

DOI: 10.11973/jxgccl202112004

轧制压下率对碳钢/不锈钢复合板界面结合性能的影响

李天妹¹, 丁文红¹, 明亚飞¹, 吴梦先², 杨 赞¹

(1. 武汉科技大学耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉 430081; 2. 武汉一冶钢结构有限责任公司研发中心, 武汉 430083)

摘要: 采用非真空轧制非对称组坯方式在不同总压下率(28%~70%)下制备 Q235 碳钢/304 不锈钢复合板, 研究了复合板界面处的组织、夹杂物形貌、硬度和剪切强度, 探讨了界面夹杂物与脱碳层对界面结合强度的竞争性影响。结果表明: 随着轧制总压下率的增加, 复合板界面夹杂物由集中分布的块状变为均匀分布的颗粒状; 当轧制总压下率由 28% 增大到 47% 时, 影响复合板界面结合强度的主要因素是界面夹杂物, 增加轧制压下率有利于提高界面结合强度; 当轧制总压下率由 47% 增大到 70% 时, 不锈钢侧晶粒尺寸急剧减小, 碳钢侧脱碳层厚度增加, 界面结合强度降低, 脱碳层成为影响结合强度的主导因素。可以通过合理控制轧制压下率来平衡界面夹杂物和脱碳层对结合强度的竞争性影响。

关键词: 碳钢/不锈钢复合板; 轧制压下率; 界面夹杂物; 脱碳层; 结合强度

中图分类号: TG113.25

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2021)12-0019-07

Influence of Rolling Reduction on Interfacial Bonding Performance of Carbon Steel/Stainless Steel Clad Plate

LI Tianmei¹, DING Wenhong¹, MING Yafei¹, WU Mengxian², YANG Yun¹

(1. State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. R&D Center of Wuhan Yiye Steel Structure Co., Ltd., Wuhan 430083, China)

Abstract: Q235 carbon steel/304 stainless steel clad plate was fabricated by non-vacuum rolling asymmetric billet with different total reductions (28%—70%). The microstructure, inclusion morphology, hardness and shear strength at interfaces of the clad plate were studied, and the competitive effects of inclusion and decarburization layer on the interface bonding strength were discussed. The results show that with increasing total rolling reduction, the inclusions at the interface of the clad plate changed from concentrated lump to uniform granular. When the total rolling reduction increased from 28% to 47%, the interface inclusion was the main factor affecting the bonding strength; increasing the rolling reduction was beneficial to improve the interface bonding strength. When the rolling reduction increased from 47% to 70%, the grain size on stainless steel sides decreased sharply, the thickness of decarburization layer at carbon steel side increased, and the interface bonding strength decreased; the decarburization layer become the dominant factor affecting the bonding strength. The competitive effects of interface inclusions and decarburization layers on bonding strength could be balanced by controlling the rolling reduction reasonably.

Key words: carbon steel/stainless steel clad plate; rolling reduction; interfacial inclusion; decarburization layer; bonding strength

收稿日期: 2020-09-21; 修订日期: 2021-11-25

基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目(2018AAA005)

作者简介: 李天妹(1998—), 女, 湖北宜昌人, 硕士研究生

导师: 丁文红教授

0 引言

目前单一金属材料已经不能满足现代工业发展需求, 由不同材料制成的复合板应运而生。不锈钢/碳钢复合板是应用最广泛的层状复合材料之一, 该

材料既具有不锈钢良好的耐腐蚀性、耐磨性、抗磁性、美观性和装饰性,又具有碳钢良好的焊接性、成形性、拉延性和导热性,在航天、石油、化工、航海等领域得到广泛的应用^[1-5]

