

激光与光电子学进展

激光熔覆 304 不锈钢微观组织研究

孙允森¹, 韩阳², 张义², 周龙早¹, 刘德健¹, 郜鲜辉^{3*}

¹华中科技大学材料科学与工程学院材料成型与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

²中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430038;

³华中科技大学分析测试中心, 湖北 武汉 430074

摘要 采用激光熔覆成形了 304 不锈钢, 利用扫描电镜、X 射线衍射及透射电镜技术, 研究了熔覆层的组织形貌及相组成。结果表明: 熔覆层主要由奥氏体(γ)相和 FeCr(σ)相组成, σ 相中 Fe 与 Cr 的原子数分数比接近 1:1; γ 相呈细小、致密的枝晶状, σ 相主要为长条状, 宽度约为 200 nm, 分布在枝晶间隙处。在熔覆层快速凝固过程中, σ 相从枝晶间的共晶铁素体(δ)中析出。枝晶间共晶形成的大量 γ/δ 界面有效降低了 σ 相的形核难度, 同时, 枝晶间 Cr 元素的富集促进了 σ 相的形成和粗化。因此, 相比于不锈钢在固溶过程中析出的 σ 相, 激光熔覆过程中析出的 σ 相形成时间更短, 尺寸更大。

关键词 激光光学; 激光熔覆; 304 不锈钢; 枝晶间组织; σ 相

中图分类号 TG142.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1114001

Microstructure of 304 Stainless Steel Fabricated by Laser Cladding

Sun Yunsen¹, Han Yang², Zhang Yi², Zhou Longzao¹, Liu Dejian¹, Gao Xianhui^{3*}

¹State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

²China Construction Third Bureau First Engineering Co., Ltd., Wuhan 430038, Hubei, China;

³Analytical and Testing Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China

Abstract The microstructure and phase composition of 304 stainless steel fabricated by laser cladding are studied by scanning electron microscopy, X-ray diffraction and transmission electron microscopy. The results show that the cladding layer is mainly composed of austenite (γ) phase and FeCr (σ) phase, and the atomic ratio of Fe to Cr in the σ -phase is close to 1:1. The γ -phase is in the form of fine and dense dendrites, while the σ phase is mainly in the form of long strips with a width of about 200 nm and locates in the dendritic interstices. During the rapid solidification of the cladding layer, the σ phase precipitates from the inter-dendritic eutectic ferrite (δ). A large amount of γ/δ interfaces formed by the inter-dendritic eutectic can effectively reduce the difficulty of nucleation of the σ -phase, and the enrichment of the inter-dendritic Cr element can promote the formation and coarsening of the σ -phase. Therefore, compared with the σ -phase precipitated in the solid solution process of stainless steel, the σ -phase precipitated in the laser cladding process has short formation time and large size.

Key words laser optics; laser cladding; 304 stainless steel; inter-dendritic microstructure; σ -phase

收稿日期: 2021-06-30; 修回日期: 2021-07-02; 录用日期: 2021-07-09

基金项目: 总装预研共用技术(41423030503, 41404020301)

通信作者: *gaoxianhui@hust.edu.cn

1 引言

304 不锈钢具有稳定的无磁性奥氏体相,有着良好的塑韧性、耐热性以及耐腐蚀性,被广泛应用于食品医疗、能源化工及国防军工等重要领域^[1]。服役于这些重要领域的零部件一旦出现损坏,必须及时更换,但对于某些应用较少的异形零部件,采用传统加工方法进行小批量生产势必会导致较高的经济成本和时间成本。激光增材制造技术是一种快速近净成形的制造技术,对于形状复杂的零部件,可一步完成整体制造,大大缩短了零部件的制造周期。该技术主要包括以粉床铺粉为特征的选区激光熔化(SLM)技术和以同步送粉为特征的激光熔覆成形(LCF)技术。

在激光增材制造过程中,在极高冷却速率(可达 10^6 K/s)和复杂应力状态的共同作用下,熔池的凝固与固态相变过程会较大地偏离平衡相图,并很有可能生成不同于传统加工下的亚稳相和微观结构,从而影响材料的性能^[2]。国内外学者对此进行了系统研究。Yu 等^[3]研究发现,304 不锈钢在 SLM 成形过程中快速凝固,形成了沿堆积方向生长的柱状组织,从而呈现出力学性能的各向异性,并提出可通过改变层间扫描方向的方法抑制柱状组织的连续生长,避免强织构的形成。Hou 等^[4]观察到,304 不锈钢在 SLM 成形过程中生成的纳米级胞状亚晶起到了提高材料强度和塑韧性的作用,析出的少量 σ 相也起到了沉淀强化的作用,并提出析出相和残余应力状态是影响构件力学性能的关键因素。Ghayoor 等^[5]也观察到位错高密度聚集的纳米析出相,并提出了控制析出相尺寸的方法。

