

轧后冷却速度对真空热轧 N08367/Q345R 复合板组织与性能的影响

李国鹏¹, 骆宗安², 杨子江¹, 张志军¹, 沈开照¹

(1. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 河北 唐山 063205; 2. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:采用真空热轧复合法(VRC)制备了 N08367/Q345R 超级奥氏体不锈钢复合板,研究轧后不同冷却速度对 N08367/Q345R 复合板组织与性能的影响规律。结果表明:3 种不同冷却速度下复合板的平均剪切强度均大于 456 MPa,远超国家标准,水冷工艺下复合板剪切强度最高,达到 466 MPa。随着冷却速度的增加,Fe、Cr、Ni、Mo 元素的扩散距离减少,界面附近存在明显的脱碳层和渗碳层。微观硬度的极大值均位于渗碳区内,极小值位于脱碳区内。

关键词:冷却速度;真空热轧;超级奥氏体不锈钢;复合板

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20220159

中图分类号:TB331

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2022)18-0076-04

Effects of Cooling Rate after Rolling on Microstructure and Properties of N08367/Q345R Clad Plate by Vacuum Hot Rolling

LI Guopeng¹, LUO Zongan², YANG Zijiang¹, ZHANG Zhijun¹, SHEN Kaizhao¹

(1. Shougang Jingtang United Iron & Steel Co., Ltd., Tangshan 063205, China; 2. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: N08367/Q345R super austenitic stainless steel clad plates were prepared by vacuum hot rolling cladding (VRC). The effects of different cooling rates on the microstructure and properties of N08367/Q345R clad plates after rolling were studied. The results show that the average shear strength of the clad plates under three different cooling rates is more than 456 MPa, far beyond the national standard, and the shear strength of the clad plates under water cooling process is the highest, reaching 466 MPa. With the increase of cooling rate, the diffusion distance of Fe, Cr, Ni and Mo elements decreases, and there are obvious decarburizing layer and carburizing layer near the interface. The maximum values of microhardness is located in the carburizing zone and the minimum value is located in the decarburizing zone.

Key words: cooling rate; vacuum hot rolling; super austenitic stainless steel; clad plate

随着复合材料技术的不断进步,复合钢板压力容器在汽车、船舶、制盐、造纸以及石化炼化等领域都得到了广泛的应用^[1]。压力容器用复合钢板种类较多,制备方式也较为多样,可使用不锈钢、钛及钛合金、铜及铜合金、镍及镍合金等作为复层材料制备满足不同需求的复合钢板,其中以不锈钢作为复层材料应用最为广泛^[2]。而 N08367 超级奥氏体不锈钢作为一种具有高抗点蚀、抗缝隙腐蚀的不锈钢,被大量应用于海水冷凝器的薄壁管等压力容器设备中,在国内也已经获得广泛的应用^[3]。但因在超级奥氏体不锈钢制备中使用大量贵重金属,导致成本高昂,

故制备超级奥氏体不锈钢复合板就迫在眉睫。

目前,国内主要采用堆焊复合法或爆炸复合法生产压力容器复合板。堆焊复合法工艺简单,但存在效率低、成本高且复层表面不光洁等问题;爆炸复合法易受环境和气候影响,且污染环境。真空热轧复合法(vacuum rolling cladding, VRC)是目前生产高品质耐蚀合金复合板的有效方法,制备的复合板基覆材之间冶金结合优良,具有广阔的前景。金贺荣等^[4]研究了热处理对 316L/Q345R 低碳钢复合板组织及力学性能的影响。骆宗安等^[5]研究采用钕夹层提高 TA2/304L 复合板耐腐蚀性的机理,并对其组织与性能进行了分析。目前对超级奥氏体不锈钢复合板的研究报道较少。本文研究了轧后在不同冷速下真空热轧 N08367/Q345R 复合板界面的显微组织、元

收稿日期:2022-01-18

作者简介:李国鹏(1995-),男,河北沧州人,硕士,主要研究方向:中厚板生产工艺;电话:15613810976;E-mail:851757613@qq.com

素扩散规律以及复合板的力学性能。

1 实验材料与方法

实验用覆板为 N08367 超级奥氏体不锈钢,尺寸为 150 mm×70 mm×8 mm;基板为 Q345R,尺寸为 180 mm×100 mm×40 mm。覆板和基板的化学成分见表 1。焊接前需要对两种板材的待复合面去除表面氧化物,露出金属光泽,然后用酒精和丙酮清洗后干燥。组坯时,采用 4 层对称组坯方式,先将两块中间