提高复合板界面结合强度是制备优质复合板的主要目标。影响复合板界面结合强度的关键因素主要包括易引起微裂纹萌生的界面夹杂物以及引起组织强度降低的脱碳层^[6-7]。真空热轧能够有效降低界面氧化夹杂物的产生概率^[8-11],使得界面结合强度的影响因素仅为脱碳层。但由于我国对层状金属复合材料的研究起步较晚,对于真空热轧的核心技术掌握不够,目前大规模生产该方法仍主要为直接热轧法、钎焊轧制法等^[12]。已有研究^[12-17]表明,提高轧制压下率可以使不锈钢复合板的界面夹杂物细化,并减少界面孔洞数量,使复合板基板和覆板之间形成很好的冶金结合,从而提高界面结合强度。因此,可以考虑通过改善界面夹杂物的形貌和分布来减少其对界面结合强度的不利影响。但是,轧制压下率的提高也会使碳钢侧出现脱碳铁素体区,导致强度降低^[18]。目前,未见有关不同轧制压下率下不锈钢/碳钢复合板界面夹杂物和脱碳层对结合强度关联性影响的报道。为此,作者以 Q235 碳钢为基板、304 奥氏体不锈钢为覆板,采用非真空轧制非对称组坯方式在不同压下率下制备不锈钢/碳钢复合板,研究了复合板界面处的显微组织、夹杂物形貌、硬度和剪切强度,探讨了不同轧制压下率下界面夹杂物与脱碳层对复合板界面结合强度的竞争性影响,为制备低成本高品质不锈钢/碳钢复合板提供参考。

1 试样制备与试验方法

试验用基板为碳素结构钢 Q235,尺寸为 200 mm×150 mm×5 mm,覆板为 304 奥氏体不锈钢,尺寸为 200 mm×150 mm×2 mm,基板与覆板的化学成分见表 1。用磨床对板材待复合表面进行加工,使其表面粗糙度 R_a 达到 $1.6_{-0.25}^{+0.25} \mu\text{m}$,然后分别用丙酮和无水乙醇擦拭,去除表面残留的油脂和水分。采用如图 1 所示的非对称组坯形式,用 IPG YLS-6000 型光纤激光器进行封焊,在尾部沿轧制方向预留长度为 5 mm 的排气孔,以便轧制过程中复合板间残留气体的排出,避免出现鼓包。将焊合好的试样放入炉中加热至 1 200 °C 并保温 7 min 后,采用直径 350 mm 二辊试验热轧机进行非真空

轧制,考虑到要使金属板在较低压下率下也能达到冶金结合,将初轧温度设置为 1 150 °C,终轧温度不低于 950 °C,轧制速度低于 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,轧制后空冷至室温,温度高于 700 °C 时的平均冷却速率约为 $75 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$,低于 700 °C 时的平均冷却速率约为 $25.6 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。具体轧制工艺参数如表 2 所示。

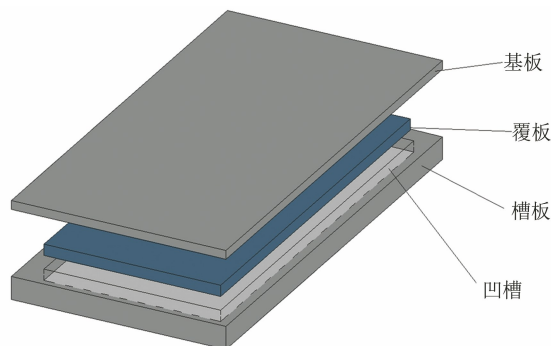


图 1 复合板的组坯形式

Fig.1 Form of billet assembly of clad plate

表 1 Q235 碳钢和 304 不锈钢的化学成分

材料	质量分数									%
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	Al	P	S	
Q235 碳钢	0.17	0.3	0.4					0.045	0.05	
304 不锈钢	0.08	0.36	1.19	16.8	7.61	0.28	8.9	0.031	0.03	

表 2 复合板的轧制工艺参数

Table 2 Rolling process parameters of clad plate

编号	总压下率/%	首次次压下率/%	轧制道次
1#	28	23.3	两道次
2#	37	23.3	两道次
3#	47	23.3	三道次
4#	59	23.3	三道次
5#	70	23.3	四道次

