

# 不同预边堆焊过渡层对 12Cr2Mo1R/S30408 接头组织与性能的影响

刘光银<sup>1</sup>, 黄健康<sup>1,✉</sup>, 于晓全<sup>1</sup>, 张建晓<sup>2</sup>, 樊丁<sup>1</sup>

1 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050

2 兰州兰石重型装备股份有限公司, 兰州 730314

针对厚板低合金耐热钢和奥氏体不锈钢异种钢焊接存在的难题, 提出在耐热钢一侧预边堆焊 2~3 mm 厚的 E309L、ENiCrFe-3、ENiCrMo-3 三种不同过渡层, AA-TIG 焊打底及埋弧焊填充的高效高质量的焊接方法。采用金相显微镜和扫描电镜观察界面微观组织形貌, 采用电子探针分析界面合金元素分布, 采用显微硬度和拉伸试验对接头力学性能进行测试。结果表明: 12Cr2Mo1R 母材/堆焊层界面处 Cr、Ni、Fe 元素存在大的浓度梯度, E309L 堆焊层焊缝组织的铁素体含量大于 ENiCrMo-3 和 ENiCrFe-3 堆焊层。通过电子探针发现, 碳原子在靠近融合线的晶界处有富集的现象, 在 ENiCrMo-3 堆焊层中有  $M_{23}C_6$  碳化物析出相。E309L、ENiCrFe-3、ENiCrMo-3 堆焊层与母材界面的最高硬度依次增加, 且向中心方向逐渐降低。E309L、ENiCrFe-3、ENiCrMo-3 三种过渡层的焊缝接头的拉伸强度分别为 608.1 MPa、596.2 MPa、564.5 MPa, 断后伸长率分别为 21.7%、21.2%、18.2%, 且断口形貌都呈韧窝状。

关键词 异种钢焊接 埋弧焊 过渡层 碳化物

中图分类号: TG457 文献标识码: A

## Influence of Different Pre-edge Surfacing Transition Layers on the Structure and Properties of 12Cr2Mo1R/S30408 Joint

LIU Guangyin<sup>1</sup>, HUANG Jiankang<sup>1,✉</sup>, YU Xiaquan<sup>1</sup>, ZHANG Jianxiao<sup>2</sup>, FAN Ding<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-Ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2 Lanzhou Lanshi Heavy Equipment Co., Ltd., Lanzhou 730314, China

Aiming at the welding problem of thick plates for low-alloy heat-resistant steel and S30408 austenitic stainless steel, this work proposed a high efficiency and quality welding process, which adopted different transitions layer of E309L, ENiCrFe-3, ENiCrMo-3 with the thickness of 2—3 mm on the side of the heat-resistant steel, then used AA-TIG welding method to weld back side, and used finally submerged arc welding for filling. Metallographic microscope and scanning electron microscope were used to observe interfacial microstructure, and electro probe micro-analysis was performed to analysis alloy elements distribution at the interface. Microhardness and tensile tests were used to test the mechanical properties of the weld joint. The results show that there is a great concentration gradient of Cr, Ni and Fe elements at the interface of 12Cr2Mo1R base metal/transition layer. The ferrite content in the weld of the E309L transition layer is more than ENiCrMo-3 and ENiCrFe-3. The electro probe micro analysis (EPMA) results show that C atom is enriched at the grain boundaries, and the  $M_{23}C_6$  carbide-phases is formed in ENiCrMo-3 transition layer. The hardness of interface between base metals and the E309L, ENiCrFe-3 and ENiCrMo-3 transition layer, increases sequentially and gradually decreases toward the center. The tensile strengths of the weld joints of E309L, ENiCrFe-3 and ENiCrMo-3 are 608.1 MPa, 596.2 MPa, 564.5 MPa and the elongation are 21.7%, 21.2%, 18.2%, respectively. All fracture surfaces show the dimple-like morphology.