涂有氧化铝隔离剂的不锈钢焊接,放入凹槽后,再对 Q345R 容器钢进行封接,在真空度为 0.01 Pa 的真空电子束焊机中完成对外层容器钢的焊接,最后将焊接的复合坯加热轧制成复合板。组坯示意图如图 1 所示。将焊接成功的 3 组坯料随炉加热到 1200 ℃后保温 2 h,之后进行热轧复合,轧制速度为 1 m/s,总压下率为 80%,共轧制 12 道次。轧制后采用 3 种冷却方式由终轧温度 890 ℃冷却至室温,空冷、水冷和缓冷的冷速分别为 5、22、1.5 ℃/s。

表 1 覆板和基板的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical component of the clad plate and the substrate (wt%)

实验材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	Fe
N08367	0.016	0.063	0.28	0.024	0	23.8	22	6.3	0.17	0.22	余量
Q345R	0.16	0.45	1.40	0.012	0.008	—	—	—	—	—	余量



图 1 不锈钢 / 钢复合板的组坯示意图
Fig.1 Schematic diagram of billet formation of the stainless steel/steel clad plates

真空电子束焊接参数为:焊接速度 400 mm/min,覆材电子束流 25 mA、基材电子束流 45 mA。用 4%硝

酸酒精溶液对复合板基材进行腐蚀,在 OLYMPUS DSX500 金相显微镜、ULTRA55 场发射扫描电子显微镜下对复合界面组织进行观察;利用 JEOLJXA-8530F 电子探针对复合界面元素扩散进行分析;利用 FM-700 显微硬度仪、4206-006 型微控电子万能实验机分别对复合板进行硬度测试和剪切性能测试。

