



热处理对 316L/Q345R 不锈钢复合板 显微组织与力学性能的影响

金贺荣^{1,2}, 张春雷³, 韩雪艳³, 宜亚丽³

(1. 燕山大学 先进锻压成型技术与科学教育部重点实验室, 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学 河北省并联机器人与机电系统实验室, 秦皇岛 066004;

3. 燕山大学 机械工程学院, 秦皇岛 066004)

摘 要: 依据不锈钢复合板双层金属特性, 制定真空热轧成形 316L/Q345R 复合板热处理工艺为高温快速冷却+低温缓慢冷却。采用电子显微与能谱图分析分别对热处理前、后复合板试样进行显微组织特征观察和成分含量测定, 研究复合界面显微组织、相结构和成分变化规律。采用剪切、拉伸及冲击功试验对两种状态试样进行力学性能测试, 研究显微组织对力学性能的影响规律。结果表明: 真空热轧后的复合板能较好复合, 热轧试样中低合金钢侧组织为铁素体和珠光体, 力学性能较差, 不锈钢侧析出 Cr 的碳化物较多; 经过热处理后, 试样组织中有贝氏体出现, 不锈钢侧 Cr 在加热制度下重新固溶。热处理实现复相化组织、合金元素界面扩散等复合组织结构的协同作用, 从而大幅改善复合板的力学性能和耐腐蚀性能。

关键词: 不锈钢复合板; 真空热轧成形; 热处理; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG335.81

文献标志码: A

Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 316L/Q345R stainless steel clad plate

JIN He-rong^{1,2}, ZHANG Chun-lei³, HAN Xue-yan³, YI Ya-li³

(1. Key Laboratory of Advanced Forging and Stamping Technology and Science, Ministry of Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Hebei Province Key Laboratory of Parallel Robot and Mechatronic System, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

3. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: According to the double layer metal characteristics of stainless steel clad plate, the heat treatment process, high temperature and rapid cooling and low temperature and slow cooling, for 316L/Q345R clad plate after vacuum hot rolling was formulated. Scanning electron microscope and energy spectrum analysis were used to investigate the microstructure, topography and constituent of clad plate specimens before and after heat treatment. The change rules of interface microstructure, phase structure and constituent were also studied. By applying shear, stretch and impact tests, the mechanical properties of specimens at two states were tested to investigate the relationship between the microstructure and mechanical properties. The results indicate that, after vacuum hot rolling, the clad plate can be successfully combined. The low alloy steel side microstructure of hot rolling sample consists of ferrite and pearlite, so, the mechanical property is poor. The precipitation of Cr carbide is more in the stainless steel side. After heat treatment, Bainite appears in the microstructure of sample, and Cr of the stainless steel side is dissolved again in the heating system. The heat treatment can achieve the synergistic effect of composite structures, such as duplex structure and interfacial diffusion of alloy elements, thus, greatly improve the mechanical properties and corrosion resistance of clad plates.

Key words: stainless steel clad plate; vacuum hot rolling; heat treatment; microstructure; mechanical property

不锈钢复合板由基层(Q345R 低合金钢)和复层(316L 不锈钢)通过冶金复合而成^[1]，在减少不锈钢用量前提下，既能保证材料耐腐蚀性又充分利用基层提高力学性能^[2]。有效降低材料成本 30%~50%，在化工、石油、海水淡化、造船工业等领域有着广泛的应用前景^[3]。

异种金属的热轧复合包含若干相互衔接的物理、力学过程，复合板的质量主要取决于结合界面各组成元素间的相互作用。异种金属结合界面的结构及变化对复合材料的后续加工性能起着至关重要的影响。我国复合板生产水平与国外相比，存在一定技术差距，如何提高复合材料综合性能一直是众多研究者关注的课题^[4-6]。李炎等^[7]分析得到界面组织组成和 Fe、Ni、Cr 等原子的扩散。张铁磊等^[8]对比了热处理前、后镁合金焊接接头微观组织、硬度及拉伸性能的不同。RAO 等^[9]发现热轧 304 不锈钢复合板中 Ni、Cr 的扩散导致复合界面的硬度高于基层的。冯绍伟等^[10]分析了轧制变形量及退火温度对合金板材织构的影响。赵明等^[11]和谢广明等^[12]研究了不同工艺参数对板材组织性能的影响。骆宗安等^[13]研究采用铌夹层提高不锈钢耐腐蚀性机理，并对其组织与性能进行分析。热处理工艺已成为保证和改善复合板性能的重要手段，针对不同类型复合板，需制定合理热处理工艺。

