

TIG 电弧堆焊条件下 Ni 基熔覆层的 微观组织及性能研究

张广成¹, 高俊², 朱子越², 李继红²

(1. 西安航天动力机械有限公司, 陕西 西安 710025; 2. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要:为了优化 Q345 低碳钢的表面使用性能,减少基材对 Ni 基熔覆层的稀释作用,设计了 3 组不同 Fe 含量的镍基金属粉芯焊丝,采用 TIG 沉积方法制备了 3 种过渡层+Inconel 625 熔覆层,利用 OM、SEM、EDS 和显微硬度测试等方法,研究了熔覆层的微观组织、元素分布、物相组成、界面元素扩散和表面硬度等,为梯度 Ni 基熔覆层的推广应用提供一定的理论支撑。结果表明,在凝固温度的影响下,熔覆层由界面至顶部形成了不同的晶粒形貌。熔覆层主要由 FCC 结构的 γ -Ni 基体、Laves 相和 MC 相组成,其中,由于微观偏析的存在,固溶体内元素分布不均匀,Ni、Cr、Fe 元素主要富集在晶内,Mo、Nb 在晶间聚集;随着 Fe 元素含量的增加,过渡熔覆层中元素偏析程度有所减缓,不规则形状的 Laves 相含量减少;得益于合金元素的固溶强化和第二相粒子强化作用,Inconel 625 熔覆层平均硬度达到 200 HV0.2 以上,过渡层上部由于重复热输入影响,硬度值略低;熔覆层显微硬度均高于 Q345 基材。

关键词: TIG 堆焊; Q345 钢; Inconel 625; 微观组织; 显微硬度

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20222180

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2022)24-0063-05

Microstructure and Properties of Ni-based Melting Layer by TIG Arc Welding

ZHANG Guangcheng¹, GAO Jun², ZHU Ziyue², LI Jihong²

(1. Xi'an Aerospace Power Machinery Co., Ltd., Xi'an 710025, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to optimize the surface performance of Q345 low carbon steel and reduce the dilution effect of substrate on Ni-based fusion layer, three groups of nickel-based metal powder-cored wires with different Fe content were designed, and three kinds of transition layer + Inconel 625 fusion layer were prepared by TIG deposition method. The microstructure, element distribution, phase composition, interface element diffusion and surface hardness of the fusion layer were studied by OM, SEM, EDS and microhardness test, which provided theoretical support for the popularization and application of gradient Ni-based fusion layer. The results show that under the influence of solidification temperature, the melted coating layer forms different grain morphologies from the interface to the top. The coating is mainly composed of FCC structure γ -Ni matrix, Laves phase and MC phase. Due to the existence of microsegregation, the element distribution in the solid solution is not uniform, Ni, Cr and Fe are mainly enriched in the crystal, and Mo and Nb are gathered between the crystals. With the increase of Fe content, the degree of element segregation in the transition melting layer slows down, and the content of Laves phase with irregular shape decreases. Thanks to the solid solution strengthening and second-phase particle strengthening of alloy elements, the average hardness of Inconel 625 melted coating layer reaches above 200 HV0.2, and the hardness is slightly lower in the upper part of the transition layer due to the influence of repeated heat input. The

microhardness of the fusion layer is higher than that of Q345 substrate.

Key words: TIG cladding; Q345 steel; Inconel 625; microstructure; microhardness

Inconel 系列合金作为一种沉淀或固溶强化的镍基高温合金,具有良好的高温力学性能、抗疲劳性能、抗氧化性能、抗腐蚀性能及加工性能。除作为高温工况条件下的结构材料外,通常也可采用表面工程技术,将 Inconel 合金熔覆于普通低碳钢或低合金

收稿日期: 2022-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(101-413519043); 西安市科技计划项目(21XJZZ0057)

作者简介: 张广成(1971-), 男, 陕西长安人, 高级工程师, 硕士, 主要从事固体火箭发动机金属结构件研制生产管理工作;

E-mail: 13572843319@139.com

通讯作者: 李继红(1973-), 男, 河南洛阳人, 副教授, 博士, 主要从事焊接成形过程的力学行为及其结构质量的控制、焊接凝固过程的组织演变行为及先进焊接材料研究;