2 结果与讨论

2.1 复合界面的微观组织

图 2 为真空热轧复合不锈钢复合板界面的金相组织。由图 2 可见空冷、水冷、缓冷复合界面的微观组织。在 3 种不同冷速下,复合界面结合良好,界面

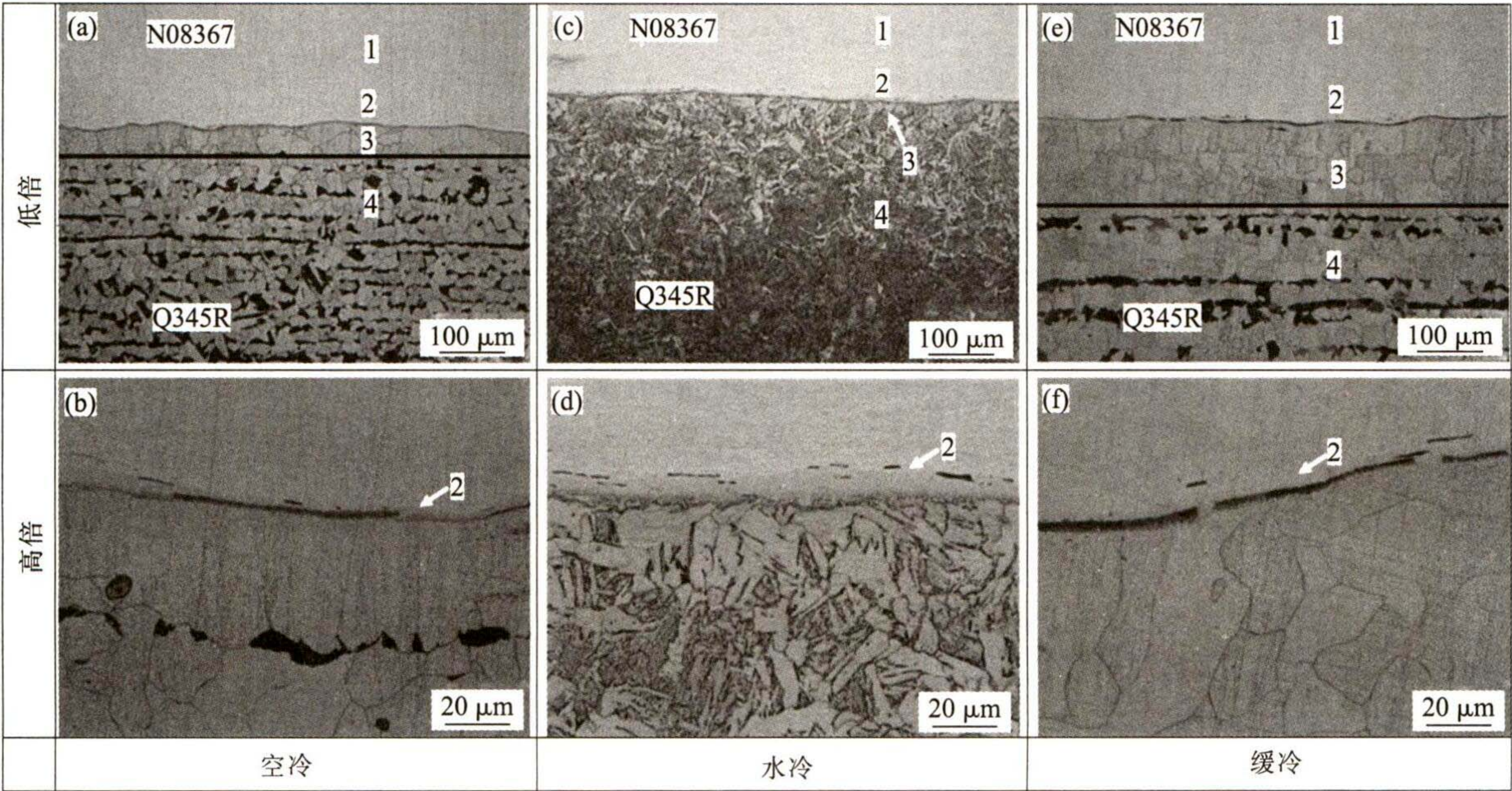


图 2 真空热轧复合不锈钢复合板的界面金相组织
Fig.2 Interface microstructure of the stainless steel clad plates made by vacuum hot roll cladding

平直,显微组织中无未复合的区域,且未出现孔洞,基材和覆材之间实现了良好冶金结合。对比爆炸复合板界面存在大于 $10\mu\text{m}$ 的未复合面^[9],真空热轧复合法制得的不锈钢复合板界面结合率更高。

从图2中可以看出,在轧后3种冷速下,复合界面附近组织均可分为4个部分:不锈钢基体区1、渗碳层2、脱碳层3和碳钢基体区4。由于采用4%硝酸酒精作为金相腐蚀剂,侵蚀能力较弱,不足以显示出不锈钢侧组织,因此不锈钢侧保持光亮,未被腐蚀。空冷与缓冷工艺下碳钢基体区为典型的热轧态组织,即铁素体和珠光体,而水冷后碳钢基体主要为

板条和针状马氏体。通过对比可以发现,随轧后冷速加快,脱碳层和容器钢基体的晶粒尺寸减小。热轧复合后的冷却过程中,复合板内部组织仍会进行静态回复和再结晶过程。不同冷却工艺复合板终轧温度基本一致,所以复合板材的再结晶晶粒尺寸主要受到轧后冷速的影响,表现为脱碳层和碳钢基体区内晶粒尺寸随冷速的加快而减小。

2.2 复合界面元素扩散分布

图3~5分别为空冷、水冷和缓冷下不锈钢复合板界面附近的Fe、Cr、Ni、Mo、C元素分布曲线。可见,在复合界面附近,Fe和C元素从容器钢侧向不锈钢

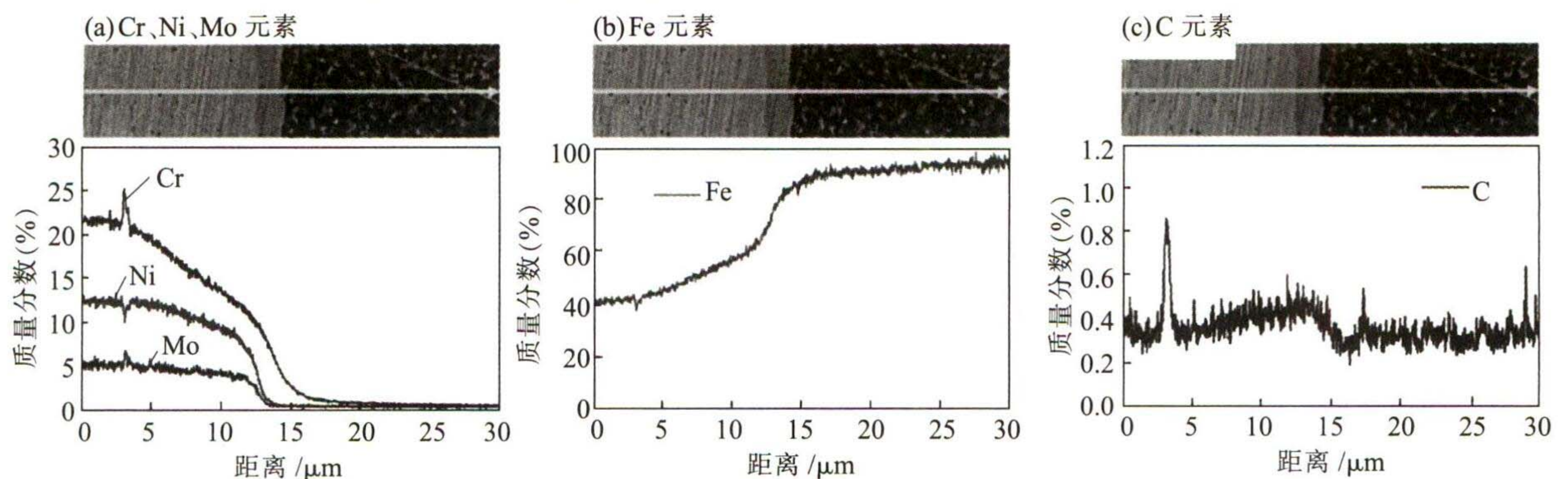


图3 空冷工艺下复合板界面附近元素的分布曲线

Fig.3 Elements distribution curves near the interface of the clad plate under air cooling process