本文作者提出 316L/Q345R 复合板热处理制度，在试验研究基础上，通过对比热轧状态和热处理后复合板的组织与力学性能，分析复合界面的显微组织、相结构和成分变化，研究显微组织与性能影响关系，以实现不锈钢复合板性能优化。

1 实验

实验所用的不锈钢复合板材料 Q345R 低合金钢和 316L 不锈钢的化学成分如表 1 所列。复合板采用真空热轧成形，具体工艺：先对基层和复层材料的表面进行处理，及时封装组坯避免处理完成后的表面氧化，焊接密封后抽真空，将坯料加热到 1100~1200 ℃，保温一段时间后进行轧制。试样终轧尺寸为 450 mm×

320 mm×100 mm，复合比为 0.1。
Q345R 低合金钢和 316L 不锈钢性能指标不同，适用的热处理制度也不同。Q345R 热处理为通过冷却控制组织获得满足技术要求的力学性能，316L 不锈钢需要进行固溶处理提高本身的耐腐蚀性，因此需要针对不锈钢复合板制定单一适用的热处理制度。为确保复合板的力学性能和耐腐蚀性，避免不锈钢的敏化区间 (450~850 ℃)^[14]，高温阶段采取快速冷却，而在低于 450 ℃时采取缓慢冷却的方式。

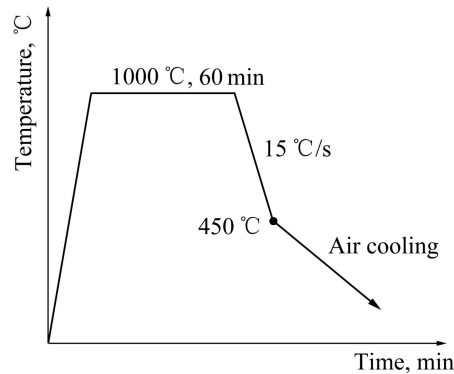


图 1 试样热处理制度
Fig. 1 Heat treatment process of clad plate sample

316L/Q345R 复合板试样热处理制度如图 1 所示，即高温快速冷却+低温缓慢冷却，具体工艺过程：首先在节能型箱式电阻炉中将试样加热到 1000 ℃保温 60 min，出炉后立即放入油中冷却，每隔 10 s 采用红外测温仪测量温度，温度降至约 450 ℃时随即进行空冷。此热处理方式能够避免进入不锈钢敏化区，保证不锈钢耐腐蚀敏感性，采用的油冷、空冷方式易于实现，降低了对冷却设备的要求。

对两种试样抛光，然后用 4%(体积分数)硝酸酒精对基层进行腐蚀，对于复层的腐蚀方法为：将试样作为阳极，在 10%(体积分数)的草酸溶液中电解。采用 200MAT 金相显微镜观察组织，采用能谱仪进行成分分析。根据 GB/T 6396-2008 实验方法对试样剪切、抗拉强度等性能指标进行测试，其中剪切、拉伸实验在 CSS-44300 电子万能试验机上进行，冲击实验设备为 CBD-500 电子式摆锤冲击试验机，采用 Tukon 2100B

表 1 不锈钢复合板的化学成分

Table 1 Chemical composition of stainless steel clad plate material

Material	Mass fraction/%								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
Q345R	0.150	0.35	1.40	0.020	0.0100	—	—	—	Bal.
316L	0.016	0.51	1.11	0.022	0.0011	0.11	16.32	2.06	Bal.

