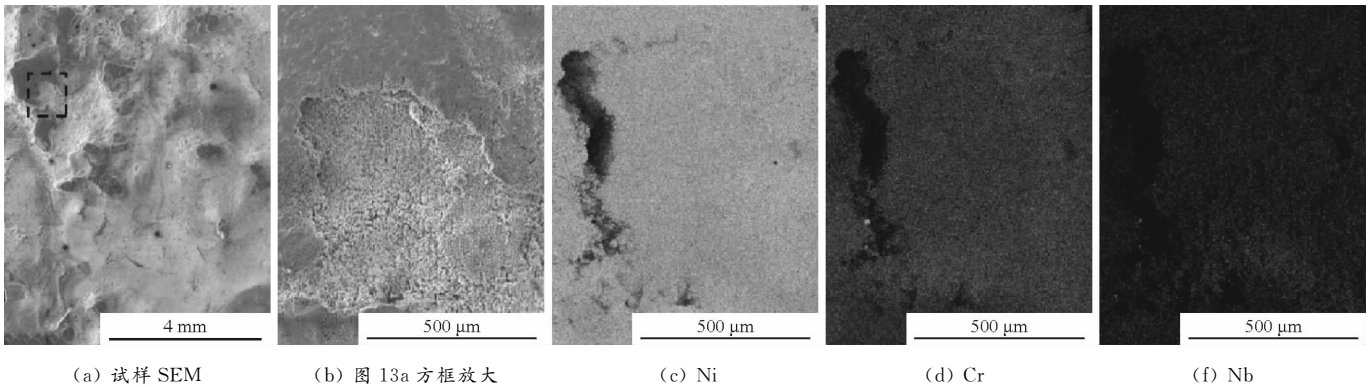


图 13 Inconel625 去 Mo 合金熔凝层试样腐蚀形貌及成分面扫描分布

Fig.13 Corrosion morphologies and composition face scanning distribution of melting-solidified layer in Mo-free Inconel625 alloy

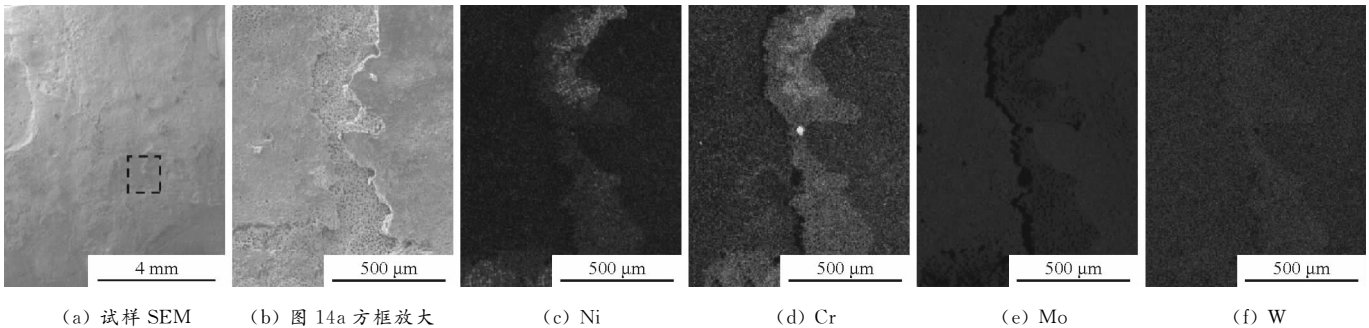


图 14 Alloy686 合金熔凝层腐蚀形貌及成分面扫描分布

Fig.14 Corrosion morphologies and composition surface scanning distribution of melting-solidified layer

3 结 论

(1)Inconel625 和 Inconel625 去 Mo 合金粉末所需的能量密度相近,Alloy686 合金粉末因含有较高的 W、Mo 等高熔点元素,其熔化过程中所需的能量密度最高。Inconel625 去 Mo 熔凝层与基材结合处 Fe 稀释率过渡小,需提高功率;Alloy686 熔凝层中 Fe 的稀释率较高,需降低功率。

(2)Inconel625、Inconel625 去 Mo 合金和 Alloy686 镍基合金熔凝层均为面心立方结构,晶粒生长择优取向为<001>。其中 Inconel625 的晶粒更集中偏向<001>方向,其次是 Inconel625 去 Mo 的晶粒,Alloy686 的晶粒虽有部分偏向于<101>方向,但主要方向还是<001>方向且晶粒大小较均匀。

(3)Inconel625 合金熔凝层的平均硬度 (HV) 为 268.1,Inconel625 去 Mo 熔凝层平均硬度 (HV) 为

246.5,Alloy686 熔凝层平均硬度(HV)为 362.1,比 Inconel625合金熔凝层硬度提高 35.6%。拉伸测试发现,Inconel625、Inconel625 去 Mo、Alloy686 合金熔凝层试样的抗拉强度分别比基体高 19.9%、29.5%、33.5%,但 Alloy686 合金熔凝层试样的伸长率只有 10.8%,远低于基体(30%)。

(4)550 ℃高温腐蚀时,Inconel625、Inconel625 去 Mo 和 Alloy686 合金熔凝层的质量损失率分别是 9.75%、32.02%和 8.43%,Inconel625 去 Mo 合金熔凝层腐蚀凹坑很大。Inconel625 和 Alloy686 合金熔凝层的耐腐蚀性能好,满足锅炉管的使用工况。

参 考 文 献

[1] 张鸿武,冯楠楠,陈阳. 锅炉高温过热器管失效分析[J]. 中国铸造装备与技术, 2021, 56(3): 69-72.