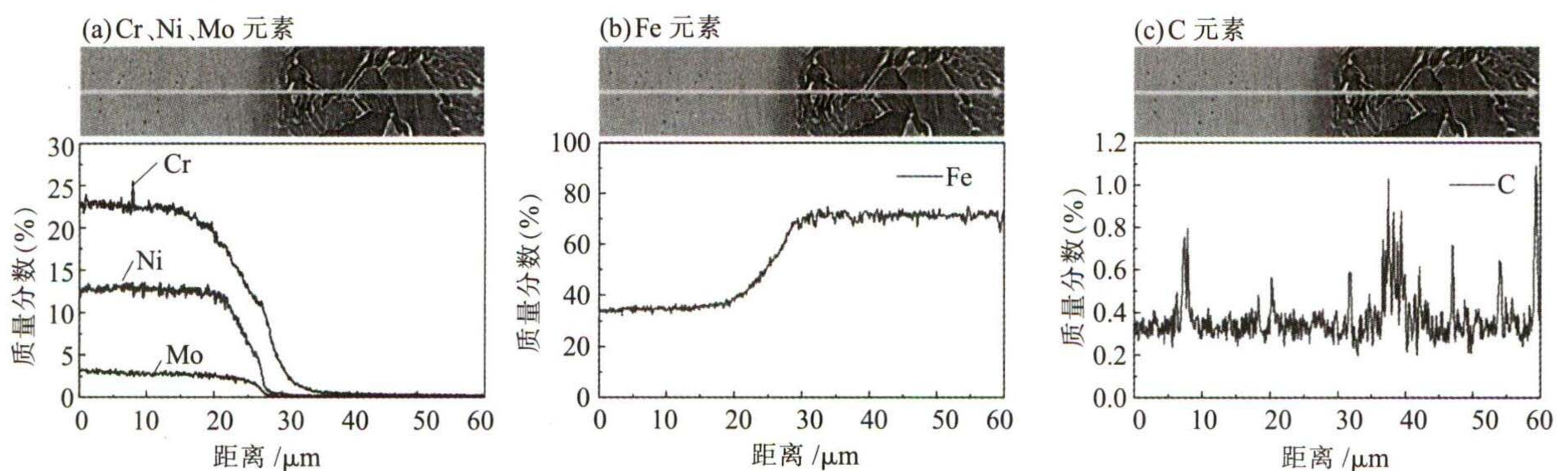


图4 水冷工艺下复合板界面附近元素的分布曲线

Fig.4 Elements distribution curves near the interface of the clad plate under water cooling process