在复合板界面附近截取金相试样,经打磨、抛光后,采用 ZeissAxioplan 型光学显微镜(OM)观察界面夹杂物形貌,再分别用体积分数 4% 硝酸酒精溶液和质量分数 10% 铬酸对碳钢和不锈钢腐蚀后,观察其界面显微组织。采用 Nova Nano SEM400 型场发射扫描电镜(SEM)附带的能谱仪(EDS)对界面进行元素线扫描,并对界面夹杂物成分进行分析。采用 HV-1000B 型显微维氏硬度计测界面附近的硬度,载荷为 0.1 N,保载时间为 10 s,测试间距为 25 μm 。按照 GB/T 6396—2008,在复合板上沿轧

制方向的前、中、后位置截取剪切试样,利用 Instron 3382 型拉伸试验机进行室温剪切试验,应变速率为 2 s^{-1} ,得到试样的剪切强度,即为复合板的界面结合强度。剪切试验后用 Nova Nano SEM400 型场发射扫描电镜观察断口形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 对界面夹杂物形貌的影响

由图 2 可以看出:当轧制总压下率为 28% 时,复合板界面处的夹杂物呈集中分布的块状;当轧制总压下率为 37% 时,夹杂物的形貌由块状变为扁平且连续分布的长条状;当轧制总压下率为 47% 时,夹杂物从连续长条状变为比较分散的条状和颗粒状;当轧制总压下率为 59%,70% 时,夹杂物呈均匀分布的颗粒状,单位面积内可见的夹杂物变少。由图 3 可知,随着总压下率由 28% 增加到 70%,单位长度范围内夹杂物颗粒的宽度从 $15\text{ }\mu\text{m}$ 减小到约 $2\text{ }\mu\text{m}$,长度从约 $45\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $90\text{ }\mu\text{m}$ 后减小至 $2\text{ }\mu\text{m}$,总长度逐渐增加。由此可见,轧制总压下率对界面夹杂物的形貌和分布有较大影响,随着轧制总压下率的增大,夹杂物由集中分布的块状变为均匀分布的颗粒状。

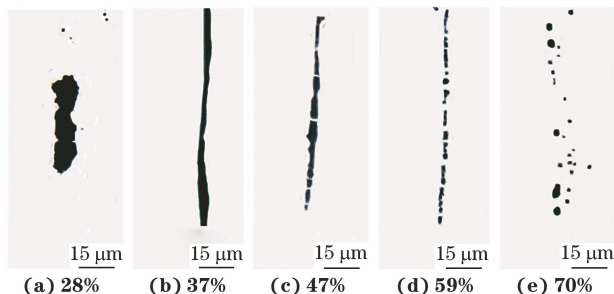


图 2 不同总压下率轧制得到复合板界面夹杂物形貌

Fig.2 Morphology of interface inclusion of clad plate by rolling with different total reductions

2.2 对界面夹杂物成分的影响

由图 4 可以看出:当轧制总压下率由 37% 增大到 47% 时,复合板界面附近铁、铬元素的扩散程度增加;当轧制总压下率由 59% 增大到 70% 时,铁、铬元素扩散程度未出现明显增加趋势。由表 3 可以看出,复合板界面夹杂物主要含有硅、铬、锰、铁、氧元素,其中:铁元素为不锈钢和碳钢的固有元素,含量较高;氧元素主要是由于制坯过程并非真空环境,坯体中有少量氧气残留而产生的;硅、锰元素是 304 不锈钢和 Q235 碳钢中都含有的合金元素;铬元素主要来自在高温轧制过程中从不锈钢侧扩散至界面的