Key words dissimilar steel welding, submerged arc welding (SAW), transition layer, carbide phases

## 0 引言

异种钢焊接技术目前广泛应用于压力容器设备制造<sup>[1-2]</sup>, 所采用的焊接方法主要有埋弧焊、窄间隙焊等<sup>[3-4]</sup>。特别是在石化反应器生产中, 普通耐热钢难以满足高温、强腐蚀的复杂服役环境, 全采用不锈钢会大幅提高制造成本。在不同位置采用不同钢材能够最大限度发挥材料的性能及降低生产成本, 这种设计已得到了广泛应用。压力容器往往选用中大厚板, 而埋弧焊方法具有焊接效率高、焊接质量稳定等优点, 被广泛应用在压力容器生产中。12Cr2Mo1R 低合金耐热钢和 S30408 奥氏体不锈钢是石化装备生产中常用的两类钢材<sup>[5]</sup>, 奥氏体不锈钢主要用于强腐蚀环境, 在高温、低腐蚀段则选用成本较低的低合金耐热钢材。因为设备长期在高温、高压和强腐蚀环境中运行<sup>[6]</sup>, 所以对焊缝强度和耐腐蚀性能的要求很高。但异种钢的合金成分和物理性能等存在较大的差异, 焊后残余应力大<sup>[7]</sup>, 易产生冷裂纹等缺陷<sup>[8]</sup>。其次, 焊接填充材料常采用 Ni 基合金焊丝, 其合金成

分与耐热钢母材相差较大, 大的合金成分差异会造成元素扩散<sup>[9]</sup>, 焊缝易被母材稀释, 造成奥氏体形成元素不足<sup>[10]</sup>, 从而形成力学性能较差的马氏体组织和脆硬相。

12Cr2Mo1R 低合金耐热钢和奥氏体钢焊丝中的 Cr、C 含量差异较大, 母材中的 C 原子将会向焊缝中迁移、扩散。碳的迁移是由其化学势的差异引起的, 即母材金属-焊接区界面两侧碳活性的差异, 尤其是焊接金属和母材之间的碳化物形成元素 Cr、Mo、V、Nb 等和非碳化物形成元素 Si、Al、Ni 的含量<sup>[11]</sup>。碳原子扩散造成接头出现低碳区, 在高温服役中, 低碳软化区会降低接头的力学性能<sup>[12]</sup>。在接头的熔合线附近易形成凝固过渡层, 过渡层 Ni 含量低于 5%~6% 时会生成马氏体组织, 造成接头性能下降<sup>[5]</sup>。在低合金钢一侧预边堆焊 Ni 基合金过渡层, 可以有效调控焊缝合金成分、组织及阻碍碳迁移。You 等<sup>[13]</sup>通过在 9Cr-1Mo 钢上堆焊不同金属过渡层, 发现过渡层对碳迁移有显著影响。研究人员对 15CrMoR/0Cr18Ni9 异种钢焊接进行研究, 发现预边堆焊合适的过渡层后焊缝中没有明显的脱碳层和增碳层出现, 接头力

学性能较好<sup>[14]</sup>。

目前,关于大厚板不锈钢/耐热钢焊接中减少界面元素扩散的研究多采用一种预堆焊过渡层,而堆焊多种过渡层及其对接头组织与性能的对比分析报道较少。因此,研究不同堆焊过渡层对异种钢焊缝界面组织、合金元素分布以及力学性能的影响,对过渡层的选择及工艺参数优化具有重要意义。本工作对比了 E309L、ENiCrFe-3、ENiCrMo-3 三种焊条预边堆焊过渡层对焊缝接头元素分布、组织及力学性能的影响,通过分析总结过渡层对接头性能的影响机理,为异种钢的焊接工艺开发提供理论指导。

## 1 实验

试验母材为 12Cr2Mo1R 低合金耐热钢和 S30408 奥氏体不锈钢两种材料,12Cr2Mo1R 低合金耐热钢供货状态是回火态,组织为珠光体+贝氏体的混合组织且晶粒细小均匀。S30408 不锈钢供货状态也是回火态,其组织由等轴奥氏体晶粒组成,在沿着轧制方向上排列有长条状铁素体,这是在热-机加工时 Cr 元素偏聚残留的高温  $\delta$  铁素体,钢板规格为 120 mm×60 mm×40 mm。焊接示意图如图 1 所示,坡口角度为 60°,钝边厚度为 10 mm。

表 1 焊接材料及母材的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition (mass fraction, %) of welding materials and base materials