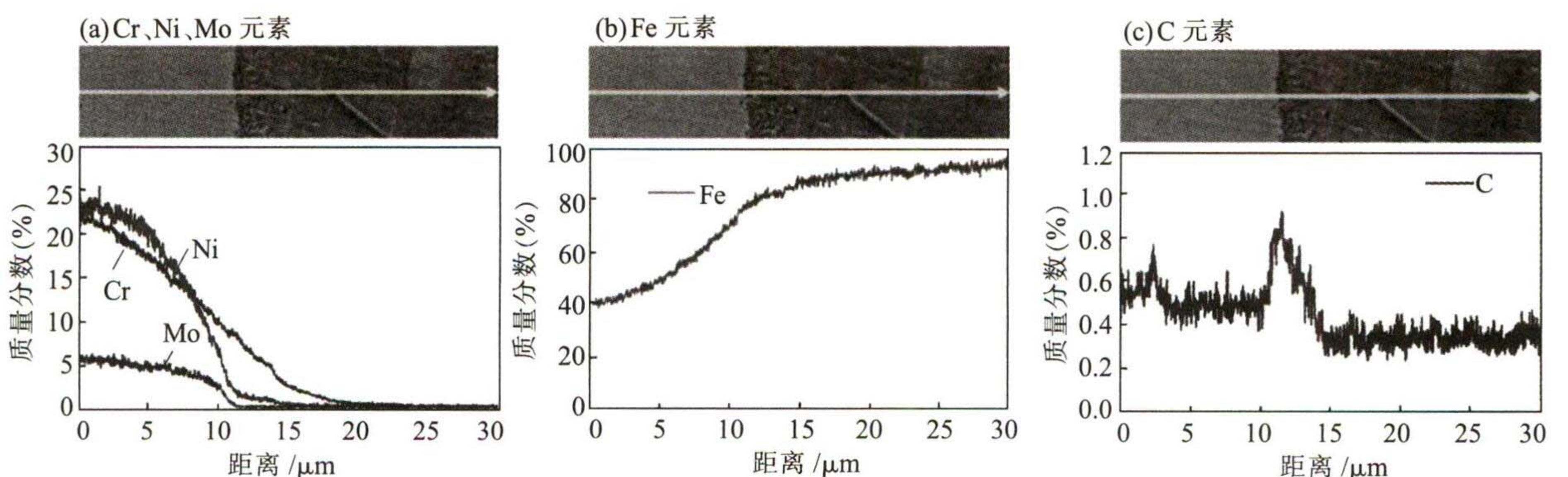


图5 缓冷工艺下复合板界面附近元素的分布曲线

Fig.5 Elements distribution curves near the interface of the clad plate under slow cooling process

侧扩散,Cr、Ni 和 Mo 元素从不锈钢侧向容器钢侧扩散,形成了明显的扩散区。根据热力学第二定律,当系统内某种元素存在浓度差异时,该元素会从浓度高的区域向浓度低的区域发生扩散。由于超级奥氏体不锈钢和容器钢在界面两侧 4 种元素均存在着较大的浓度梯度,且元素扩散主要发生在坯料加热、轧制复合及冷却过程^[7],所以 Fe、Cr、Ni、Mo 元素的扩散距离均随着轧后冷速的增加而减小。而 C 元素,在界面两侧浓度梯度与 α -Fe 和 γ -Fe 中的扩散速度差异影响下,发生上坡扩散与界面聚集现象。对比发现,在空冷与缓冷工艺下,界面附近 Cr 的扩散距离均超过 15 μm ,缓冷下 Cr 的扩散距离达到 20 μm ,而水冷工艺下 Cr 的扩散距离仅为 10 μm 左右;Ni、Mo 和 Fe 元素在轧后不同冷速下呈现了相同的扩散距离趋势。由图 5 可以看出,C 元素在缓冷工艺下,存在明显的界面聚集现象。

2.3 复合界面力学性能分析

界面结合状态是评价层状金属复合板材料的重要依据,较强的界面剪切强度不仅可以延迟在拉伸过程中局部颈缩的产生,提高复合板的韧性,而且可以防止复合板在冲压和成型过程产生皱纹和分层断裂^[8-9]。图 6 为不锈钢复合板压剪实验后的宏观照片。由图可见,3 种不同冷却工艺下,压剪断口均发生在复合界面附近,压剪实验所测得的结果为不锈钢复合板界面的剪切强度。