维氏硬度计测量硬度, 载荷砝码 30 kN, 负载时间 15 s。

2 结果与分析

2.1 低合金钢 Q345R 侧的显微组织

热轧状态和热处理后的基层 Q345R 侧组织形貌分别如图 2 和 3 所示。由于基层的厚度较大, 冷却速度不同, 分别作表层、心部和近界面处的组织图谱。

热轧状态下 Q345R 侧组织主要为铁素体和珠光体, 并有组织梯度产生。表面冷却速度较快, 晶粒相对较小, 组织中的基体为铁素体, 含有少量珠光体, 如图 2(a)所示。中心部位冷却速度慢, 晶粒粗大, 且呈带状分布, 珠光体含量增多, 如图 2(b)所示。基层

与复层之间的界面清晰可见, 并且较为平直。在近界面处, 珠光体明显减少, 全部为铁素体组织, 说明该区存在一定程度脱碳, 如图 2(c)所示。

图 3 中热处理后试样 Q345R 侧显微组织多呈板条状、片状, 部分组织中还有不规则小岛状组织, 结合热处理工艺可判断组织为板条贝氏体及粒状贝氏体, 此外还含有少量的珠光体和铁素体, 中心部位和近界面处组织中珠光体的含量增加。相比热轧状态, 晶粒得到细化, 不存在组织梯度, 近界面处的脱碳层宽度减小。

通过图 2 与 3 中 Q345R 侧显微组织对比可知, 经过高温快速冷却+低温缓慢冷却热处理后的基层晶粒细化均匀, 并得到软相和硬相结合的复相组织, 能够改善低合金钢侧的力学性能。

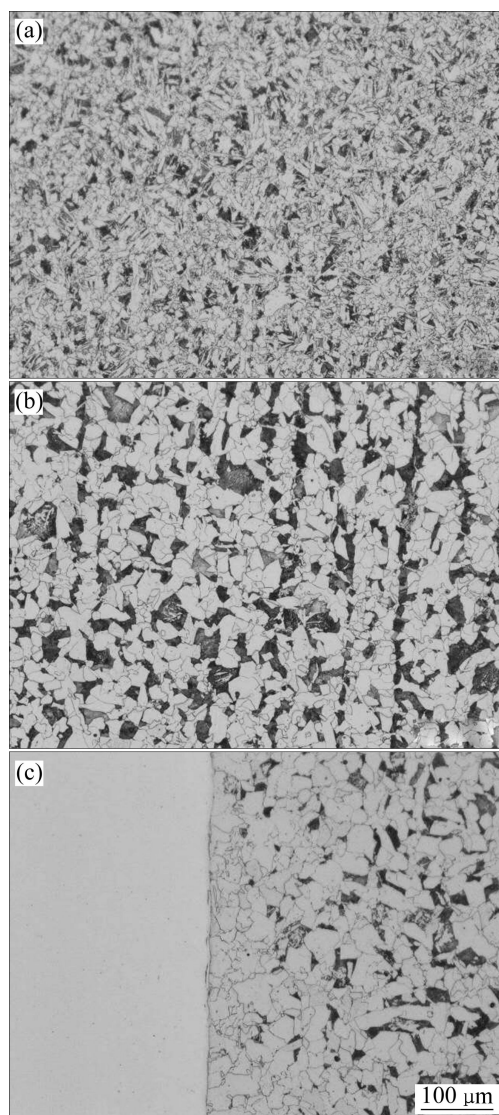


图 2 热轧状态 Q345R 侧的显微组织

Fig. 2 Microstructures of Q345R side at hot rolling: (a) Surface; (b) Core; (c) Near interface