由于 SLM 制备的零件表面质量好、尺寸精度

高^[6],因此国内外关于激光增材制造 304 不锈钢的研究主要集中在 SLM 领域,而在 LCF 领域的研究相对较少。LCF 的沉积效率远高于 SLM,且对待成形零件的尺寸约束较小,在制备大型零件和零件表面改性及修复方面具备技术和成本优势^[7]。并且,随着装备技术和成形工艺的发展,LCF 的成形质量也不断提高,与 SLM 成形质量的差距不断缩小^[8]。因此,关于 LCF 制备不锈钢零件和涂层的研究逐渐增多^[9-10]。与 SLM 成形相比,LCF 成形的熔池冶金行为与结晶过程更为复杂,LCF 成形后的微观组织结构以及力学性能均与 SLM 成形存在较大差别。Huang 等^[11]用 LCF 技术成形 304 不锈钢,发现不同截面上存在化学成分和微观组织的差异,进而导致力学性能的差异,然而熔覆层的微观组织及相组成没有得到重点研究。

本文采用激光熔覆成形了 304 不锈钢,利用扫描电镜、X 射线衍射、透射电镜等重点研究了熔覆层的微观组织及相组成,为激光熔覆成形 304 不锈钢提供了理论基础和技术支持。

2 实验材料及方法

2.1 实验设备与材料

激光熔覆实验在实验室自主搭建的平台上完成,该平台由 IPG YSL-4000 光纤激光器、KUKA KR-60HA 六轴联动机器人、DPSF-2 送粉器及自主研发的同轴送粉头组成,如图 1 所示。实验所用激光功率为 2000~2500 W,扫描速度为 0.6~0.9 m/min,送粉速率为 10~15 g/min,激光离焦量为 50 mm,光斑直径为 2.5~3.0 mm。需要说明的是,上述工艺参数的选择是在前期研究^[12-13]的基础上,适当增大光斑直径,以提高沉积效率。激光熔覆实验在 304 不

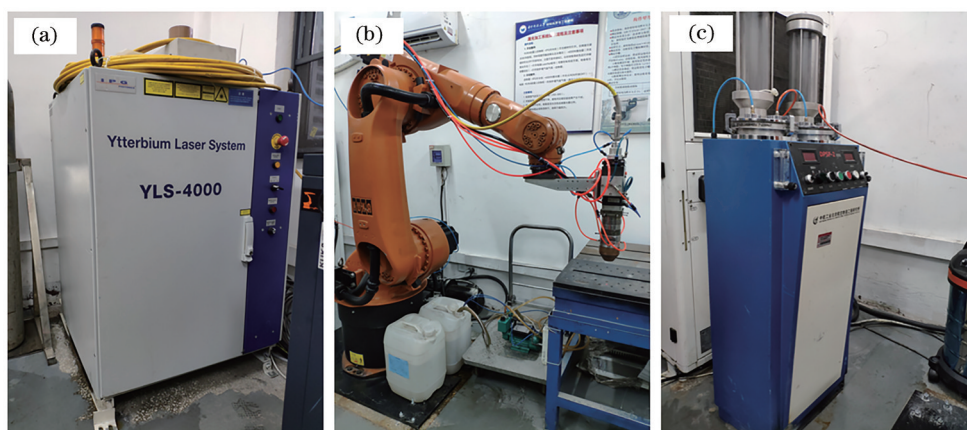


图 1 激光熔覆设备。(a) YSL-4000 光纤激光器;(b) KR-60HA 六轴联动机器人;(c) DPSF-2 送粉器

Fig. 1 Laser cladding equipments. (a) YSL-4000 fiber laser; (b) KR-60HA six-axis robot; (c) DPSF-2 powder feeder

锈钢板料上进行,实验前用丙酮对基板表面进行清洗。实验所用的 304 不锈钢粉末为雾化球形粉

末,粒径为 45~105 μm ,粉末形貌如图 2 所示,化学成分如表 1 所示。

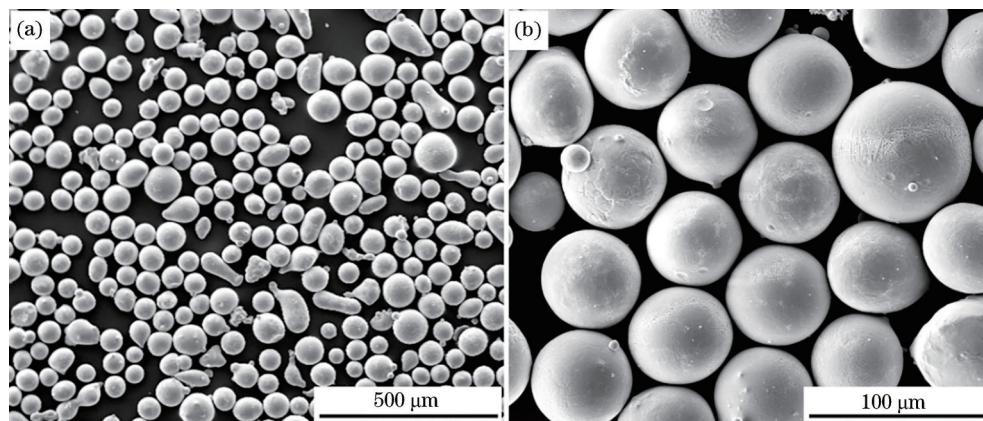


图 2 304 不锈钢粉末形貌。(a)低倍;(b)高倍

Fig. 2 Morphologies of 304 stainless steel powder. (a) Low magnification; (b) high magnification

表 1 304 不锈钢粉末化学成分

Table 1 Chemical compositions of 304 stainless steel powder

Element	C	Cr	Ni	Mn	Si	S	P	Fe
Mass fraction / %	≤ 0.08	17.00-19.00	8.00-11.00	≤ 2.00	≤ 1.00	≤ 0.03	≤ 0.04	Bal.