Material	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Nb+Ta	Fe	Ti	Mo
E309L	0.028	0.005	0.016	0.75	1.53	23.66	12.83	—	Bal.	—	0.2
ENiCrFe-3	0.027	0.006	0.007	0.40	6.63	15.00	68.0	2.2	8.3	0.10	—
ENiCrMo-3	0.018	0.003	0.004	0.60	0.36	20.15	Bal.	3.76	1.85	—	8.09
12Cr2Mo1R	0.13	0.003	0.005	0.05	0.51	2.43	0.12	—	Bal.	0.01	1.02
S30408	0.02	0.002	0.003	0.5	1.68	18.5	8.2	—	Bal.	—	—

金相试样用砂纸打磨机械抛光后腐蚀,腐蚀液按三氯化铁、硝酸、丙三醇、水的比例为 10 g:20 mL:15 mL:25 mL 进行配制。采用激光共聚焦显微镜观察接头的微观组织形貌,采用 SEM、EDS 对 12Cr2Mo1R/焊缝界面处的元素线分布和拉伸断口微观形貌进行观察,采用 EPMA 检测焊缝区域元素面分布情况。最后采用显微硬度仪和拉伸试验机对接头力学性能进行测试。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters

Welding process	Current, I/A	Voltage, U/V	Welding speed, V/(mm/min)
SMAW	140—150	22—24	150—160
AA-TIG	1 165, 260	—	60
SAW	420—450	30—32	340

## 2 结果与分析

腐蚀后焊接接头的横截面宏观形貌如图 2 所示,可以看出分布明显的多层多道埋弧焊缝,焊接接头由母材、热影响区、焊缝以及未被完全熔化的堆焊过渡层构成,并且焊缝界面区域没有气孔、夹杂物和裂纹,埋弧焊各道焊缝之间熔合良好。

预边堆焊过渡层是为了降低耐热钢对焊缝合金成分的稀释程度并阻碍碳元素向焊缝扩散和迁移。图 3 为三种不同过渡层的焊缝/过渡层界面形貌,熔合线附近的耐热钢晶粒

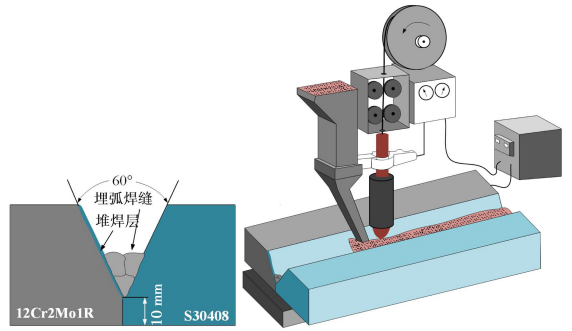


图 1 焊接示意图

Fig.1 Schematic diagram of welding

预边堆焊材料选用 E309L 不锈钢焊条和 ENiCrFe-3、ENiCrMo-3 两种镍基焊条,埋弧焊采用直径为 1.2 mm 的 ER308 焊丝,所匹配的焊剂为 SJ601,焊接材料和母材的化学成分如表 1 所示。焊接前需加工 Y 型坡口,并将钢板表面的铁锈、油污打磨和清洗干净。焊接试验分为三组,分别在耐热钢侧堆焊不同的过渡层,过渡层采用焊条电弧焊,堆焊层厚度为 2~3 mm。采用电弧辅助活性 TIG 焊(AA-TIG 焊)对试板进行一次成型打底焊,最后采用多层多道埋弧焊对接头进行填充和盖面,各焊接方法的工艺参数如表 2 所示。

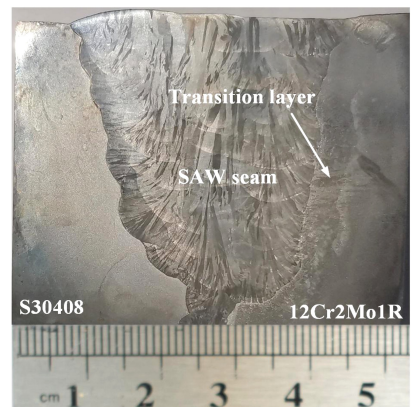


图 2 焊接接头截面宏观形貌

Fig.2 Topography of cross section of welded joint

相较于母材生长明显,这是因为在焊接热循环作用下该区域组织全部转变为铁素体。当该区域形成单相微结构时,次生相在铁素体晶界的钉扎效应减弱,容易发生晶界迁移,导致晶粒生长<sup>[15]</sup>。由于三种堆焊层所采用的工艺参数相同,三种情况下母材组织相近。