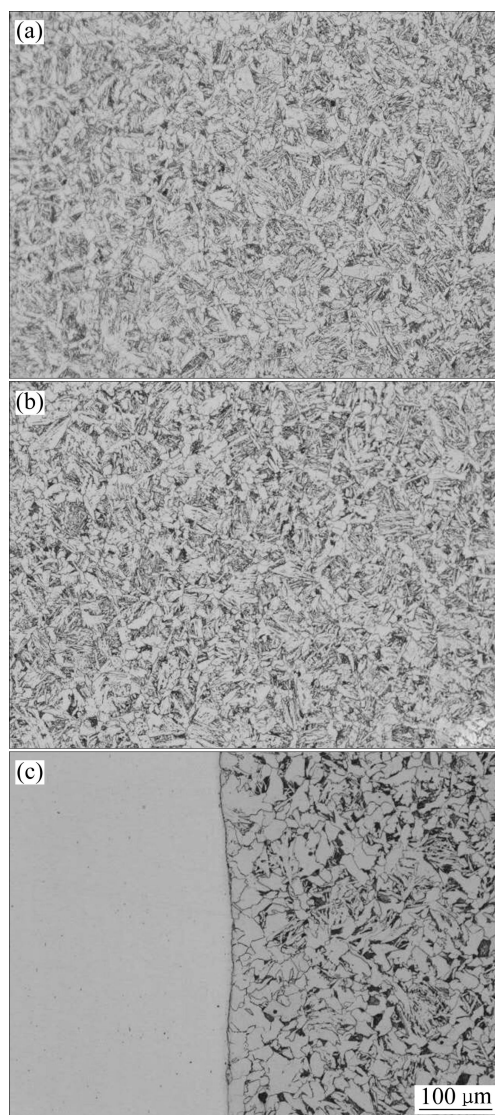


图 3 热处理后 Q345R 侧的显微组织

Fig. 3 Microstructures of Q345R side after heat treatment: (a) Surface; (b) Core; (c) Near interface

2.2 不锈钢 316L 侧的显微组织

不锈钢 316L 侧的显微组织为单一的奥氏体组织, 晶界清晰, 呈规则多边形, 如图 4 所示。热轧状态的组织晶粒粗大, 其中晶粒内有连续分布的孪晶界。在复合板结合界面处和晶粒晶界分布着夹杂物颗粒, 夹杂物颗粒主要成分为 Cr 的碳化物, 由于不锈钢中较高的 Cr 含量对 C 有较强的吸附力, 高温下会形成稳定的 Cr 含量较高的碳化物, 会导致晶间贫 Cr, 易引发晶间腐蚀。热处理后的组织晶粒尺寸相对较小, 孪晶减少, 并有部分再结晶发生, 主要是由于形变遗留的储存能在高温保持过程中为再结晶提供了能量。晶界析出碳化物颗粒减少, 说明在热处理温度为 1000 °C 时使析出的碳化物又熔入组织中。由于加热促进界面两侧的 C 元素和合金元素分别从低合金钢和不锈钢侧向界面扩散, 界面处形成碳化物颗粒相对晶界较多。

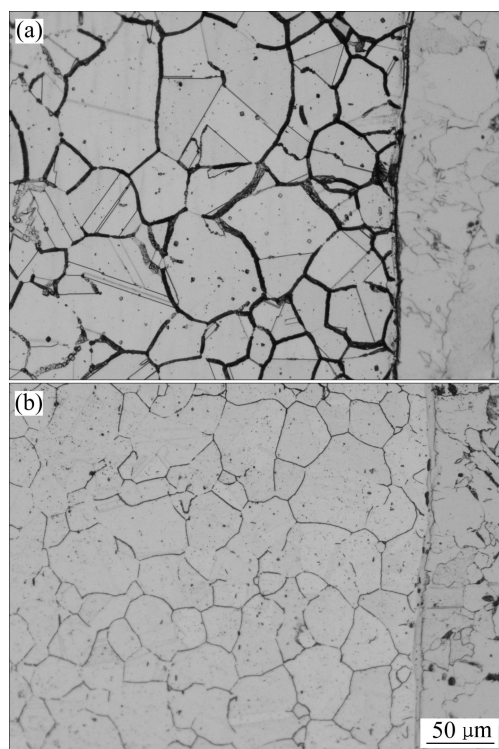


图 4 不锈钢 316L 侧的显微组织

Fig. 4 Microstructures of 316L stainless steel side at different states: (a) Hot rolling state; (b) After heat treatment