E-mail: lijihong@xaut.edu.cn

钢基体之上,在降低成本的同时,获得综合性能优异的复合材料/结构,这种异种材料复合结构在航空航天、船舶、石油化工等行业中均得到广泛应用^[1-3]。

Inconel 625 合金的优异性能主要来源于几种合金元素的固溶强化或析出相强化机制。然而,溶质原子若出现偏析,则会降低其固溶强化的作用,并可能析出恶化合金性能的 Laves 相^[4];另一方面,基材与熔覆层之间的元素互扩散,将导致熔覆层中起强化作用的合金元素被稀释,使得熔覆层凝固组织发生改变,从而最终影响熔覆层的表面强化效果。已有研究^[5-6]表明,基材中 Fe 原子若大量进入熔覆层,将进一步加剧熔覆层合金组织与性能的恶化。而有研究^[7]表明,在 625 合金中,Fe 元素为分配系数 $k>1$ 的负偏析元素, $k=1.26$,与 Ni 元素($k=1.22$)的偏析系数较为接近。这与 Fe 和 Ni 元素可以无限固溶、原子性质相似的事实相一致。Fe 元素加入后形成的 5 组元合金熔体自由能相较于 Inconel 625 的 4 主元合金熔体有较大幅度的降低,因此通过加入 Fe 元素,降低合金熔体自由能,提高合金体系热力学稳定性,对于重新设计具有减缓元素偏析程度和析出相调控作用的镍基熔覆材料具有理论支持。基于以上分析,本文将通过设计过渡层缓和基材到 Inconel 625 熔覆层的组织及成分突变,探索基材稀释作用导致的合金成分变化对 Inconel 625 合金熔覆层组织和性能的影响机制,并尝试制备可调控组织结构及性能的过渡层。Carroll 等使用定向能量沉积技术成功在 SS304L 不锈钢上堆焊出没有明显的成分、结构或微结构边界的 Inconel 625 合金功能梯度层,并通过调控元素成分和焊接工艺对其结构性能进行了优化^[8-9]。郭龙龙等^[10]利用热焊丝脉冲 TIG 焊在 AISI4130 合金基体上熔覆两层 Inconel 625 合金层,通过焊接参数调控优化焊道成形形貌及焊接质量,得到了无气孔无裂纹的熔覆层。从结合界面到熔覆层表面,依次呈现为胞状晶、柱状树枝晶、等轴晶;采用电位动力学极化测试评估熔覆层的耐腐蚀性,结果表明,第二层堆焊层的耐腐蚀性能优于第一层,说明由基材扩散至熔覆层的 Fe 元素对熔覆层的耐腐蚀性能造成了不利的影响,但可通过增加熔覆层数降低之。熔覆层制备过程具有多道多层的可加性,在局部熔池的不同区域会反复经历复杂的热历史,包括熔化和再循环加热,熔池中还涉及到传热、流体流动等一系列复杂的物理现象,导致熔池的热行为复杂^[11-12]。复杂的热历史和热行为导致了熔覆层不同部位具有不同的微观组织

特征,进而影响熔覆层性能。因此,仅通过优化工艺参数很难有效调控熔覆层组织结构、析出相含量及性能,所以有必要通过设计过渡层的合金成分,添加过渡层结构,减缓成分突变对 Inconel 625 熔覆层组织性能的不利影响。本文以 Q235 低合金钢为基材,采用金属粉芯焊丝氩弧熔覆方法制备了 Inconel 625-nFe 过渡层及 Inconel 625-nFe 过渡层+Ni625 熔覆层的试样,研究了熔覆层和过渡层的微观组织和显微硬度,验证了梯度过渡 Ni 基熔覆层的可行性,也为该方法在工程实际中的应用提供一定的依据和参考。

1 试验材料与方法

试验材料采用基材为 Q345 的低合金钢板,其规格为 300 mm×150 mm×10 mm。以 7 mm×0.2 mm 的 Inconel 625 合金带作为外皮,将不同 Fe 含量的多元合金粉末混合均匀后填入合金带,填充率控制在 20%左右,经拉拔、减径等工序后制成直径为 $\phi 1.6$ mm 的金属粉芯焊丝。焊丝组分设计参数及试验材料名义化学成分分别见表 1、2。

表 1 金属粉芯焊丝的组分设计(质量分数,%)

Tab.1 Composition design of metal powder cored wire (wt%)

焊丝	设计包粉率	实测包粉率	合金带 Fe 含量	金属粉芯 Fe 含量	焊丝 Fe 含量
1	24	24.1	3	30	9.51
2	24	23.2	3	40	11.58
3	24	22.7	3	50	13.67

表 2 试验材料的成分(质量分数,%)

Tab.2 Composition of experimental materials (wt%)

材料	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	C	Mn	Si	Al+Ti
625 合金带	60	20~23	8~10	3.15~4.15	3	0.1	0.3	0.3	0.6
焊丝 1	53	20~23	8~10	3.15~4.15	9.15	0.1	0.3	0.3	0.6
焊丝 2	50	20~23	8~10	3.15~4.15	11.58	0.1	0.3	0.3	0.6
焊丝 3	48	20~23	8~10	3.15~4.15	13.67	0.1	0.3	0.3	0.6
625 焊丝	64.84	21.1	9.01	3.49	0.18	0.006	0.15	0.11	-
Q345 基板	≤0.50	≤0.20	-	≤0.07	余量	≤0.20	≤1.70	≤0.50	-

使用 Panasonic 型 TIG 焊机逐层逐道制备熔覆层,其中焊丝采用人工的方式送进,焊接电流 150A,焊接速度和送丝速度根据实际工况由焊接人员自主控制。在制备熔覆层前,将 Q345 低合金钢板表面打磨平整,随后在 99.99% 的 Ar 气氛保护下进行熔覆,气体流量为 15 L/min。实际得到的过渡层厚度可达 2~3 mm,过渡层+熔覆层的厚度可达 4~5 mm。

熔覆层制备完成后,按照标准金相制备程序,通过切割、研磨、抛光和腐蚀等方法制备熔覆层样品

(即 TIG 焊工艺堆焊的镍基熔覆层的横截面)沿构建方向的试样,以观察其微观结构。采用 HXS-1000AY 显微硬度计(中国上海阿美泰克公司)在载荷为 0.2 kg、保载时间为 15s 的条件下测量维氏硬度,硬度测试示意图如图 1 所示。