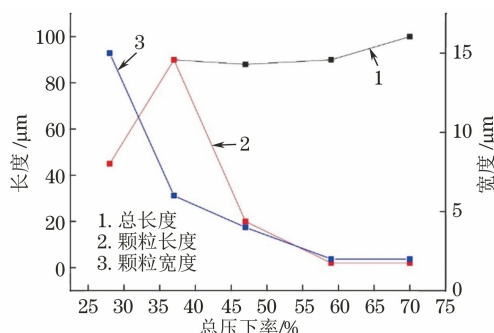


图 3 不同总压下率轧制得到复合板界面夹杂物尺寸

Fig.3 Interface inclusion size of clad plate by rolling with different rolling reductions

铬。元素与氧的亲和能力决定了各种元素与氧结合的先后顺序,亲和力越高,二者越容易结合。根据梁英教等^[19]提出的金属氧化自由能大小关系:硅、锰最容易与氧结合,其次是铬,最后是铁。由此推测,界面处的夹杂物可能为 Si-Mn-Fe-Cr 的氧化物聚合体。

表 3 不同总压下率轧制得到复合板界面夹杂物的 EDS 分析结果

Table 3 EDS analysis results of interface inclusions of clad plate by rolling with different total rolling reductions

总压 下率/%	原子分数/%						
	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	O	C
28	23.17	8.67	2.63	0.16	—	56.67	8.80
37	26.48	7.44	2.82	—	—	55.66	7.60
47	33.33	8.49	—	22.81	22.18	7.29	—
59	33.33	8.49	—	27.71	20.51	8.30	—
70	28.01	8.58	3.07	—	—	54.88	5.46

2.3 对界面显微组织的影响

由图 5 可以看出,随着轧制总压下率的增大,复合板界面附近不锈钢侧晶粒细化,原因可能是原始奥氏体晶粒在轧制压力作用下破碎并发生动态再结晶,总压下率越大,晶粒再结晶程度越大,晶粒细化越明显,此外动态再结晶和碳化物颗粒在晶界的聚集起到钉扎作用,可阻止晶界滑移,使得晶粒更加细小。当轧制总压下率为 28%,37%,47%,59%,70% 时,不锈钢侧奥氏体平均晶粒尺寸分别约为 80,75,60,40,20 μm 。复合板界面附近不锈钢侧形成渗碳层,当总压下率为 70% 时,渗碳层最明显,其厚度约为 80 μm 。当轧制总压下率为 28% 时,界面碳钢侧显微组织主要是奥氏体与渗碳体,未出现明显脱碳层;当轧制总压下率为 37% 时,奥氏体仍然呈大片块状连续分布,珠光体含量增加,界面处仍未