2.3 复合板能谱分析

分别对试样界面附近的夹杂物颗粒和界面两侧一条直线上元素进行成分分析, 点能谱和线扫描结果如图 5 所示。

复合界面附近的夹杂物颗粒主要为氧化物, 通过点能谱分析, 发现其中都含有 C、O、Mg、Al、Si、Ca、Cr、Mn、Fe 元素。其中 Fe 是钢中的固有元素,

而 Cr 是不锈钢侧扩散产生, Si、Mn、Ca 为钢板内部析出(试样用坯料本身含有这几种元素), Al、Mg 为电阻式加热炉的耐火材料粉尘沿开裂焊缝进入复合界面处, 高温下 Al、Si、Mn 易向界面扩散被氧化形成氧化物^[15]。热轧状态所测夹杂物中 Al 含量最高, 说明夹杂物以 Al 的氧化物为主。Cr 的含量也较高, 为 10.89%, 说明形成含 Cr 量较高的碳化物, 导致 Cr 的析出, 从而造成不锈钢耐腐蚀性能下降。热处理试样中 Si 氧化物含量最高, Cr 的含量有所降低为 4.5%, 这是由于热处理的加热制度固溶了部分 Cr 的碳化物, 而高温阶段快速冷却减少了 Cr 的析出, Cr 的含量影响不锈钢的耐腐蚀性, Cr 的析出量减少, 不锈钢的耐腐蚀性可得到提高^[14]。

从界面两侧线扫能谱中可看出 Cr、Ni 含量的变化, 由于高温作用和两侧浓度差异原因, 316L 不锈钢中 Cr、Ni 向 Q345R 低合金钢侧扩散, 并且由于 Cr 在界面两侧具有更高的浓度梯度, 扩散距离大于 Ni。Cr、Ni 的扩散对不锈钢侧的耐腐蚀性有不良影响。热轧试样中 Cr 的扩散距离为 8.2 μm, 大于 Ni 的扩散距离(3.3 μm); 热处理试样中 Cr 的扩散距离为 14.3 μm, Ni 的扩散距离为 1.6 μm, 说明在热处理的加热作用下, Cr 的扩散更为充分。

2.4 界面两侧硬度分析

以复合界面处的白亮带为零点, 向两侧打点, 测得硬度值, 其结果如图 6 所示。试样测的硬度值显示, 热轧后不锈钢侧硬度的最大值在 220 HV 左右, 与不锈钢的硬度相符。界面处的硬度较大, 由于靠近界面处的剧烈变形产生了大量位错, 造成了形变硬化, 并和此处形成较多碳化物有关。低合金钢侧的硬度值较小, 平均在 120 HV, 由于界面附近的碳钢存在脱碳, 组织为硬度较小的铁素体。当与界面的距离超出脱碳层时, 其硬度就接近于基层 Q345R 钢的原始硬度。

热处理后试样硬度的变化趋势与热轧状态的相同, 不锈钢侧硬度平均在 250 HV 以上, 最高值为 300 HV, 其原因为所测硬度点处在晶界上, 高于晶内硬度。C 在加热制度下充分扩散, 热处理虽然使晶粒变形产生了恢复, 复板整体硬度下降, 但在界面附近, 热处理时间越长, 碳的扩散程度越大, 这样产生的碳化物(具有较高硬度)就越多, 从而导致界面硬度提高。低合金钢侧硬度值上升是由贝氏体组织的出现所致。