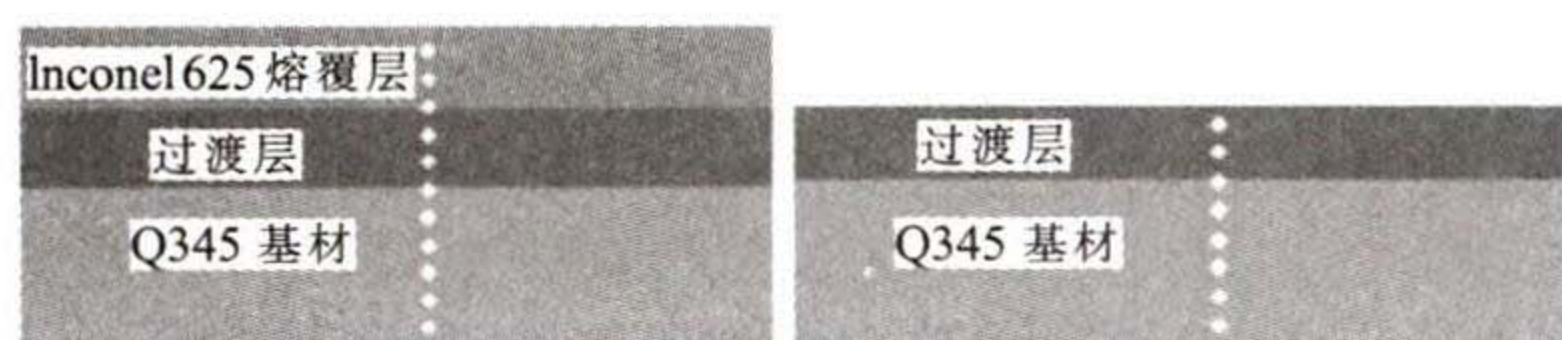


图 1 硬度测试示意图
Fig.1 Diagram of hardness test

2 结果与讨论

2.1 微观组织分析

Inconel 625 熔覆层的微观组织如图 2 所示。可以发现过渡层与 Q345 基体结合良好,熔覆层组织致密,无明显裂纹、大气孔等缺陷。基材与过渡层熔合边界处存在熔化未混合区(melting unmixed zone, MUZ),这是因为基体与过渡层成分差异大,熔覆过程冷却速率快,熔合边界处熔融液相未充分熔合。靠近基材的过渡层底部,组织形貌主要为胞状晶,同时存在垂直于熔合边界且相互平行的柱状晶粒,沿着温度梯度方向生长,长度达到几百微米;过渡层与 Inconel 625 熔覆层熔合边界处,组织过渡平缓,主要为胞状晶粒;Inconel 625 层中部主要为柱状晶和胞状晶,其晶粒尺寸小于过渡熔覆层的晶粒尺寸。Inconel 625 层顶部组织存在大量等轴晶粒,熔覆层不同位置组织形貌与熔池温度转变过程有关^[13-15],在靠近基材及融合边界处,温度梯度 G 较大,凝固速率 R 较小,即 G/R 的值较大,有利于胞状晶生长(图

2(a));熔池中部,温度梯度 G 减小,凝固速率 R 增大, G/R 的值减小,熔覆层结晶形态转变为垂直于熔合线方向生长的柱状晶(图 2(c));在熔池顶部,随着 G/R 值的进一步减小,使得熔覆层顶部形成了一定数量的等轴晶(图 2(d))。

图 3 为熔覆层中部的微区组织形貌。由图可见,基体上分布有圆形颗粒状和不规则形状析出相,为定量分析不同微观区域的化学成分,对图中 A、B 和基体中 C 的区域进行了 EDS 点扫测试,测试结果见表 3。与基体(C 点)相比,不规则析形状析出相(A 点)中的 Nb 含量较高,Ni、Fe 含量较少,且该析出相的元素组成及物质量比例(Ni,Cr,Fe):(Mo,Nb,Ti)接近 2:1,属于 Laves 相,该相主要在晶界处析出。由于熔覆过程凝固速率较快,溶质元素偏析至固液界面前沿,来不及充分扩散,形成溶质元素富集区,最终形成低熔点共晶 Laves 相^[16-17]。该相消耗大量溶质原子,降低基体的固溶强化效果。由于在凝固前期以低熔点共晶液相存在于基体组织中,造成熔覆层热裂纹敏感性,严重恶化熔覆层性能。