2.2 实验方法

利用线切割机沿垂直于激光扫描方向切割,获得激光熔覆试样,经粗磨、细磨、抛光后用王水浸泡 3~5 s,采用 Axiovert 200MET 金相显微镜(OM)和 GeminiSEM 300 扫描电镜(SEM)观察熔覆层微观形貌,并用能谱仪(EDS)分析熔覆层的元素组成和分布。在熔覆层内切取尺寸为 10 mm \times 10 mm \times 10 mm 的试样,经粗磨、细磨、机械抛光后,用 XRD-7000 型 X 射线衍射仪进行物相分析,电压为 40 kV,扫描速率为 10 ($^{\circ}$)/min。切取 0.5 mm 厚的熔覆层金属,用砂纸磨至厚度为 50~60 μm 后进行机械抛光和双喷减薄,双喷减薄电解液为 20 mL HClO_4 +180 mL $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 的混合溶液。采用 Tecnai G2 F30 型场发射透射电镜(TEM)观察熔覆层的物相形貌特征,同时利用选区电子衍射对熔覆层物相进行标定。

3 结果与讨论

3.1 熔覆层组织

在激光熔覆 304 不锈钢过程中,熔覆层的成形质量受到工艺参数的影响,如激光功率、扫描速度和送粉速率等,且与粉末送入量和热输入量的匹配有着紧密的关系。当热输入不足时,熔覆层表面粗糙,容易粘粉,严重时与基体无法形成良好的冶金

结合。当热输入过大时,液态熔池停留时间较长,稳定性差,且稀释率大,成形效率低。当热输入与送粉量相匹配时,熔覆层成形饱满,表面光亮,如图 3(a)所示。此时,熔覆层与基体形成良好的冶金结合,同时熔覆层的稀释率也被控制在合适的范围内(20%~30%),如图 3(b)所示。经王水试剂侵蚀,激光熔覆 304 不锈钢的沉积态组织呈现出典型的枝晶形状,并且不同区域的枝晶形貌有明显的区别,如图 3(c)~(e)所示。相比于熔覆层中部区域的枝晶,熔覆层顶部和底部的枝晶尺寸较小,一次枝晶和二次枝晶的长度远小于熔覆层中部的枝晶。其中,顶部枝晶的一次和二次枝晶臂长度大体一致,呈等轴状;底部枝晶的二次枝晶臂不明显,呈柱状和胞状。熔覆层中部的枝晶呈柱状,一次枝晶的生长优势明显,同时也出现大量短小的二次枝晶。在激光熔覆过程中,较大的温度梯度有利于熔池中晶体的择优生长,从而形成发达的枝晶组织;同时,局部凝固速度的差异导致枝晶的最终形态不同,类似的现象已被大量研究^[9, 14-16]。

图 4 为沉积态 304 不锈钢熔覆层的 SEM 图像。在二次电子成像模式下,熔覆层枝晶的间隙被连续的带状组织填充,致使枝晶组织被带状组织分割成多个块状区域,如图 4(a)所示,类似于选区激光熔化不锈钢形成的胞状结构组织^[17]。在背散射电子