2.5 复合板力学性能分析

不锈钢复合板力学性能主要包括剪切强度、屈服强度、抗拉强度、伸长率、冲击性能等, 其中剪切强

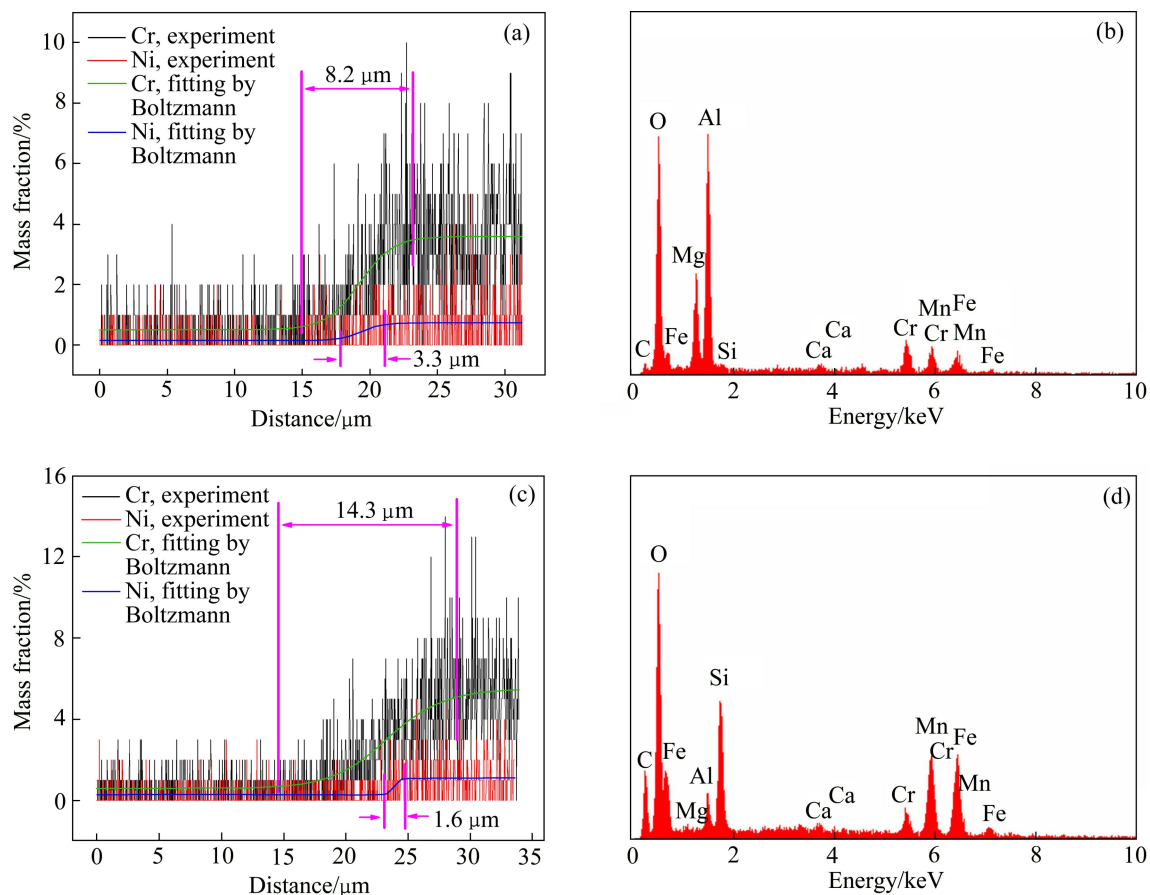


图 5 能谱分析结果

Fig. 5 EDS results of point and line analysis: (a) Hot rolling state line scanning; (b) Hot rolling state point spectrum; (c) Heat treatment state line scanning; (d) Heat treatment state point spectrum

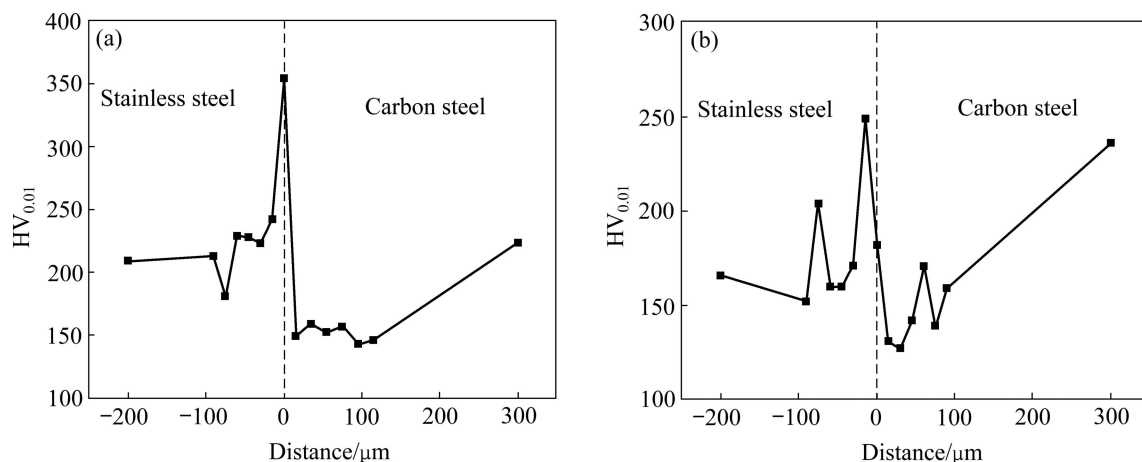


图 6 界面两侧的硬度分布

Fig. 6 Hardness distribution near interface: (a) After hot rolling; (b) After heat treatment