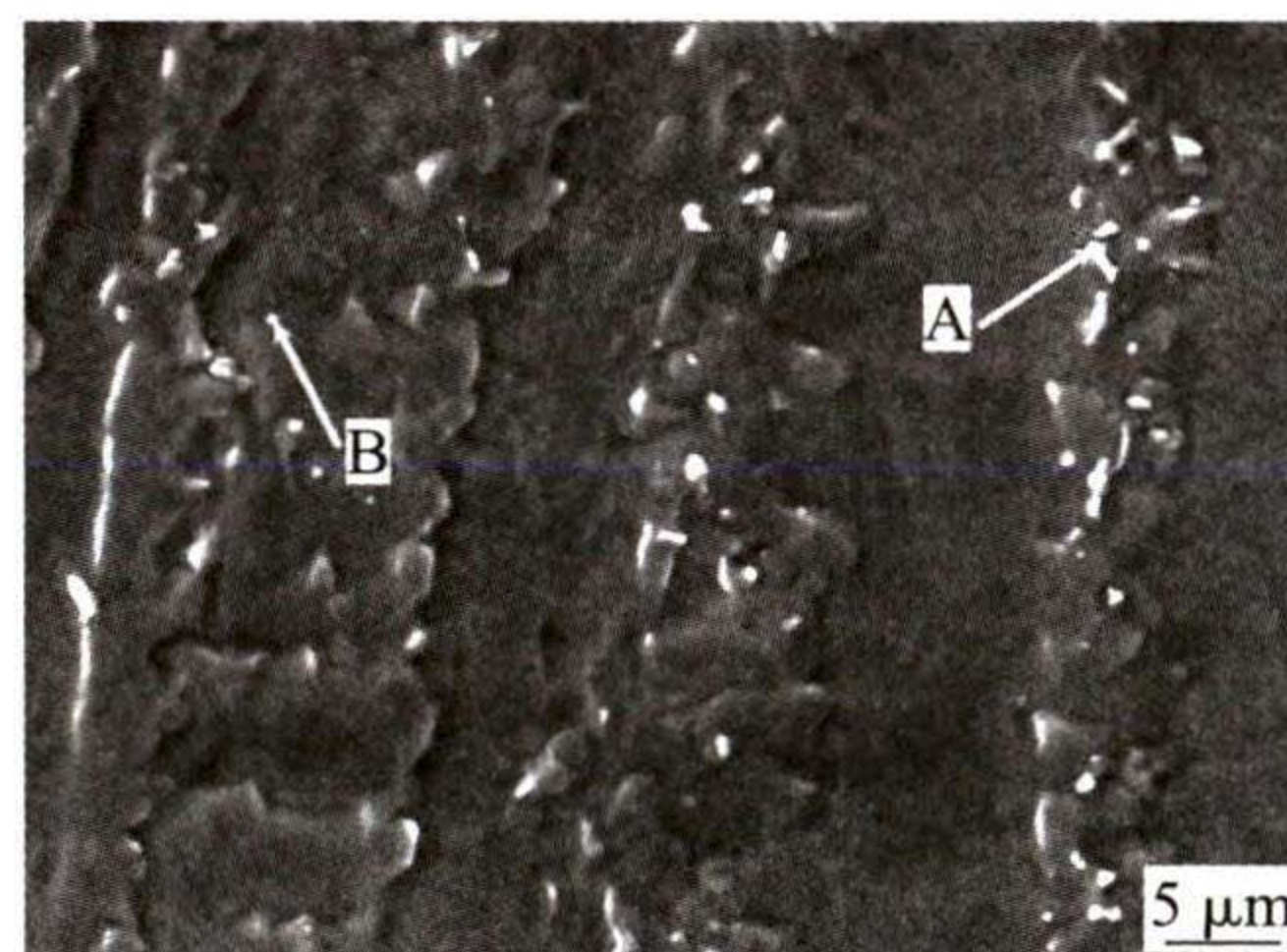


图 3 熔覆层中部的微区组织形貌
Fig.3 Morphology of microstructure of fusion layer in central zone

表 3 EDS 分析结果(质量分数,%)
Tab.3 EDS analysis results (wt%)

点	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	Ti	C
A(基体)	24.17	13.22	6.20	27.69	25.91	2.81	-
B(基体)	25.37	13.39	2.86	25.70	16.02	3.85	12.72
C(基体)	35.88	13.22	9.49	5.26	34.31	1.84	-

圆形颗粒析出相(B 点)的 EDS 测试结果表明,该析出相中 C 元素的含量较高,同时含有较多的 Nb、Ti 元素,都是强碳化物形成元素,各金属元素 M 与 C 元素的质量之比 M:C 接近 6:1,属于 M_6C 相。碳化物相同样主要分布在晶界处,因其颗粒细小,具有颗粒强化作用,还可以阻碍晶界滑移运动,可有效提高合金基体力学性能^[18-19]。