三种焊条得到的堆焊层组织形貌的差异较大,E309L 堆焊层根部呈现粗大的柱状晶粒,熔融金属以基材中部分熔化的晶粒为基础继续生长,并与其存在一定的晶体位相关系。在晶界及基体内部存在的黑色蠕虫状组织为  $\delta$  铁素体,如图 3a 所示。如图 3b 所示,ENiCrFe-3 堆焊过渡层根部组织为

细长的针状和团簇状奥氏体,其宽度为 4~6  $\mu\text{m}$ ,在奥氏体晶界处分布着连续  $\delta$  铁素体。生成细小的组织是由于 ENiCrFe-3 中有一定的 Mn、Ti、Si 元素,能促进液态金属形核,以半熔化晶粒表面为附着点进行生长的粗大奥氏体被抑制,从而被大量形核晶粒取代。图 3c 为 ENiCrMo-3 堆焊过渡层的组织形貌,与 ENiCrFe-3 过渡层类似,但组织中的  $\delta$  铁素体含量较高并以骨架状分布在奥氏体晶界处,ENiCrMo-3 中 Mo 含量较高,而 Mo 是促进铁素体形成的元素,能够在组织中保留更多的  $\delta$  铁素体相。

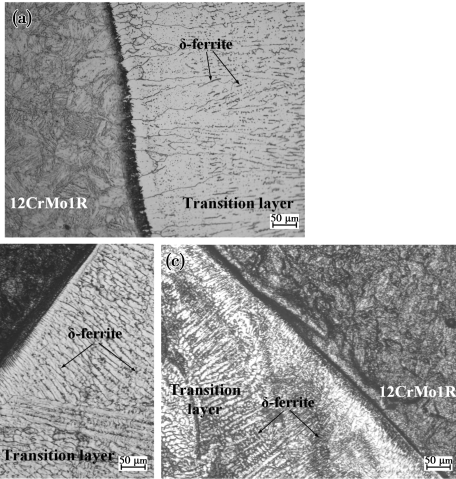


图 3 12Cr2Mo1R/堆焊层界面形貌: (a) 12Cr2Mo1R/E309L 堆焊层; (b) 12Cr2Mo1R/ENiCrFe-3 堆焊层; (c) 12Cr2Mo1R/ENiCrMo-3 堆焊层  
Fig. 3 Microstructure of 12Cr2Mo1R/transition layer interface: (a) 12Cr2Mo1R/E309L transition layer; (b) 12Cr2Mo1R/ENiCrFe-3 transition layer; (c) 12Cr2Mo1R/ENiCrMo-3 transition layer

图 4 为三种预边堆焊层的焊缝组织的微观形貌。预边堆焊 E309L 过渡层焊缝奥氏体基体组织呈胞状树枝晶和铁素体骨架。这是由于在凝固开始时,晶核内部 Cr 含量较高,形成  $\delta$ -铁素体枝晶,而在外部的铬含量较低,在冷却时具有较少铬的枝晶外部转化为奥氏体,从而在枝晶核心留下富铬的  $\delta$ -铁素体骨架<sup>[16]</sup>,为典型的 AF 凝固模式。预边堆焊 ENiCrFe-3 过渡层的焊缝奥氏体基体呈平行生长的针状簇组织,

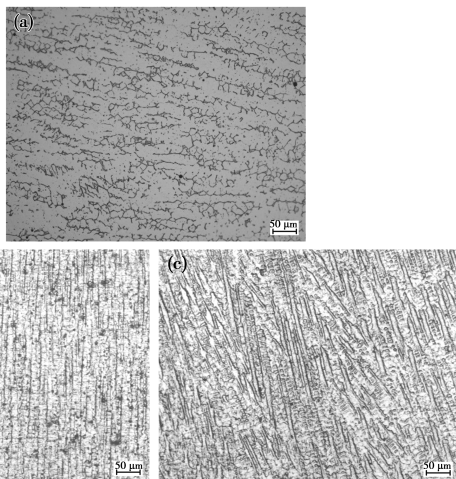


图 4 不同堆焊层下的焊缝: (a) E309L 堆焊层; (b) ENiCrFe-3 堆焊层; (c) ENiCrMo-3 堆焊层

Fig. 4 Weld morphology under different transition layer: (a) E309L transition layer; (b) ENiCrFe-3 transition layer; (c) ENiCrMo-3 transition layer