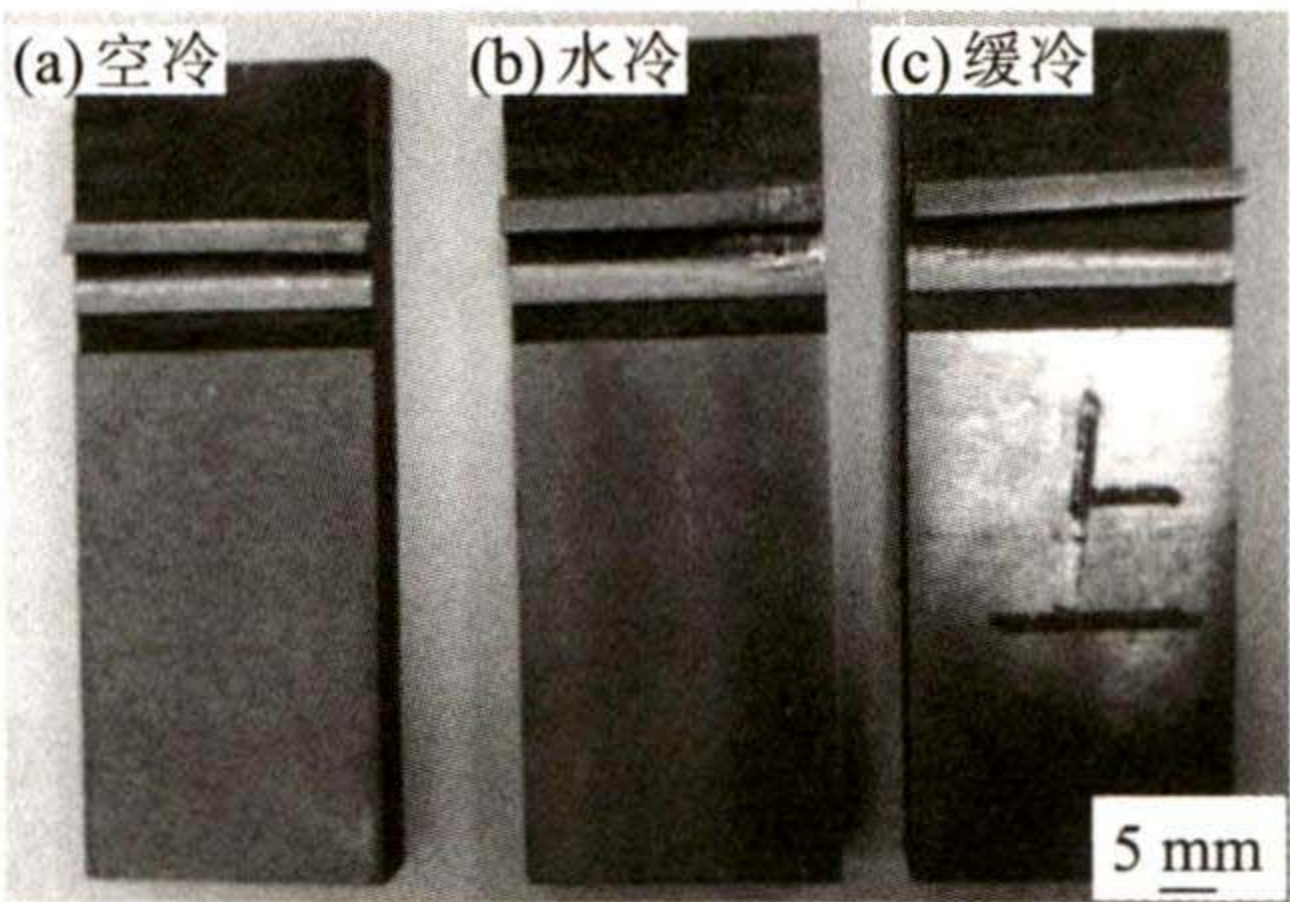


图 6 不同冷却工艺下断后试样的宏观照片
Fig.6 Macrography photos of fracture samples under different cooling processes

不同冷却工艺下复合界面剪切强度如表 2 所示。其中,轧后空冷与缓冷的复合板界面剪切强度相差不大,平均达到 456 和 466 MPa,受到界面附近元素扩散的影响,缓冷复合板的剪切强度要略高于空冷的,界面的冶金结合程度略高。而轧后水冷的复合板,由于界面附近晶粒尺寸适中且夹杂物较少,剪切强度达到 509 MPa。在轧制复合过程中,由于界面元素的扩散、晶体的再结晶过程及界面夹杂物共同

表 2 不同冷却工艺下复合板的剪切强度
Tab.2 Shear strength of the clad plates under different cooling processes

冷却工艺	剪切强度 /MPa			平均剪切强度 /MPa
空冷	445	454	469	456
水冷	504	507	517	509
缓冷	462	464	471	466

作用,对复合界面的结合强度造成了影响。在 3 种不同冷却工艺下,不锈钢复合板的剪切强度均远高于国家标准要求的 210 MPa^[10]。

图 7 为不同冷却工艺下不锈钢复合板界面附近显微硬度测试结果。由图对比发现,3 种不同冷却工艺下复合板的显微硬度分布趋势存在一定的差异:容器钢(Q345R)侧,由于轧后水冷的冷速较快,多为硬相组织,所以其硬度明显大于其它工艺下容器钢的硬度。且由于容器钢不同位置冷速不同,从近复合界面到容器钢中心再到表面,组织由铁素体到马氏体再到无碳化物贝氏体,容器钢的显微硬度从表面到复合界面呈现先上升再基本保持不变最后下降的趋势。而空冷和缓慢冷却工艺下容器钢侧的组织相差不大,硬度基本一致,分布趋势为从容器钢表面到复合界面,显微硬度先基本保持不变,随着靠近复合界面,硬度逐渐下降。不锈钢侧,在缓冷和水冷工艺下,不锈钢(N08367)侧的显微硬度相差不大,基本一致;而空冷的复合板不锈钢显微硬度,要略低于其它工艺下覆材不锈钢的硬度。不同冷却工艺下复合板不锈钢侧的显微硬度分布趋势无明显差异:从复合界面到不锈钢基体,硬度先上升后下降,最后其硬度趋于不锈钢基体的硬度。显微硬度的极大值均位于渗碳区内,极小值位于脱碳区内。