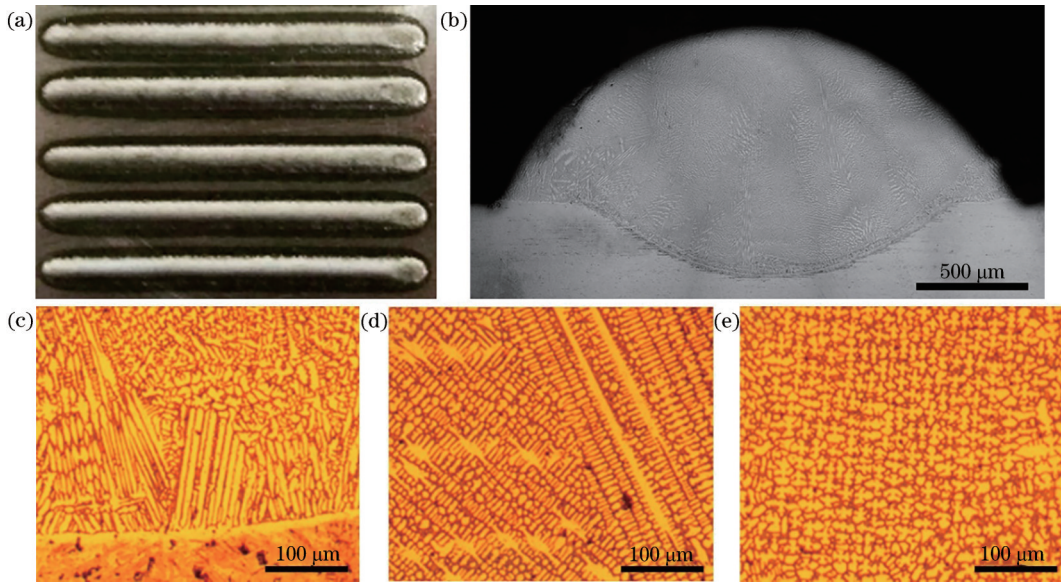


图 3 当激光功率为 2200 W、扫描速度为 0.8 m/min、送粉速率为 13 g/min 时,激光熔覆 304 不锈钢的典型熔覆层形貌。

(a) 单道熔覆层实物图;(b) 熔覆层横截面金相图;熔覆层的(c) 底部、(d) 中部和(e) 顶部区域的显微组织金相图

Fig. 3 Typical morphologies of 304 stainless steel by laser cladding under laser power of 2200 W, scanning speed of 0.8 m/min, and powder feeding rate of 13 g/min. (a) Physical image of single-pass cladding layer; (b) cross-sectional metallographic image of cladding layer; microstructural metallographic images of cladding layer at (c) bottom region, (d) middle region, and (e) top region

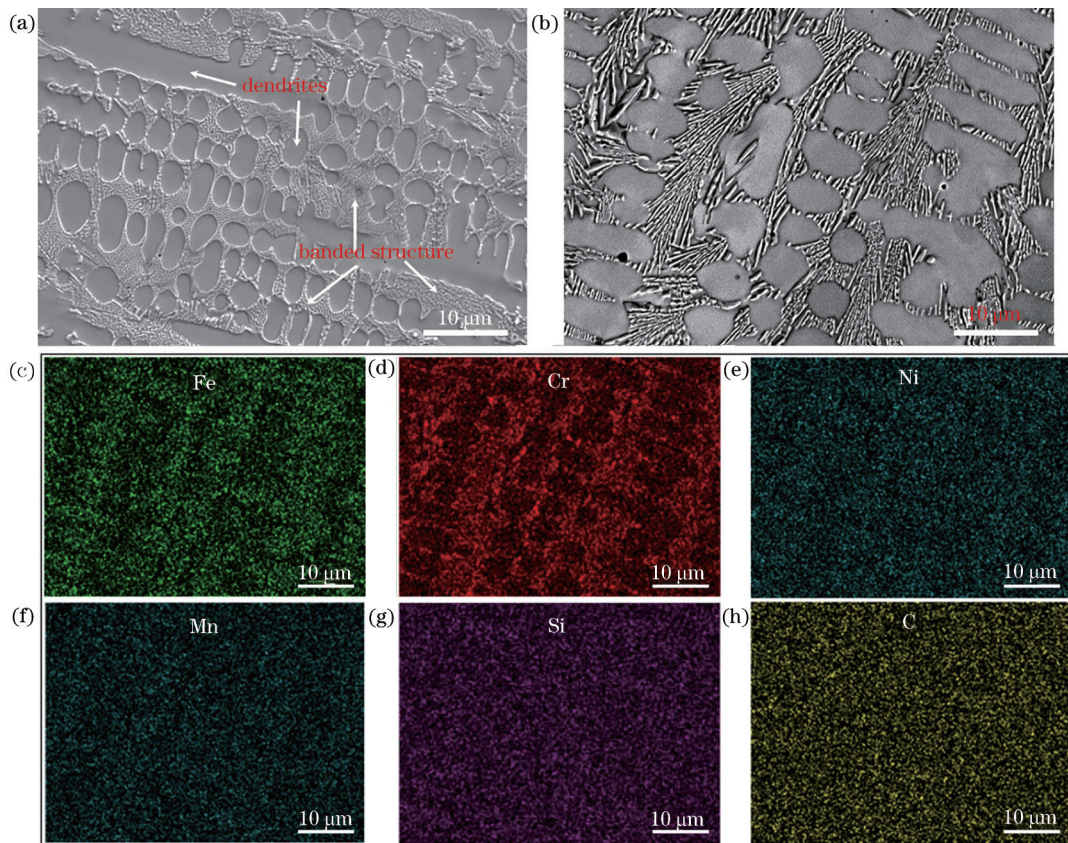


图 4 熔覆层的典型微观组织形貌和主要元素分布。(a) 二次电子图像;(b) 背散射电子图像;(c)~(h) EDS 扫描图

Fig. 4 Microstructural morphologies and main element distributions of cladding layer. (a) Secondary electron map; (b) backscattered electron map; (c)~(h) EDS scanning maps

成像模式下,带状组织的衬度略强于枝晶组织,如图 4(b)所示,表明构成带状组织的元素可能具有更高的原子序数。然而,图 4(c)~(h)所示的 EDS 面扫描结果表明,Cr 元素在带状组织中的富集现象明显,同时,Fe 元素富集在枝晶组织中,其他主要元素(Ni、Mn、Si、C)的分布无明显区域差异。需要指出的是,在一般情况下,原子序数高的区域在背散射模式下的成像亮度更高。然而,富 Cr 贫 Fe 的带状组织的成像亮度较高,这与原子衬度规律相悖,可能与微观组织的形貌衬度有关^[18]。虽然 Fe 的原子序数较大,但是与 Cr 的原子序数相近,此时元素的富集对原子衬度影响不大。在奥氏体不锈钢中,富 Cr 区域容易形成富 Cr 化合物,硬度往往高于奥氏体^[19]。由于硬度高,试样在抛光过程中容易形成富 Cr 组织的凸起,在背散射模式下,凸起区域的形