晶间宽度为 10~15  $\mu\text{m}$ 。预边堆焊 ENiCrMo-3 过渡层焊缝同样是以针状为主的奥氏体组织,针状奥氏体长度较短且互相交叉。

预边堆焊 ENiCrFe-3 堆焊层和 ENiCrMo-3 堆焊层的焊缝中奥氏体形貌由胞状树枝晶转变为针状组织,铁素体也由骨架状转变为颗粒状,且铁素体含量明显降低。镍基合金组织中的铁素体含量主要取决于  $\text{Cr}_{\text{eq}}$  和  $\text{Ni}_{\text{eq}}$ ,其中 E309L 的铬当量和镍当量比值( $\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}$ )最大,在埋弧焊过程中堆焊层熔化进入焊缝,使焊缝的  $\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}$  有所增加。因此,预边堆焊 E309L 过渡层的焊缝组织中铁素体含量相对较高。

12Cr2Mo1R/过渡层界面的元素分布是影响其组织和性能最直接的因素,为此对界面进行了元素分析。图 5 为堆焊 E309L、ENiCrFe-3、ENiCrMo-3 三种过渡层情况下 12Cr2Mo1R/过渡层界面的 Fe、Ni、Cr、C 四种元素的分布情况,三种界面的 Fe、Ni、Cr 元素都呈现梯度分布,其中从母材向焊缝方向 Fe 含量呈减少趋势,而 Ni、Cr 含量逐渐增加。值得注意的是,母材/ENiCrFe-3 过渡层界面的元素分布也呈现出两个梯度,从对应的图 6b 发现这是由于 ENiCrFe-3 过渡层未完全熔化所形成的,两个梯度分别是母材/ENiCrFe-3 过渡层熔合线和 ENiCrFe-3 过渡层/焊缝的熔合线。从图 5 可以看出,过渡层能明显地阻碍母材对埋弧焊缝的稀释。母材/ENiCrMo-3 过渡层的元素含量的梯度最大,这是因为:一方面,ENiCrMo-3 焊条与母材的合金成分差异较大;另一方面,熔池固-液界面区域的温度较低,该处液态金属粘度高且流动困难,使其不能与熔池中心充分混合。

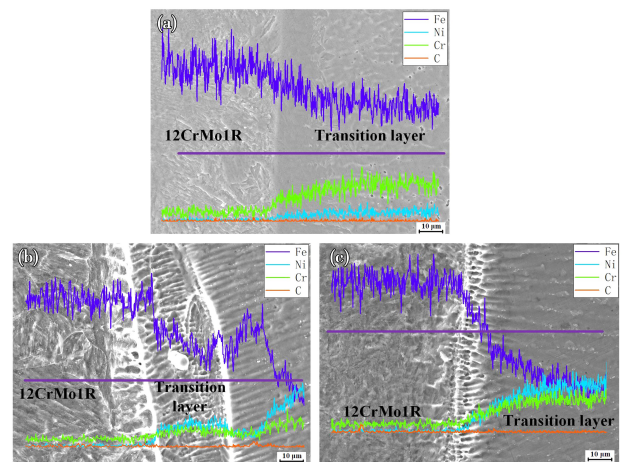


图 5 12Cr2Mo1R/堆焊层界面元素线扫描: (a) 12Cr2Mo1R/E309L 堆焊层; (b) 12Cr2Mo1R/ENiCrFe-3 堆焊层; (c) 12Cr2Mo1R/ENiCrMo-3 堆焊层 (电子版为彩图)

Fig. 5 Element line scan of 12Cr2Mo1R/surfacing layer interface: (a) 12Cr2Mo1R/E309L transition layer; (b) 12Cr2Mo1R/ENiCrFe-3 transition layer; (c) 12Cr2Mo1R/ENiCrMo-3 transition layer