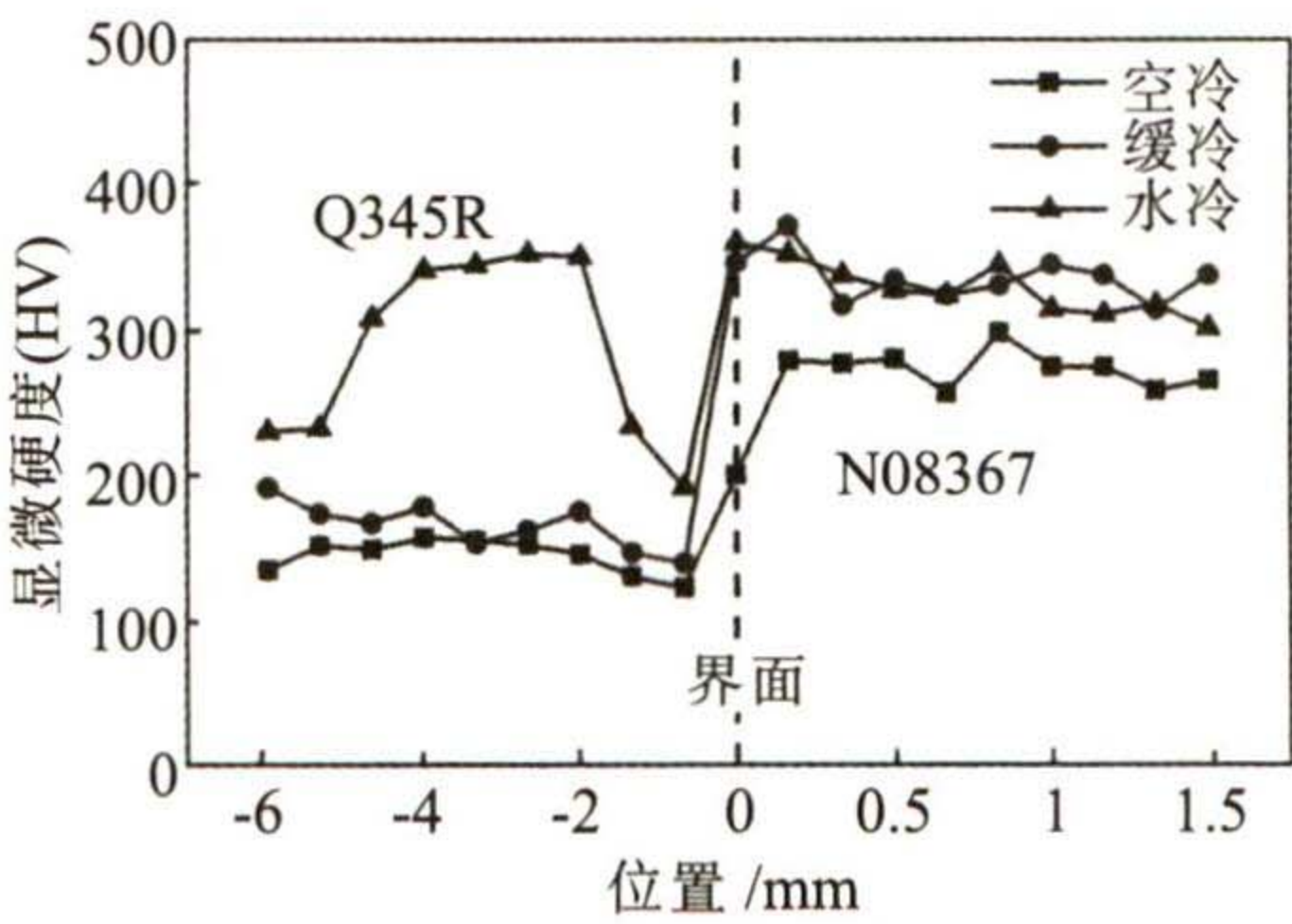


图 7 不同冷却工艺下复合板的显微硬度分布曲线
Fig.7 Distribution curves of microhardness of the clad plates under different cooling processes

3 结论

(1) 采用真空热轧复合法制备 (下转第 83 页)

间 1200 h、20wt% 的硫酸溶液为腐蚀性介质的条件下,普通钢管的质量损失率达到陶瓷内衬钢管的 100 倍以上。

(4) 普通钢管经过腐蚀试验后内径扩大明显,陶瓷内衬钢管的耐 20% H_2SO_4 腐蚀效果较好,试样内表面形貌在腐蚀试验前后未发生明显变化,也未有裂纹、孔洞等其他缺陷的存在。

参考文献:

- [1] 郑德新. 石油地质勘探技术的创新研究[J]. 中国化工贸易, 2015, 7(33): 292-296.
- [2] 孙晓猛,郝福江,刘长垠,等. 中国能源矿产态势与可持续开发利用对策[J]. 资源开发与市场, 2002(5): 20-23.
- [3] 周佳旭. 油田管道结垢的成因及除防垢技术[J]. 化工管理, 2017(20): 185-188.
- [4] 李梅,赵高领,罗白崇尧. 油田管道结垢的成因及除防垢技术[J]. 中国化工贸易, 2017, 9(13): 190-196.
- [5] 秦珊珊. 阻垢剂的合成与性能评价[J]. 化工管理, 2015(3): 82-88.
- [6] 段明哲,蒋里锋,张志刚,等. 甲醇制烯烃流化床反应器研究进展[J]. 广州化工, 2016, 44(15): 28-30.