[2] 赵敏,张建平,李伟. 锅炉高温过热器炉管爆管失效原因分析及预防控制[J]. 金属热处理, 2019, 44(S1): 343-347.

[3] ALEKSANDRA K, TOMASZ P, DAMIAN J. Characterization of the structure, mechanical properties and erosive resistance of the laser clad Inconel 625-based coatings reinforced by TiC particles [J]. Materials, 2021, 14(9): 2 225-2 230.

[4] MOHAMMADIAN N, TURENNE S, BRAILOVSKI V. Electro-polishing of laser powder bed-fused In625 components in an ionic electrolyte[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2019, 3(4):144-156.

[5] KIM M J, SALDANA C. Thin wall deposition of In625 using directed energy deposition[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 1 366-1 373.

[6] 范健. ASTM A519 GR.4130SR 表面堆焊 Inconel625 镍基合金焊接工艺研究[J]. 焊管, 2018, 41(11): 40-43.

[7] 张伟,朵元才,张建晓,等. 热丝 TIG 堆焊 Alloy 59 镍基合金工艺及其堆焊层性能研究[J]. 压力容器, 2020, 37(5): 13-17.

[8] 孙焕焕,刘爱国,孟凡玲. 堆焊 Inconel625 合金的锅炉膜式水冷壁组织和性能[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(S2): 96-99.

[9] 赵金龙. 耐热钢与不锈钢电弧辅助活性 TIG 焊接头组织及性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2020.

[10] 杜学芸,许金宝,宋健. 激光熔覆再制造技术研究现状及发展趋势 [J]. 表面工程与再制造, 2020,20(6): 18-22.

[11] 张津超,石世宏,龚燕琪,等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 1-11.

[12] ZHAN C, PARAB N D, LI X X, et al. Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting[J]. Science, 2020, 370(6 520): 1 080-1 086.

[13] 李艳鹏,温海骏. In625 镍基合金粉末激光熔覆参数研究[J]. 粉末冶金技术, 2021, 39(2): 153-158.

[14] 王书文,廖玉红,王腾迪. 激光熔覆 Ni625/WC 涂层的减振降噪和

摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2021, 34(2): 94-103.

[15] 李帅. 激光选区熔化成形镍基高温合金的组织与性能演变基础研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.

[16] COTTRELL A H, BILBY B A. Dislocation theory of yielding and strain aging of iron[J]. Proceedings of the Physical Society Section, 1949, A62(1): 49-53.

[17] GB/T 228.1-2010 金属材料拉伸试验第一部分:室温试验方法[S].

[18] DONG S Q, CHEN X, PLANTE E C L, et al. Elucidating the grain-orientation dependent corrosion rates of austenitic stainless steels[J]. Materials & Design, 2020, 191(7): 356-362.

[19] 马宏芳. Inconel625 合金在氯化物熔盐中腐蚀行为研究[D]. 西安:西安科技大学, 2015.

(编辑:刘卫)

3D 打印制造超高比强度钛合金
有望用于医学领域

澳大利亚科研团队 3D 打印出比强度超高的钛合金，这是航空航天、国防、能源和生物医学行业的一次重大飞跃。

莫纳什大学的这项最新研究表明，尖端 3D 打印技术可用于生产超高强度商用钛合金，让其获得前所未有的力学性能。

研究人员说：“钛合金需要复杂的铸造和热机械加工，才能获得某些关键应用所需的高强度。3D 打印等增材制造技术可以利用其独特的制造工艺，在商用钛合金内制造出超强且热稳定的部件。”

在最新研究中，该研究团队对一种商用钛合金进行简单的热处理后，获得了超过 1 600 MPa 的抗拉强度，是迄今为止所有 3D 打印金属未曾见过的，为制造出拥有独特微观结构和优良性能且可广泛应用于多个领域的结构材料铺平了道路。

研究人员说：“最新研究为商用合金的沉淀强化提供了一种全新的方法，可用来生产拥有复杂形状的真实部件，可应用于承重领域，迄今没有钛合金应用于这一领域。此外，我们通过 3D 打印加上简单的热处理即做到了这一点，这也意味着，与其他拥有类似强度的材料相比，最新技术的工艺成本大大降低。”

(摘自中国有色金属报)