过渡层的碳含量较低,在 EDS 下很难观测其含量变化及分布,因此采用 EPMA 对界面的碳含量进行检测。图 6 是三种 12Cr2Mo1R 母材/堆焊层界面的碳元素分布情况,碳元素主要分布在界面左侧的 12Cr2Mo1R 母材区域,堆焊层的碳含量极低,很难观察碳元素具体分布。为清楚观察碳元素在焊缝区域的分布情况,在 5000 $\times$ 条件下进行扫描,如图 6 中黄色线框内所示,E309L 过渡层中碳原子在晶界处存在明显的富集,这些区域对应着奥氏体晶界析出的  $\delta$  铁素体相。ENi-

CrFe-3 堆焊层的碳含量很低, 在奥氏体晶界处碳元素并没有出现明显的富集现象。在 ENiCrMo-3 堆焊层界面碳元素出现了明显的富集, 在图中标识区域为视野中的交叉晶界, 而且在晶界上存在一高碳区域, 如图 6c 所示。对该点进行成分分析, 测试结果表明, Fe、Cr、Mo、C 元素的摩尔分数分别为 33.99%、16.54%、2.99%、11.21%, 其中 Fe、Cr、Mo 合金元素与碳元素的物质的量比接近 23:5。由此确定在焊缝晶界处析出  $M_{23}C_6$  碳化物相。

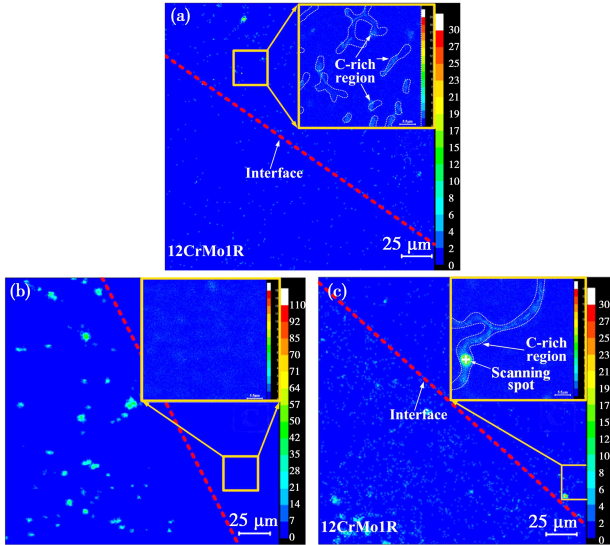


图 6 12Cr2Mo1R/堆焊层界面碳元素分布: (a) 12Cr2Mo1R/E309L 过渡层; (b) 12Cr2Mo1R/ENiCrFe-3 过渡层; (c) 12Cr2Mo1R/ENiCrMo-3 过渡层 (电子版为彩图)

Fig.6 C element distribution at the interface of 12Cr2Mo1R/surfacing layer: (a) 12Cr2Mo1R/E309L transition layer; (b) 12Cr2Mo1R/ENiCrFe-3 transition layer; (c) 12Cr2Mo1R/ENiCrMo-3 transition layer

12Cr2Mo1R/堆焊层界面区域的硬度分布如图 7 所示, 不同堆焊层对界面及组织硬度有显著影响, 预边堆焊 E309L、ENiCrFe-3、ENiCrMo-3 过渡层的界面区域硬度分别为 299.7HV、321.4HV、267.6HV。值得注意的是, E309L 堆焊层硬度最低, 而 ENiCrMo-3 堆焊层硬度最高, 并沿焊缝方向逐渐降低。堆焊层硬度主要取决于  $\delta$  铁素体含量及分布和晶粒尺寸<sup>[17-18]</sup>。这是因为沿堆焊层方向碳原子含量逐渐降低, 使得  $\delta$  铁素体含量也逐渐降低, 所以沿着堆焊层方向硬度逐渐降低。同时, ENiCrFe-3 和 ENiCrMo-3 过渡层奥氏体晶粒比 E309L 更细小且  $\delta$  铁素体在基体弥散分布, 因此其硬度较高。在相关研究结果中也存在类似的硬度分布<sup>[19]</sup>。