度是衡量复合板界面结合程度的性能指标,也是评价复合板性能的主要标准。通过剪切、拉伸和冲击实验得到各项性能的实验数据见表 2。

GB/T 8165—2008 规定不锈钢复合板剪切强度最

小值为 210 MPa,但在实际应用中,复合板结合界面的剪切强度应不小于复材和基材中低强度组元材料的剪切强度,才能保证界面的良好结合^[16]。Q345 钢的剪切强度(σ_c)范围在 300~450 MPa,所以 316L/Q345

表 2 实验试样的力学性能

Table 2 Mechanical properties of samples

Sample	σ_c / MPa	σ_s / MPa	R_m / MPa	δ / %	Impact energy/J
Hot rolling	338	310	505	24.7	51
Heat treatment	397	365	575	22.2	123

复合板的剪切强度应在 300 MPa 之上, 方能确保界面结合良好。热轧后的不锈钢复合板试样剪切强度为 338 MPa, 远大于标准中的 210 MPa, 同时大于 Q345 钢抗剪强度的下限, 说明界面结合良好。热处理后试样的剪切强度有所提高, 达到 397 MPa, 其原因为经过热处理的加热制度使得界面两侧的合金元素进一步扩散, 残余应力得到释放。热轧试样屈服强度(σ_s)为 310 MPa, 抗拉强度(R_m)为 505 MPa, 处在复合板标准下限, 伸长率(δ)为 24.7%, 冲击能为 51 J, 符合实用要求。热轧试样力学性能达到标准与试样组织结构有关, 因为热轧试样中晶粒为铁素体和珠光体硬度较小, 且晶粒尺寸较大, 此外还与残余应力有关。而高温快速冷却+低温缓慢冷却的热处理制度使复合板中组织复相化, 晶粒细化, 使得试样的屈服强度达到 365 MPa, 抗拉强度达到 575 MPa, 明显高于热轧试样的, 通常在冷变形态金属强度提高的同时, 往往伴随明显的塑性降低, 而热处理后试样的伸长率为 22.2%, 接近热轧试样的伸长率, 同时冲击能达到 123J, 韧性大大提高。综合分析结果表明: 该热处理制度使 316L/Q345 复合板的综合力学性能显著提高。

3 结论

- 1) 热轧后复合板 Q345R 侧显微组织有组织梯度, 以软相组织珠光体和铁素体为主, 316L 侧析出的 Cr 的碳化物较多。热处理后组织成分中有贝氏体的出现, 组织复相化, 晶粒细化, 复层不锈钢侧热处理过程中进行了固溶处理, 减少了 Cr 在晶界的析出。
- 2) 真空热轧可使两种材料较好复合, 界面平直, 而热处理后复合板性能更佳, 说明高温快速冷却+低温缓慢冷却制度适用于 316L/Q345R 复合板热处理, 并且该制度易于操作。
- 3) 复相组织和晶粒细化可改善不锈钢复合板的力学性能, 合金元素的适当扩散有利于复合板结合性能的提高。