貌衬度更高,亮度也更大。

图 5 所示为熔覆层带状组织的形貌,其中 STEM 为扫描透射电镜。在激光熔覆的热循环条件下,304 不锈钢熔覆层中的带状组织主要由大量长条状物相构成,相邻长条相并排分布,如图 5(a)所示;局部区域的枝晶间组织呈网状,如图 5(b)所示。经测量,长条状物相的宽度约为 200 nm,相邻长条相的间隔约为 500 nm;网状物相的宽度与长条相基本保持一致,网状孔径与相邻长条相的间隔尺寸大体相同,如图 5(c)、(d)所示。同时,长条相长度方向上普遍存在一些颗粒状物相,其宽度与长条相相近。由图 5(a)、(c)可以看出,这种长条状物相是由多个颗粒物相互吞并形成的。网状析出相总是出现在长条状析出相周边,可能是多个长条相与周围颗粒相进一步合并生长的结果。

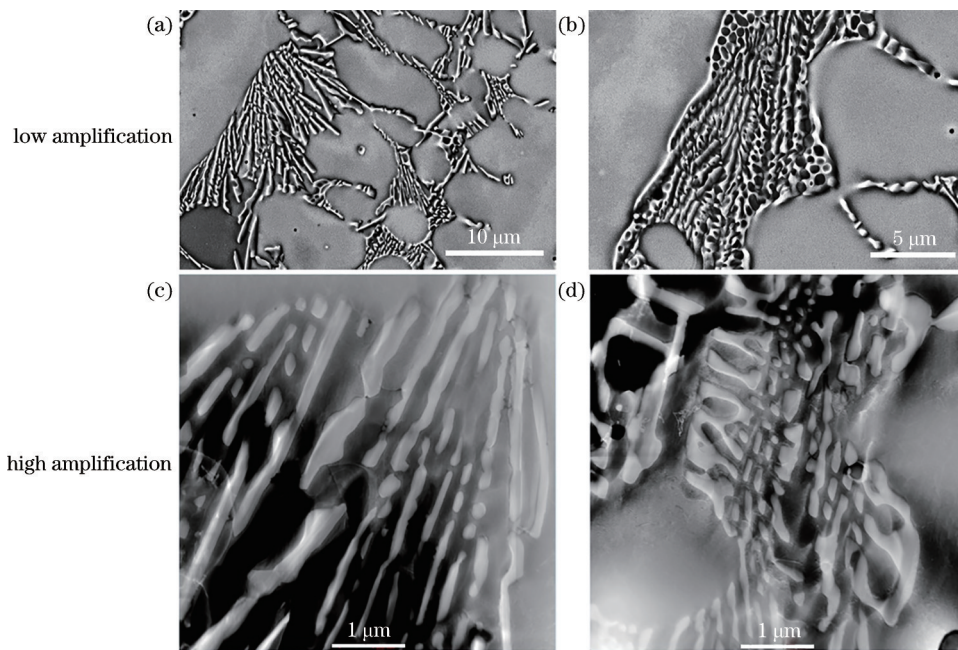


图 5 带状组织形貌。(a)(b) SEM 图像;(c)(d) STEM 图像

Fig. 5 Morphologies of banded microstructure. (a)(b) SEM maps; (c)(d) STEM maps

3.2 熔覆层物相分析

为了明确 304 不锈钢熔覆层的相组成,采用 XRD 对熔覆层进行物相分析,标定结果如图 6 所示。结果表明,304 不锈钢熔覆层主要由奥氏体(γ)相和 FeCr(σ)相组成。结合上述熔覆层组织的形貌分析可知,熔覆层枝晶组织为 γ 相,而枝晶间的带状组织为 σ 相。TEM 环境中的 EDS 分析如图 7 所示。可以看出,304 不锈钢熔覆层中 σ 相的 Fe 元素含量略高于 Cr 元素,Fe 与 Cr 的原子数分数比接近 1:1。

由 Fe-Cr-Ni 三元合金凝固模型^[20]可知,304 不

锈钢的铬当量与镍当量的比值为 1.74,高温铁素体(δ)作为初生相先在液相(L)中形成,然后根据 $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow \gamma + \delta$ 的凝固路径,通过包晶反应形成 γ 相,残余的 δ 相在进一步冷却过程中发生固态转变,也形成 γ 相,最终室温组织为 γ 相和少量的 δ 相。需要指出的是,激光熔覆熔池的温度梯度较高,容易形成较大的过冷度。当熔体过冷至亚稳 γ 相形成温度以下时,亚稳 γ 相将取代 δ 相直接从液相中析出^[21],形成枝晶组织。在较高的凝固速率下,枝晶间隙的熔体根据 Cr 当量与 Ni 当量的