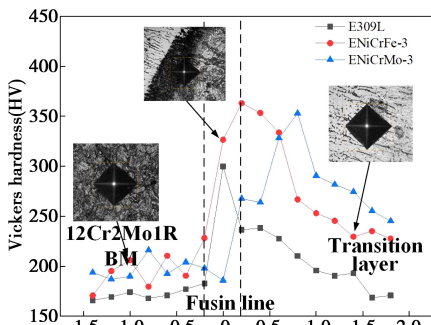


图 7 12Cr2Mo1R/堆焊层界面硬度分布 (电子版为彩图)  
Fig.7 The hardness distribution of the 12Cr2Mo1R/transition layer

本工作对焊缝接头进行了拉伸性能测试, 其应力-应变曲线如图 8 所示, 预边堆焊 E309L、ENiCrFe-3、ENiCrMo-3 三种过渡层的焊缝接头的拉伸强度分别为 564.5 MPa、596.2 MPa、608.1 MPa, 三种预边堆焊材料焊接接头的断后伸长率分别为 21.7%、21.2%、18.2%。其中, 预边堆焊 ENiCrMo-3 过渡层的焊缝抗拉强度最高, 而预边堆焊 E309L 过渡层的焊缝断后延伸率最高。综合来看, 预边堆焊 ENiCrFe-3 过渡层的焊缝兼具较好的抗拉强度和塑性变形, 这是由于不同堆焊层的焊缝中  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  存在差异, 导致焊缝铁素体含量和组织晶粒尺寸不同, 从而造成接头拉伸性能存在差异。图 9a—c 分别为三种焊接接头断口微观形貌, 三种焊接接头均呈韧性断裂, 从韧窝类别及大小来看, 预边堆焊 E309L 焊接接头断口韧窝更细小且均匀, 预边堆焊 ENiCrMo-3 焊接接头断口韧窝显得更粗大。

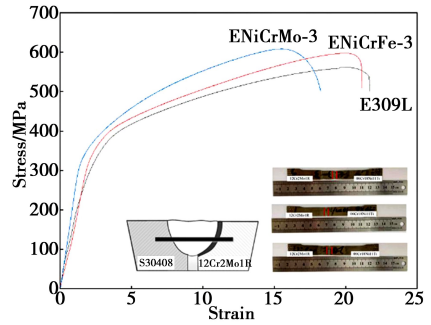


图 8 焊缝接头的应力-应变曲线 (电子版为彩图)  
Fig.8 Stress-strain curves of welded joint

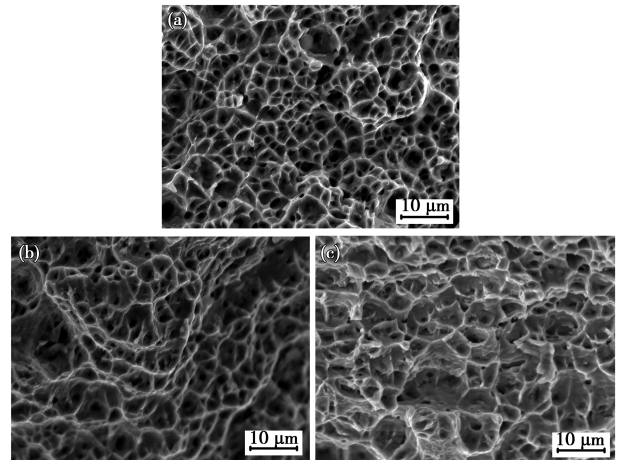


图 9 拉伸断口微观形貌: (a) E309L 堆焊层; (b) ENiCrFe-3 堆焊层; (c) ENiCrMo-3 堆焊层  
Fig.9 Micro morphology of tensile fracture: (a) E309L transition layer; (b) ENiCrFe-3 transition layer; (c) ENiCrMo-3 transition layer

### 3 结论

(1) 通过本试验所采用的工艺方法及参数得到了成形良好、无气孔和裂纹等缺陷的异种钢对接接头。预边堆焊 E309L 过渡层的焊缝组织是由骨架状铁素体和胞状奥氏体组成, 预边堆焊 ENiCrFe-3 和 ENiCrMo-3 过渡层的焊缝组织为针状奥氏体和颗粒状铁素体。