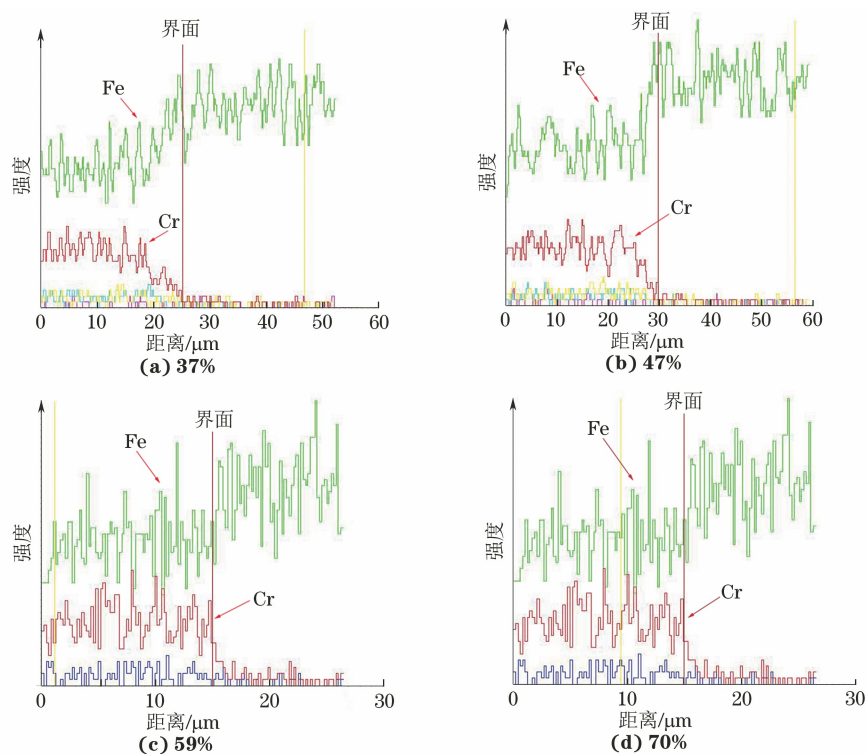


图4 不同总压下率轧制得到复合板界面元素线扫描结果

Fig.4 Element linear scanning results of interface of clad plate by rolling with different total rolling reductions

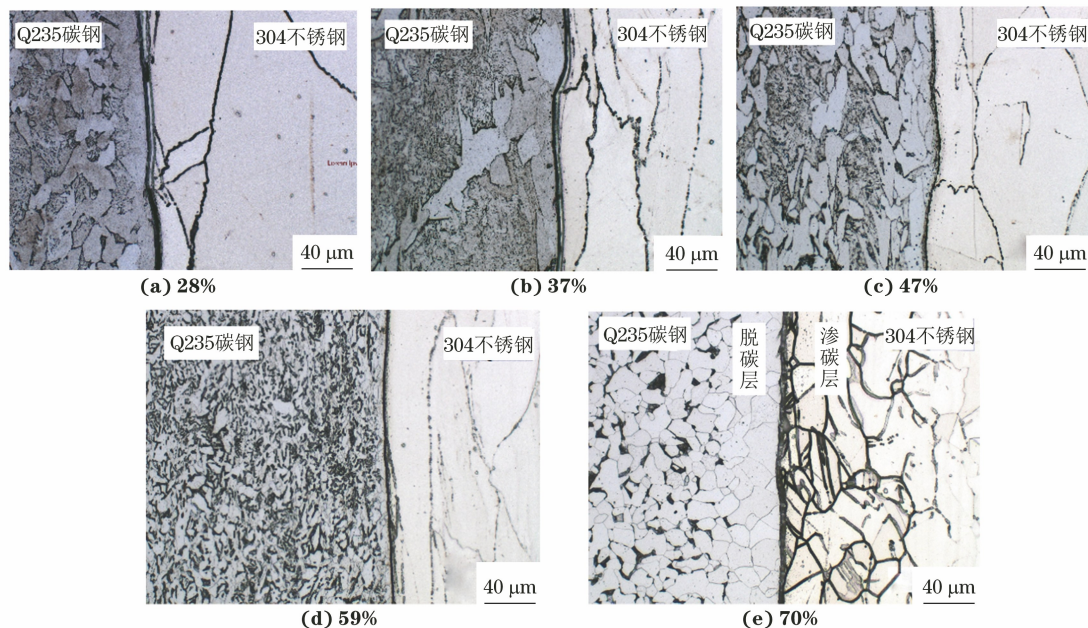


图5 不同总压下率轧制得到复合板界面附近的显微组织

Fig.5 Microstructures near interface of clad plate by rolling with different total rolling reductions

出现明显脱碳层;当轧制总压下率为47%时,铁素体开始形成,奥氏体依旧存在于复合界面,晶界处有黑色碳化物聚集,界面处脱碳层厚度约为10 μm;当轧制总压下率增加到59%时,界面处碳钢侧组织主要为粒状贝氏体,脱碳层厚度约为8 μm;当轧制总