- [7] 贺振富. 甲醇转化制丙烯反应机理[J]. 石油学报(石油加工), 2019, 35(3): 555-560.
- [8] 王有和,吴成成,刘忠文,等. 甲醇制烯烃反应工艺、反应机理及其动力学研究进展[J]. 工业催化, 2018, 26(1): 13-21.
- [9] 何芬鸽,晁斌,赵娟,等. 浅谈玻璃钢材料在青海油田的应用及发展趋势[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 23: 15-17.
- [10] 梁航,马佼佼,张阿昱,等. 自蔓延高温处理对 J55 钢级油管组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(18): 69-71.
- [11] 张峰,高晓龙,毕宗岳,等. 自蔓延反应制备陶瓷内衬复合管研究现状及展望[J]. 焊管, 2016, 39(10): 15-18.
- [12] 丁楠,戚东涛,李厚补,等. 自蔓延高温合成氧化铝陶瓷内衬 J55 钢油管的性能[J]. 机械工程材料, 2016(6): 46-50.
- [13] 潘蕾茗,缪文振. 管线 H_2S 腐蚀机理及防护技术研究[C]// 西安:第十八届中国科协年会, 2016.
- [14] 李厚补,王守泽,杨永利,等. 陶瓷内衬油管试验研究及评价[C]// 长沙:第十二届全国工程陶瓷学术年会, 2015.
- [15] 王志刚. 陶瓷内衬油管的研究与应用 [J]. 中国石油化工, 2016(S1): 100-105.
- [16] 邱宇. 核电传热管用 Fe-Cr-Ni 基合金焊接性能研究[D]. 镇江:江苏大学, 2013.
- [17] 吉党生,卫英慧. 压铸镁合金 AZ91D 在溶液中腐蚀行为的研究[J]. 山西煤炭, 2010(2): 63-66.
- [18] 吴婷婷. 稀土氧化物对高铝陶瓷耐磨性和耐酸性影响机理的研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2017. 

(上接第 79 页)的超级奥氏体不锈钢 / 容器钢复合板复合界面平直,不锈钢和容器钢之间实现了良好的冶金结合,在界面附近存在明显的脱碳层和渗碳层。

(2) 在复合界面附近,Fe、C 元素从容器钢侧向不锈钢侧扩散,Cr、Ni 和 Mo 元素从不锈钢侧向容器钢侧扩散,形成了明显的扩散区。其中,Fe、Cr、Ni、Mo 元素的扩散距离均随着轧后冷速的增加而减小。

(3) 在不同冷却工艺下,复合板界面平均剪切强度均超过 456 MPa,远超国家标准要求,结合性能良好。

参考文献:

- [1] 李煜,段滋华,来诚锋. 复合钢板压力容器焊缝界面高温蠕变研究[J]. 化工机械, 2009, 36(2): 93-95.
- [2] 庄晓东,徐远超,尹梦琦,等. 浅析复合材料压力容器[J]. 化学工程与装备, 2018(5): 269-271.
- [3] 陆世英. 超级不锈钢和高镍耐蚀合金[M]. 北京:化学工业出版社, 2012: 101-111.

- [4] 金贺荣,张春雷,韩雪艳,等. 热处理对 316L/Q345R 不锈钢复合板显微组织与力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(4): 952-958.
- [5] 骆宗安,王光磊. 钕夹层对真空轧制复合 Ti- 不锈钢板的显微组织及性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(12): 3335-3340.
- [6] Rao N V, Sarma D S, Nagarjuna S, et al. Influence of hot rolling and heat treatment on structure and properties of HSLA steel explosively clad with austenitic stainless steel[J]. Materials Science and Technology, 2009, 25(11): 1387-1396.
- [7] 王光磊. 真空热轧复合界面夹杂物的生成演变机理与工艺控制研究[D]. 沈阳:东北大学, 2013.
- [8] Chen C X, Liu M Y, Liu B X, et al. Tensile shear sample design and interfacial shear strength of stainless steel clad plate [J]. Fusion Engineering and Design, 2017, 125: 431-441.
- [9] Atrian A, Fereshteh-Saniee F. Deep drawing process of steel/brass laminated sheets [J]. Composites Part B Engineering, 2013, 47: 75-81.
- [10] 中国钢铁工业协会. GB/T 8165—2008 不锈钢复合钢板和钢带[S]. 北京:国家标准出版社, 2008: 7-8. 