图 4 为不同 Fe 含量过渡层的微观组织形貌和

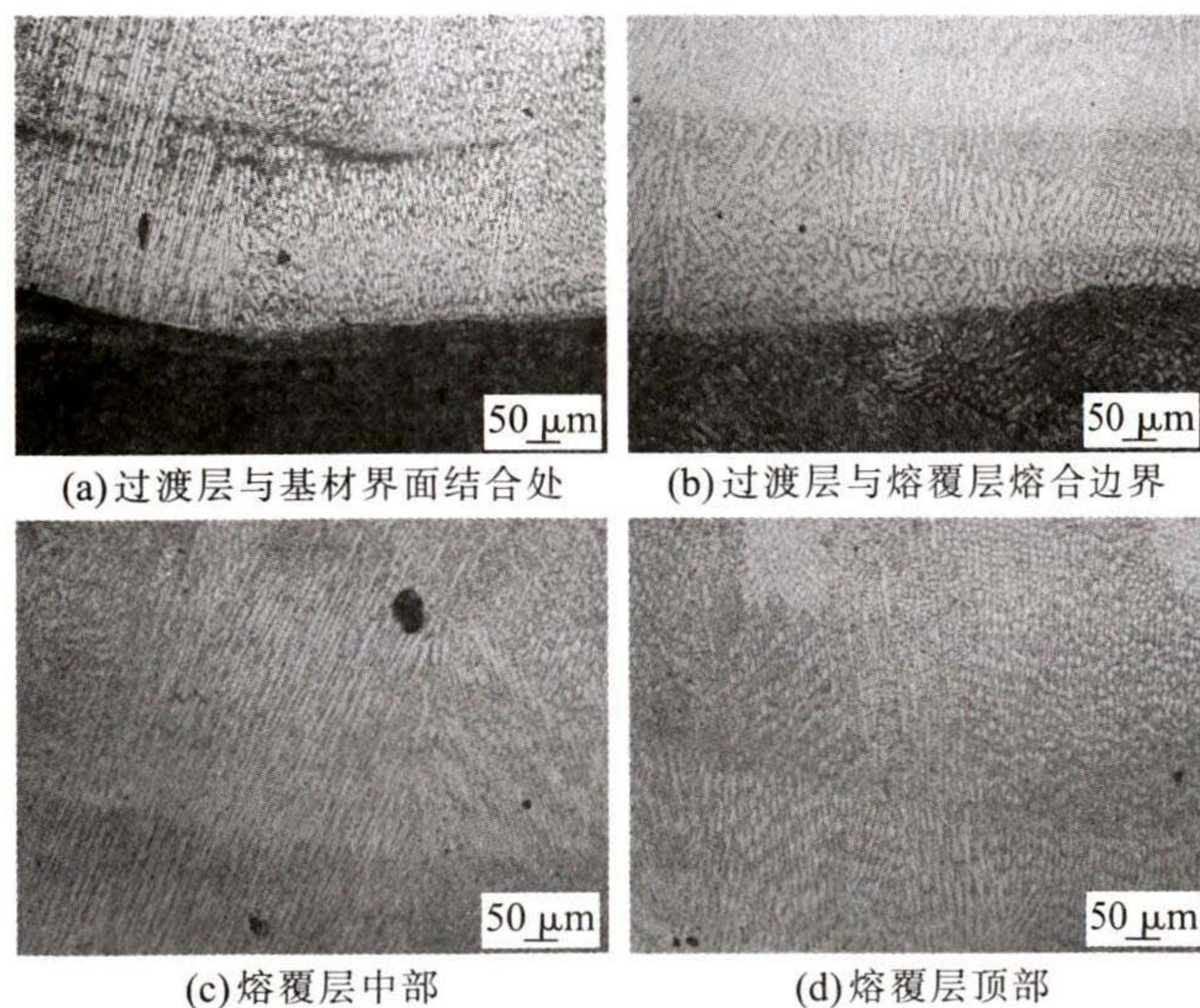


图 2 Inconel 625 熔覆层的微观组织
Fig.2 Microstructure of Inconel 625 fusion layers

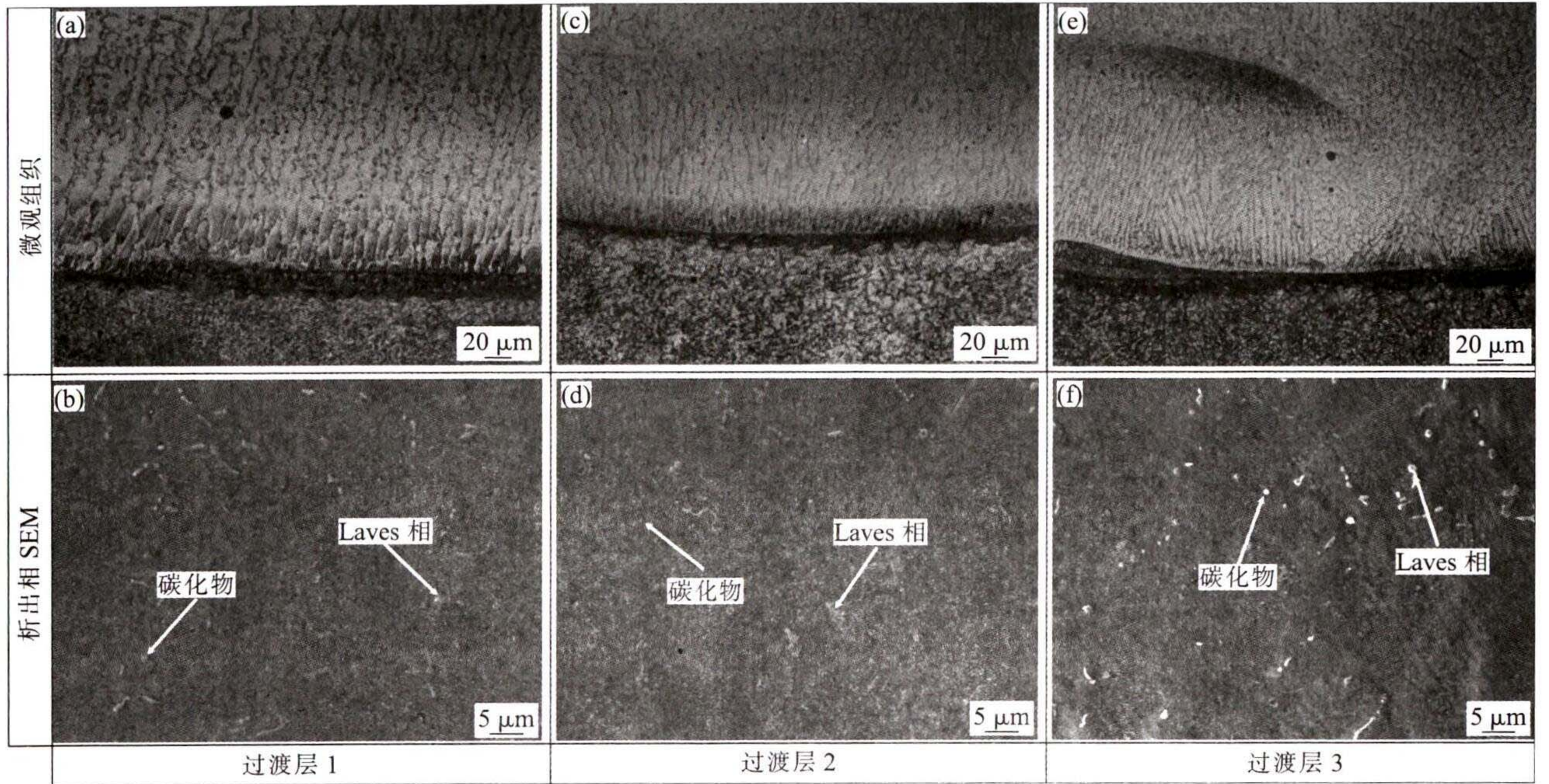


图4 不同Fe含量过渡层微观组织形貌和析出相SEM形貌

Fig.4 Microstructure and SEM morphologies of transition layer with different Fe contents

析出相SEM形貌。可见,随着Fe含量的增加,过渡层晶粒尺寸减小,且基体中的Laves相含量有减少的趋势;Laves相含量的减少会释放出Mo、Nb等溶质元素,有助于颗粒状的MC相析出,对过渡层起到强化作用。Fe元素的加入会提高Inconel625合金熔体的热力学稳定性,减缓溶质元素偏析现象,从而减小晶粒尺寸,降低Laves相含量。