REFERENCES

- [1] 杨牧南, 左孝青, 赵明伟, 王 俊. 不锈钢复合板制备技术研究进展[J]. 材料热处理技术, 2012, 41(20): 93-96.
YANG Mu-nan, ZUO Xiao-qing, ZHAO Ming-wei, WANG Jun. Research progress of manufacturing technology for stainless steel clad plate[J]. Material & Heat Treatment, 2012, 41(20): 93-96.
- [2] LUO Zong-an, WANG Guang-lei, XIE Guang-ming, WANG Li-peng, ZHAO Kun. Interfacial microstructure and properties of a vacuum hot roll-bonded titanium-stainless steel clad plate with a niobium interlayer[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013(6): 754-760.
- [3] JIN He-rong, GENG Yong-xiang, JIANG Jin-shui. Research on finishing rolling force model for hot rolling wide and heavy stainless steel clad sheets[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 488: 213-216.
- [4] 李晓波. 不锈钢复合板的界面组织结构与性能[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2006, 27(4): 365-368.
LI Xiao-bo. Interfacial structure and performance of stainless clad plate[J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2006, 27(4): 365-368.
- [5] HWANG Weng-sing, WU Tian-i, SUNG Wen-chung. Effects of heat treatment on mechanical property and microstructure of aluminum/stainless steel bimetal plate[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2012, 134(1): 1-6.
- [6] JIANG Hai-tao, YAN Xiao-qian, LIU Ji-xiong, DUAN Xiao-ge. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical property of Ti-steel explosive-rolling clad plate[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(3): 697-704.
- [7] 李 炎, 祝要民, 周旭峰, 杨蕴林, 张振逵. 316L/16MnR 热轧复合板界面组织结构的研究[J]. 金属学报, 1995, 31(12): 537-542.
LI Yan, ZHU Yao-min, ZHOU Xu-feng, YANG Yun-lin, ZHANG Zhen-kui. Interfacial microstructures of hot rolled 316L/16MnR composite plate[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1995, 31(12): 537-542.
- [8] 张铁磊, 吉泽升, 赵振华. 热处理对 ZM6 镁合金 TIG 焊后组织性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(3): 593-598.
ZHANG Tie-lei, JI Ze-sheng, ZHAO Zhen-hua. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties on TIG welded ZM6 magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(3): 593-598.
- [9] RAO N V, SARMA D S, NAGARJUNA S. Influence of hot rolling and heat treatment on structure and properties of HSLA steel explosively clad with austenitic stainless steel[J]. Materials Science Technology, 2009, 25(11): 1387-1396.
- [10] 冯昭伟, 米绪军, 王江波, 袁志山, 缪卫东, 周 瑾. 冷轧变

- 形量及退火温度对 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 板材织构和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(3): 756–764.
- FENG Zhao-wei, MI Xu-jun, WANG Jiang-bo, YUAN Zhi-shan, MIAO Wei-dong, ZHOU Jin. Influence of cold rolling reduction and annealing temperature on texture and properties of $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(3): 756–764.
- [11] 赵敏, 姜龙涛, 武高辉. 热处理对挤压铸造 $\text{TiB}_2\text{P}/606\text{Al}$ 复合材料组织与性能影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(4): 536–540.
- ZHAO Min, JIANG Long-tao, WU Gao-hui. Effect of heat treatment on microstructure and properties of $\text{TiB}_2\text{P}/606\text{Al}$ composites fabricated by squeeze casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(4): 536–540.
- [12] 谢广明, 骆宗安, 王国栋. 轧制工艺对真空轧制复合钢板组织与性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(12): 27–30.
- XIE Guang-ming, LUO Zong-an, WANG Guo-dong. Effects of rolling parameters on microstructure and property of vacuum rolling clad steel plate[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23(12): 27–30.
- [13] 骆宗安, 王光磊. 铌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.
- LUO Zong-an, WANG Guang-lei. Effect of nb interlayer on microstructure and property of titanium-stainless steel clad plate bonded by vacuum hot rolling[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(12): 3335–3340.
- [14] 冯志猛, 蔡宏图. 奥氏体不锈钢及其复合板热加工与敏化温度[J]. 石油化工设备, 2002, 31(6): 38–39.
- FENG Zhi-meng, CAI Hong-tu. The thermal processing and sensitizing temperature of austenitic stainless steel and clad plate[J]. Petro Chemical Equipment, 2002, 31(6): 38–39.
- [15] NOMURA M, HASHIMOTO I, KOZUMA S, KAMURA M, OMIYA Y. Effects of surface oxides on the phosphatability of the high strength cold rolled steels[J]. Journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 2006, 92(6): 378–384.
- [16] 李龙, 张心金, 刘会云, 祝志超. 热轧不锈钢复合板界面剪切强度测定[J]. 钢铁, 2013, 48(12): 52–56.
- LI Long, ZHANG Xin-jin, LIU Hui-yun, ZHU Zhi-chao. Shear strength of the interface of hot rolled stainless clad steel[J]. Iron & Steel, 2013, 48(12): 52–56.

(编辑 李艳红)