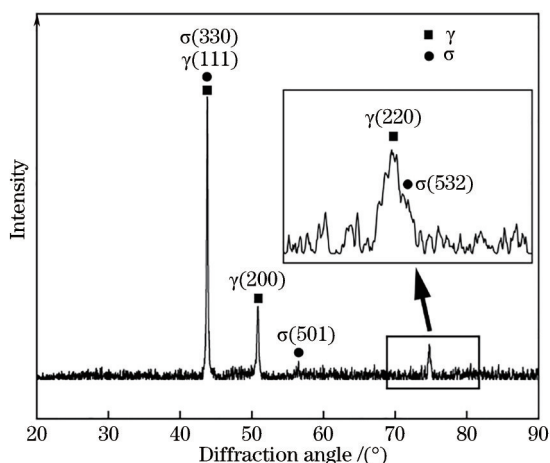
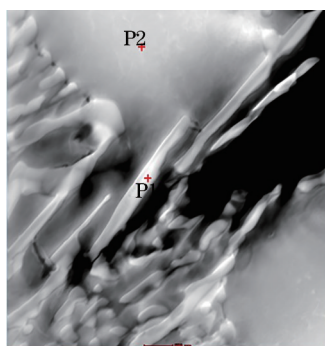


图 6 熔覆层 XRD 图谱

Fig. 6 XRD spectrum of cladding layer



Element	Mass fraction /%	
	P1	P2
C	0	0.09
Fe	49.26	71.80
Cr	47.26	16.48
Ni	2.90	10.64
Mn	0	0.25
Si	0.58	0.74

图 7 TEM 环境中熔覆层组织的 EDS 分析

Fig. 7 Microstructural EDS analysis of cladding layer in TEM environment

比例可能发生共晶反应($L \rightarrow \gamma + \delta$),形成大量细小的 δ 相^[22]。随着熔池温度的进一步降低,共晶组织中的 δ 相可能发生共析反应($\delta \rightarrow \gamma + \sigma$),从而形成 σ 相^[23]。所以,激光熔覆 304 不锈钢的凝固路径应包括以下反应

$$L \rightarrow L + \gamma, \quad (1)$$

$$L \rightarrow \delta + \gamma, \quad (2)$$

$$\delta \rightarrow \gamma + \sigma. \quad (3)$$

因此,熔覆层的室温组织为 γ 相 + σ 相,高温 γ 相为枝晶组织,低温析出的 σ 相分布在枝晶间隙,如图 8 所示。同时,考虑到激光熔池的凝固速率较大以及局部热循环的不同,不排除熔覆层内含有少量的铁素体^[24],局部富 Cr 区域还可能形成富 Cr 碳化物^[25]。

在一般情况下,不锈钢中 σ 相的形成速度比较缓慢,短时间内不易粗化成长条状或网状组织^[26]。然而,局部 Cr 元素含量的提高可以有效地促进 σ 相的形成^[27]。在熔覆层凝固时,由于 Cr 元素在 γ 相中的有限固溶^[28], γ 枝晶在生长过程中将过饱和的 Cr 元素排到枝晶外,形成富 Cr 区,这有利于 σ 相的形成和粗化。此外,枝晶间共晶形成的大量 γ/δ 界面有效降低了析出相的形核难度,有利于 σ 相的形核。所以,相比于不锈钢固溶过程中析出的 σ 相^[29],激光熔覆过程中析出的 σ 相形成时间更短,尺寸更大。

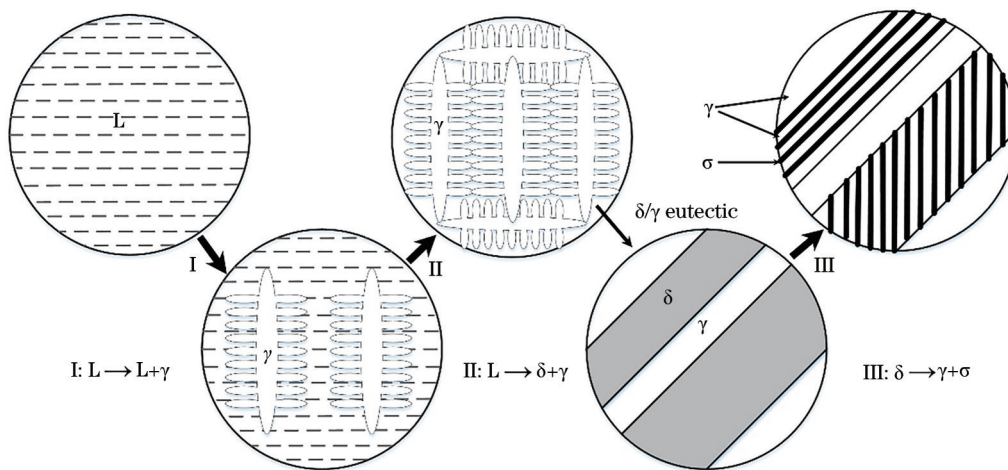


图 8 304 不锈钢熔覆层的凝固过程示意图

Fig. 8 Schematic of solidification of 304 stainless steel cladding layer

然而,激光熔覆过程中共析形成的 σ 相在分布上与共晶形成的 δ 相基本重合,且两者的低倍形貌差异不明显,所以熔覆层内共析形成的 σ 相容易被认定成残余铁素体^[11, 30-31]。此外,简单通过 XRD +