2.2 界面元素扩散情况分析

合金元素的扩散对熔覆层组织、性能的演化起至关重要的作用^[20-21]。为了分析Q345基材/镍基过渡层/Inconel625熔覆层结合界面的元素扩散情况,对界面区域进行了EDS线扫描测试,试验结果如图5所示。可以看出,在基材/镍基过渡层界面处,各元素含量均发生了不同程度的突变,元素相互扩散

的距离较短,表明熔覆层金属的稀释率较小。因此,后续试验过程中须按照材料的合金成分,依据相形成次序及原理设计相应的过渡层合金系,从而实现梯度过渡,进一步优化界面连接行为,镍基过渡层/Inconel625熔覆层界面处元素浓度过渡平缓,Inconel625熔覆层中的Fe含量有明显减少,Cr、Mo、Nb等固溶强化元素浓度升高,说明过渡层有效减少了Fe元素对Inconel625熔覆层的稀释作用。

2.3 显微硬度分析

为了表征合金元素对熔覆层的强化效果,对Q345基材/镍基过渡层/Inconel625熔覆层的显微硬度进行了测试,如图6所示。从图中可以看出,从基材到镍基过渡层,硬度呈现先升高后降低的趋势,过渡层硬度整体高于基体;结合界面处靠近过渡层