(2) 预边堆焊过渡层可有效阻碍碳迁移, 12Cr2Mo1R 母材侧的 E309L、ENiCrMo-3 堆焊层奥氏体晶界区域含碳量高,

母材/ENiCrMo-3 堆焊层界面的碳元素浓度梯度最大,并且堆焊层中存在  $M_{23}C_6$  相,ENiCrFe-3 堆焊层没有明显的富碳区,该堆焊层阻碍元素扩散的作用最大。

(3) 12Cr2Mo1R 母材热影响区硬度相近,E309L、ENiCrFe-3、ENiCrMo-3 堆焊层硬度分别为 299.7HV、321.4HV、267.6HV,且沿焊缝方向逐渐降低;预边堆焊 E309L、ENiCrFe-3、ENiCrMo-3 三种过渡层的焊缝接头的拉伸断裂均在焊缝处,断口都呈韧窝状,为典型韧性断裂,其中预边堆焊 ENiCrMo-3 可获得的最大抗拉强度为 608.1 MPa,E309L 具有最大断后延伸率(21.7%)。

## 参考文献

- Zhang Q, Wang J Q, Chen G H, et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(2), 396(in Chinese).  
张祺,王家庆,陈国宏,等. *中国有色金属学报*, 2013, 23(2), 396.
- Wu W, Hu S, Shen J. *Materials and Design*, 2015, 65, 855.
- Yang L, Wang C. *Hot Working Technology*, 2010(13), 158(in Chinese).  
杨莉,王仓. *热加工工艺*, 2010(13), 158.
- Nivas R, Singh P K, Das G, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 25, 274.
- Wang R, Wang F H, Tian H M, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(2), 58(in Chinese).  
王瑞,王凤会,田华明,等. *焊接学报*, 2013, 34(2), 58.
- Kulkarni A, Dwivedi D K, Vasudevan M. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 274, 116280.
- Zhang M, Zhang W H, Xiao J M, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(4), 67.



刘光银,2019年毕业于重庆理工大学,获得学士学位。现为兰州理工大学材料科学与工程学院硕士研究生,导师为黄健康,主要从事异种金属连接方面的研究。

- 张敏,张文辉,肖继明,等. *焊接学报*, 2020, 41(4), 67.
- Tan P, Han S W, Jiang X, et al. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2021, 35(12), 107.  
谭攀,韩世伟,蒋晓,等. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2021, 35(12), 107.
- Zhang G C, Liu S Y, Wu W, et al. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2021, 35(12), 113.  
张广川,刘世英,吴玮,等. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2021, 35(12), 113.
- Huang B S, Yang J, Lu D H, et al. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2016, 37(5), 45(in Chinese).  
黄本生,杨江,卢东华,等. *材料热处理学报*, 2016, 37(5), 45.
- Zheng Y W, Cai Z P, He Y C, et al. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(12), 74(in Chinese).  
郑云蔚,蔡志鹏,何雨晨,等. *机械工程学报*, 2016, 52(12), 74.
- Li K J, Cai Z P, Li Y F, et al. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(16), 150(in Chinese).  
李克俭,蔡志鹏,李轶非,等. *机械工程学报*, 2015, 51(16), 150.
- You Y Y, Shiue R K, Shiue R H, et al. *Journal of Materials Science Letters*, 2001, 20(15), 1429.
- Wu M F, Wang H M, Bao W R. *Hot Working Technology*, 2009, 38(5), 113(in Chinese).  
吴铭方,王慧敏,保武蓉. *热加工工艺*, 2009, 38(5), 113.
- Jalal K, Morteza S. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 26, 407.
- Moteshakker A, Danaee I. *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, 32(3), 282.
- Sridhar R, Ramkumar K D, Arivazhagan N. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 27, 1018.
- Mehdi R, Abbas E, Morteza S. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23, 3745.
- Ramkumar K D, Singh A, Raghuvanshi S, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 19, 212.

(责任编辑 杨霞)



黄健康,教授。2005年毕业于湘潭大学,获得学士学位;2007年毕业于兰州理工大学,获得硕士学位;2010年毕业于兰州理工大学,获得博士学位。当前主要从事高温高熵合金的材料制备,非晶、铝合金等领域的异种金属连接,焊接过程中物理、检测及控制等领域的研究,已发表论文 200 余篇。