EDS(SEM)的方式也不容易发现熔覆层中的 σ 相。一方面,枝晶间析出相的含量相对较低,导致析出相的衍射峰不强,容易被忽略,如图 6 所示的 $\sigma(501)$ 峰。并且, σ 相的强衍射峰(330)和(532)与 γ 相的强

衍射峰(111)和(220)基本重合。另一方面,由于析出相过于细小,SEM环境中的EDS很难精准地分析析出相的元素组成和含量。为了进一步确定枝晶间组织的物相,本文除了在TEM环境中进行

EDS分析外,还对长条状析出相进行了衍射图谱标定,如图9所示。选区电子衍射点阵分析结果表明,该析出相为四方结构,经标定确认为 σ 相。

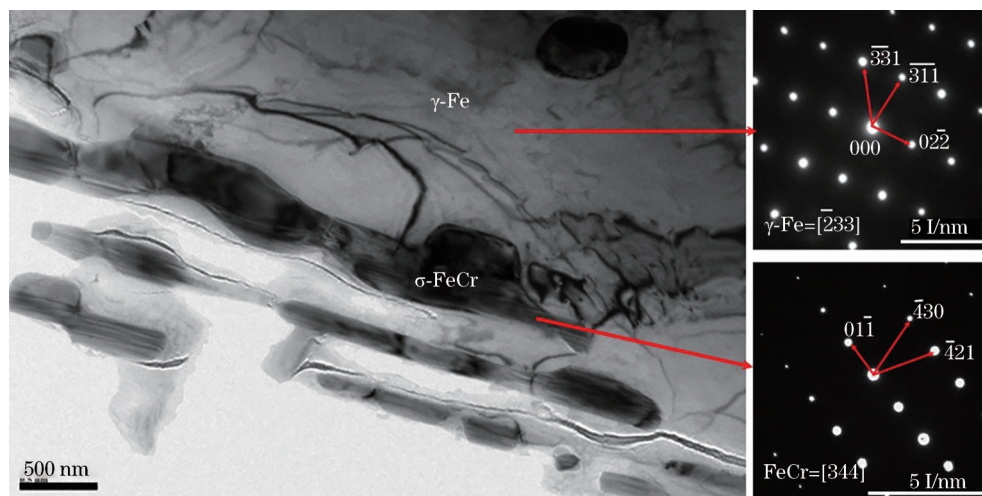


图9 熔覆层典型物相的选区电子衍射分析

Fig. 9 Selected area electron diffraction analysis of typical phase in cladding layer

4 结 论

采用激光熔覆技术成形了304不锈钢,研究了熔覆层的典型微观组织结构特点和相组成。熔覆层由基体相(γ)和析出相(σ)构成,基体相呈枝晶状,析出相主要呈长条状、网状和颗粒状,分布在枝晶间隙处。熔覆层枝晶间的析出相 σ 的主要构成元素为Fe和Cr,且两者的原子数分数比接近1:1。熔覆层的凝固路径可能为 $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow \gamma + \delta \rightarrow \gamma + \sigma$,其中 δ 铁素体是共晶形成的, σ 相是从铁素体中析出的。在枝晶间形成的大量 γ/δ 界面有利于 σ 相的形核,同时枝晶间Cr元素富集有利于 σ 相的形成和粗化,相比于不锈钢固溶过程中析出的 σ 相,激光熔覆过程中析出的 σ 相形成时间更短,尺寸更大。激光熔覆过程中共析形成的 σ 相在分布上与共晶形成的 δ 相基本重合,且两者的低倍形貌差异并不明显,导致共析形成的 σ 相容易被认定成残余铁素体。

参 考 文 献

- [1] Lo K H, Shek C H, Lai J K L. Recent developments in stainless steels[J]. *Materials Science and Engineering*, 2009, 65(4/5/6): 39-104.
- [2] 林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. *中国科学: 信息科学*, 2015, 45(9): 1111-1126.

Lin X, Huang W D. Laser additive manufacturing of high-performance metal components[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2015, 45(9): 1111-1126.

- [3] Yu H C, Yang J J, Yin J, et al. Comparison on mechanical anisotropies of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy and 304 stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 695: 92-100.
- [4] Hou J, Chen W, Chen Z E, et al. Microstructure, tensile properties and mechanical anisotropy of selective laser melted 304L stainless steel[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 48: 63-71.
- [5] Ghayoor M, Lee K, He Y J, et al. Selective laser melting of 304L stainless steel: role of volumetric energy density on the microstructure, texture and mechanical properties[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 32: 101011.
- [6] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500002.
- Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500002.
- [7] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. *航空学报*, 2014, 35(10): 2690-2698.
- Wang H M. Materials' fundamental issues of laser

- additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [8] 汤海波, 吴宇, 张述泉, 等. 高性能大型金属构件激光增材制造技术研究现状与发展趋势[J]. *精密成形工程*, 2019, 11(4): 58-63.
Tang H B, Wu Y, Zhang S Q, et al. Research status and development trend of high performance large metallic components by laser additive manufacturing technique[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2019, 11(4): 58-63.
- [9] 宋建丽, 邓琦林, 胡德金, 等. 激光熔覆成形 316L 不锈钢组织的特征与性能[J]. *中国激光*, 2005, 32(10): 1441-1444.
Song J L, Deng Q L, Hu D J, et al. Microstructure characterization and properties of laser cladding forming 316L stainless steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(10): 1441-1444.
- [10] 高美娜, 王续跃, 徐文骥, 等. 不锈钢-碳钢层合板激光熔覆制备方法试验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 021403.
Gao M N, Wang X Y, Xu W J, et al. Experimental study on the stainless-carbon steel laminated plates prepared by laser cladding[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 021403.
- [11] Huang W B, Zhang Y M, Dai W B, et al. Mechanical properties of 304 austenite stainless steel manufactured by laser metal deposition[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 758: 60-70.
- [12] 肖鱼, 路媛媛, 郭溪溪, 等. 激光增材制造薄壁结构件工艺及性能的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 081405.
Xiao Y, Lu Y Y, Guo X X, et al. Study on process and properties of thin-walled structure part by laser additive manufacturing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 081405.
- [13] 肖鱼. 金属薄壁结构激光增材制造成形工艺及组织性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 15-23.
Xiao Y. Process, microstructure and properties of metal thin-walled structure by laser additive manufacturing [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 15-23.
- [14] Zhang H, Zhang C H, Wang Q, et al. Effect of Ni content on stainless steel fabricated by laser melting deposition[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 101: 363-371.
- [15] Li K B, Li D, Liu D Y, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of multiple-layer laser cladding coating of 308L stainless steel[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 340: 143-150.
- [16] Hemmati I, Ocelik V, de Hosson J T M. Microstructural characterization of AISI 431 martensitic stainless steel laser-deposited coatings[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(10): 3405-3414.
- [17] Salman O O, Gammer C, Chaubey A K, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 316L steel synthesized by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 748: 205-212.
- [18] 周玉. 材料分析方法[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
Zhou Y. Material analysis method[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [19] Saeidi K, Gao X, Zhong Y, et al. Hardened austenite steel with columnar sub-grain structure formed by laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 625: 221-229.
- [20] Ma J C, Yang Y S, Tong W H, et al. Microstructural evolution in AISI 304 stainless steel during directional solidification and subsequent solid-state transformation[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 444(1/2): 64-68.
- [21] 马建超, 杨院生, 童文辉. 熔体过热对 AISI 304 不锈钢亚快速凝固薄带组织的影响[J]. *金属学报*, 2007, 43(8): 879-882.
Ma J C, Yang Y S, Tong W H. Effect of melt superheating on the subrapidly solidified microstructure of AISI 304 austenitic stainless steel strip[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2007, 43(8): 879-882.
- [22] Umeda T, Okane T. Solidification microstructures selection of Fe-Cr-Ni and Fe-Ni alloys[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2001, 2(1): 231-240.
- [23] Hsieh C C, Wu W T. Overview of intermetallic sigma (σ) phase precipitation in stainless steels [J]. *ISRN Metallurgy*, 2012, 2012: 732471.
- [24] Raghavan V. C-Cr-Fe (carbon-chromium-iron) [J]. *Journal of Phase Equilibria*, 1994, 15(4): 418-419.
- [25] Shi F, Qi Y, Liu C M. Effects of Mo on the precipitation behaviors in high-nitrogen austenitic stainless steels[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2011, 27(12): 1125-1130.
- [26] 马明, 丁桦, 唐正友, 等. 2205 双相不锈钢中 σ 相的析出行为[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(4): 504-507.
Ma M, Ding H, Tang Z Y, et al. Precipitation

- behavior of σ phase in duplex stainless steel 2205[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35(4): 504-507.
- [27] 孙立. σ 相析出对双相不锈钢点蚀性能影响及其机理[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2017: 1-2.
Sun L. Effect of σ phase precipitation on pitting properties of duplex stainless steel and its mechanism [D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2017: 1-2.
- [28] 张国栋, 杨辉, 王麒麟, 等. 铁素体不锈钢激光熔覆层组织和性能研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 37-45.
Zhang G D, Yang H, Wang Q Y, et al. Microstructure and properties of laser cladding layer on ferritic stainless steel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 37-45.
- [29] 李殊霞, 任学平, 佟建国, 等. 2205 双相不锈钢中 σ 相的析出规律[J]. 工程科学学报, 2015, 37(3): 312-316.
Li S X, Ren X P, Tong J G, et al. Precipitation law of σ phase in 2205 duplex stainless steel[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(3): 312-316.
- [30] Kurzynowski T, Gruber K, Stopyra W, et al. Correlation between process parameters, microstructure and properties of 316 L stainless steel processed by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 718: 64-73.
- [31] 徐鹏, 林成新, 周超玉, 等. 激光熔覆 304 不锈钢涂层的工艺及组织[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(7): 142-146.
Xu P, Lin C X, Zhou C Y, et al. Preparation and microstructure of 304 stainless steel layer by laser cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(7): 142-146.