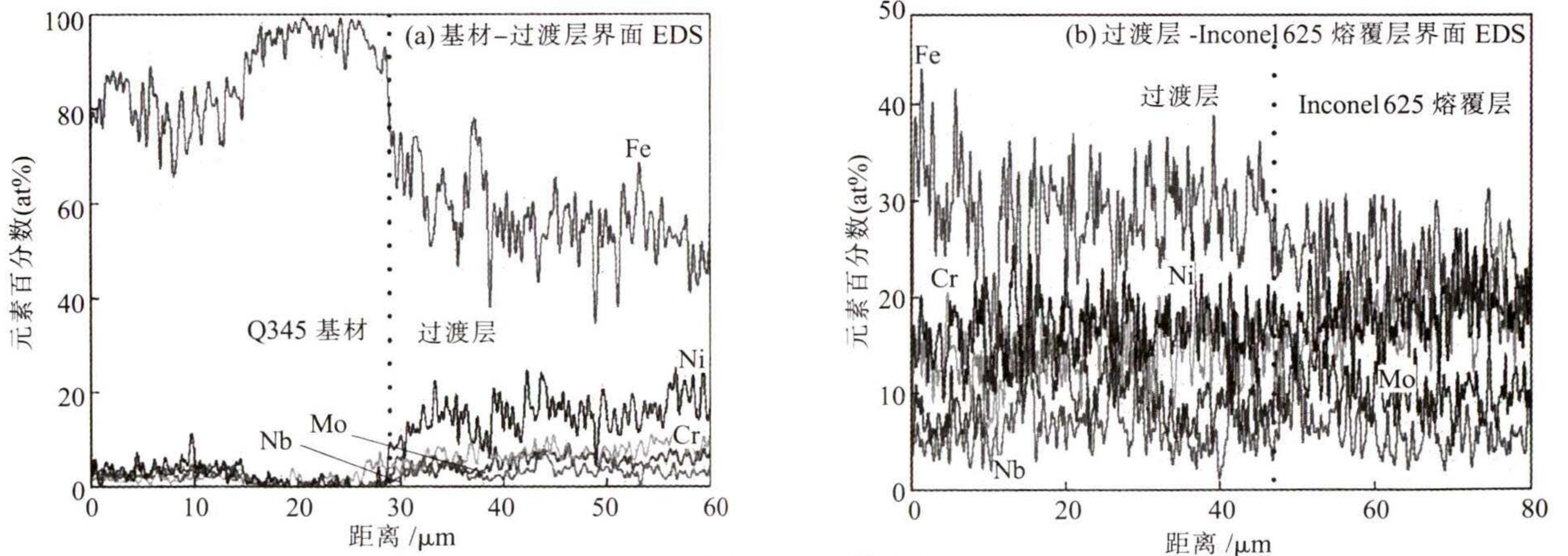


图5 界面元素扩散分析

Fig.5 Diffusion analysis of interface elements

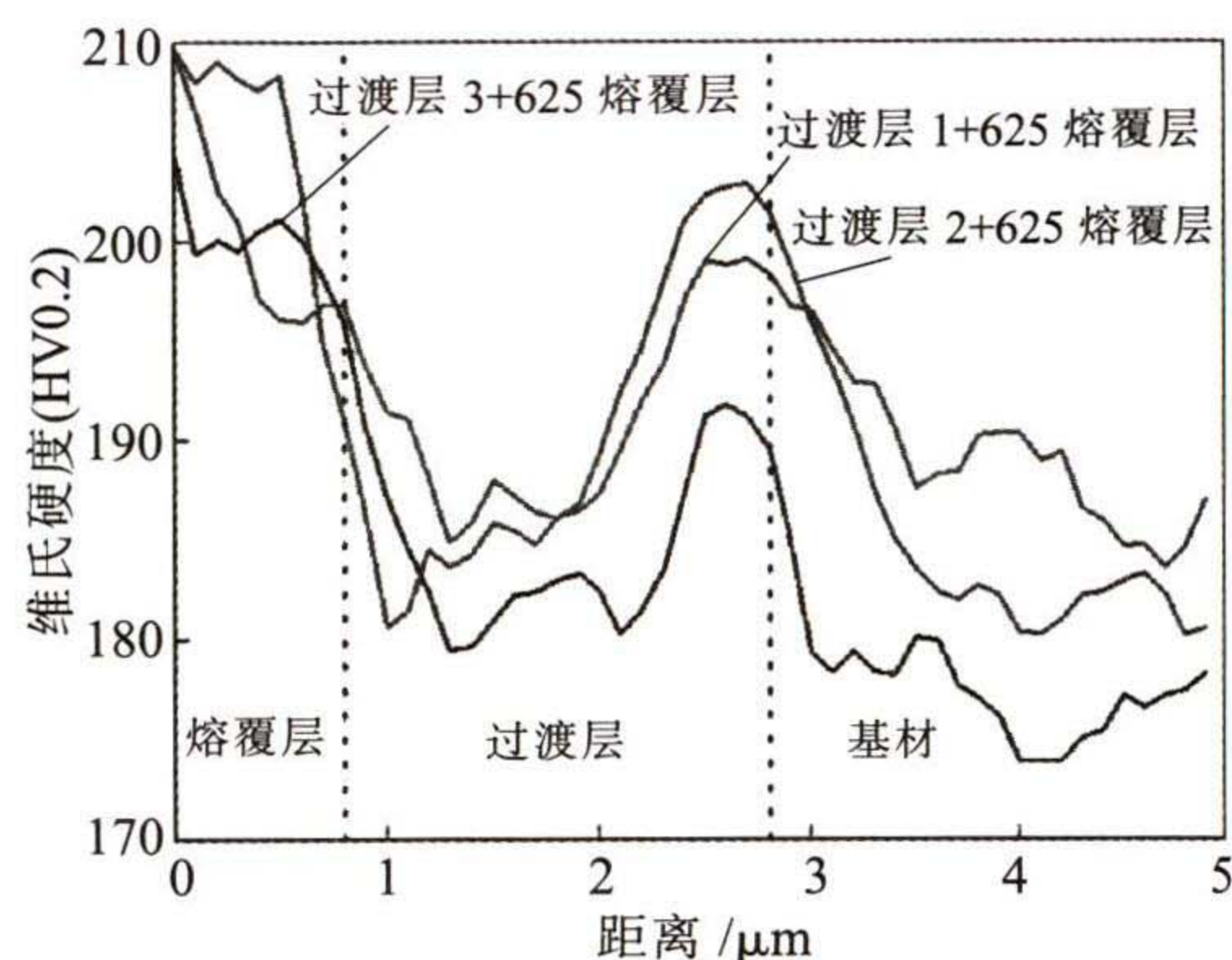


图6 整个熔覆层的显微硬度测试结果

Fig.6 Microhardness test results of whole fusion layers

一侧出现硬度峰值,其原因是基体散热能力强,熔池凝固速率快,凝固组织结构致密,元素偏析程度小,硬度值高。过渡层到 Inconel625 熔覆层硬度快速升高,由于熔覆 Inconel625 熔覆层时,对过渡层有重复热输入的作用,导致熔合边界靠近过渡层一侧的晶粒粗化,硬度降低;Inconel625 熔覆层受 Fe 元素稀释影响小,固溶强化元素含量高,因此硬度高。

3 结论

(1) 利用 TIG 堆焊方法制备的 Ni 基过渡层与 Q345 基材结合良好,无明显的宏观缺陷。在成分过冷的影响下,熔覆层由下至上依次形成了胞状晶、胞状树枝晶、柱状树枝晶和等轴晶形貌。

(2) 熔覆层主要由单一的 Ni-Cr-Fe 固溶体相组成,但存在微观偏析,其中 Fe、Ni 在树枝晶内浓度较高,枝晶间浓度较低;Cr 元素在凝固过程中逐渐析出,形成球状和棒状析出相分布在基体上。

(3) 基材与熔覆层间元素扩散的距离较远,熔覆层稀释率较低;过渡层中 Ni 元素向基材中扩散相对较多,这有利于提高基材/过渡层界面的结合强度。

(4) 由基材到 Inconel625 熔覆层的显微硬度逐渐升高。由于热历史不同,过渡层熔合边界处出现硬度峰值和硬度降低的现象,Inconel625 熔覆层受 Fe 元素稀释影响小,固溶强化元素含量高,硬度最高。

参考文献:

[1] 王会阳,安云岐,李承宇,等. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. 材料导报,2011,25(S2):482-486.
 [2] 李晓莉,刘文今,钟敏霖. 高温合金 K403 的激光熔覆研究[J]. 应用激光,2002,22(3):283-286.
 [3] 曾大文,夏辉,谢长生. Ni 基合金激光熔覆层组织特征及凝固过程的研究[J]. 稀有金属材料与工程,2000,29(2):109-113.
 [4] 张军,介子奇,黄太文,等. 镍基铸造高温合金等轴晶凝固成

形技术的研究和进展[J]. 金属学报,2019,55(9):1145-1159.
 [5] Mathew M D, Parameswaran P. Microstructural changes in alloy 625 during high temperature creep[J]. Materials Characterization,2008,59(5):508-513.
 [6] Suave L M, Cormier J, Villechaise P, et al. Microstructural evolutions during thermal aging of alloy 625[J]. Metallurgical and Materials Transactions A,2014,45(7):2963-2982.
 [7] Mukherji D, Rösler J. Effect of the γ' volume fraction on the creep strength of Ni-base superalloys [J]. International Journal of Materials Research,2003,94(5):478-484.
 [8] 程海松,刘岗,雷刚,等. 燃煤锅炉受热面高温腐蚀防护涂层技术研究进展 [J]. 材料导报,2020,34(S1):433-435.
 [9] Carroll B E, Otis R A, Borgonia J P, et al. Functionally graded material of 304L stainless steel and inconel 625 fabricated by directed energy deposition:Characterization and thermodynamic modeling[J]. Acta Materialia,2016,108:46-54.
 [10] 郭龙龙,郑华林,李悦钦,等. 热丝脉冲 TIG 堆焊 Inconel 625 的组织及性能[J]. 中国表面工程,2016,29(2):77-84.
 [11] Safarzade A, Sharifitabar M, Afarani M S. Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Inconel 625 alloy fabricated by wire arc additive manufacturing process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2020,30(11):3016-3030.
 [12] 郭泉,徐锴,霍树斌,等. 镍基合金焊丝 GTAW 熔敷金属凝固偏析行为[J]. 焊接学报,2019,40(7):105-108.
 [13] Wang Y, Shi J, Wang Y. Reinforcing Inconel 718 superalloy by nano-TiC particles in selective laser melting[C]//International Manufacturing Science and Engineering Conference,2015,56833.
 [14] Liu F, Lin X, Huang C, et al. The effect of laser scanning path on microstructures and mechanical properties of laser solid formed nickel-base superalloy Inconel 718[J]. Journal of Alloys and Compounds,2011,509(13):4505-4509.
 [15] Carter L N, Martin C, Withers P J, et al. The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy [J]. Journal of Alloys and Compounds,2014,615:338-347.
 [16] 孙宁,方艳,张家奇,等. WC-12Co 添加量对激光熔覆 Inconel 625 基复合材料微观组织和耐磨性能的影响 [J]. 中国激光,2021,48(6):93-102.
 [17] 刘庆丰. Si 和 Mn 含量对 In625 合金组织和拉伸性能的影响 [D]. 沈阳:沈阳理工大学,2016.
 [18] Kenik E A, Maziasz P J, Swindeman R W, et al. Structure and phase stability in a cast modified-HP austenite after long-term ageing[J]. Scripta Materialia,2003,49(2):117-122.
 [19] 贾鹏,王恩刚,鲁辉,等. 电磁场对 Inconel 625 合金凝固组织及力学性能的影响[J]. 金属学报,2013,49(12):1573-1580.
 [20] 郭岩,侯淑芳,周荣灿. 时效对 IN625 合金组织结构及拉伸性能的影响[J]. 动力工程学报,2010,30(12):966-970
 [21] Singh J B, Verma A, Jaiswal D M, et al. Rejuvenation of service exposed ammonia cracker tubes of cast Alloy 625 and their re-use[J]. Materials Science & Engineering A,2015,644:254-267.