压下率达到70%时,界面碳钢侧组织主要包括晶界明显且晶粒大小均匀的铁素体以及少量珠光体,脱碳层厚度约为50 μm。

2.4 对界面附近硬度的影响

由图6可以看出:界面附近碳钢侧的整体硬度

低于不锈钢侧,距界面 20 μm 处碳钢侧的硬度最低,这是因为碳钢侧的碳元素在轧制过程中向界面扩散,导致碳钢侧形成脱碳层,脱碳层主要为铁素体组织,显微硬度较低;在距界面 200 μm 的不锈钢侧出现硬度峰值。在轧制过程中,碳钢侧的碳元素扩散至不锈钢侧,不锈钢侧的铬、镍在浓度梯度的作用下向界面扩散,但碳在钢中的扩散系数比铬、镍大,碳先到达不锈钢侧,导致在界面附近不锈钢侧形成硬度较高的碳化物,在图 5(e)中也可观察到明显的渗碳层,因此该处的硬度较高^[7]。70%总压下率时界面附近的整体硬度最低,28%总压下率时的整体硬度次之,而 37%~59%总压下率时的整体硬度均较高。在轧制总压下率为 37%~47%时,界面附近区域组织由奥氏体和聚集在晶界处的碳化物组成,而在压下率为 59%时,脱碳层厚度小于 10 μm ,碳钢侧主要由粒状贝氏体组成,硬度偏高;轧制总压下率为 70%时,硬度谷、峰值最低,此时的脱碳层完全由铁素体组成,为完全脱碳层,相比于铁素体和珠光体的混合组织以及粒状贝氏体,铁素体硬度更低,因此总压下率为 70%时的碳钢侧近界面处硬度最低;此时由碳钢扩散至不锈钢的碳元素总量增加,不锈钢中的铬析出与碳结合而形成贫铬区,因此不锈钢侧的硬度也最低。

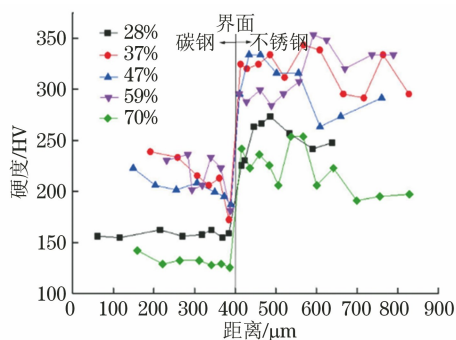


图6 不同总压下率轧制得到复合板界面附近的硬度分布曲线

Fig.6 Hardness distribution curves near interface of clad plate by rolling with different total rolling reductions

2.5 对界面结合强度的影响

由图 7 可以看出,当轧制总压下率由 28%增大到 47%时,界面结合强度升高,但总压下率由 47%继续升高时,界面结合强度降低。当轧制总压下率为 28%时,界面夹杂物主要呈块状,在剪切过程中夹杂物周围产生较大的应力集中而易萌生裂纹,因此界面结合强度较低^[20]。当轧制总压下率增大到 37%时,界面夹杂物由集中分布的块状逐渐变为长条状,所产生的集中应力较小,不易萌生裂纹,结合

性能改善。当轧制总压下率为 70%时,夹杂物呈均匀分散的颗粒状,但是界面结合强度却较低,这与碳钢侧的脱碳层有关。

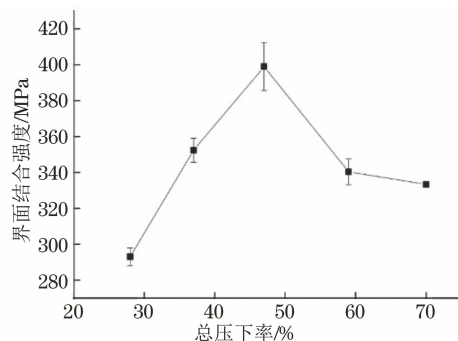


图7 不同总压下率轧制得到复合板的界面结合强度

Fig.7 Interface bonding strength of clad plate by rolling with different total rolling reductions

随着轧制压下率的增大,金属内应力增大,晶界畸变能升高,晶界处形核位置增多,金属发生动态再结晶,晶粒尺寸减小^[21];晶粒细化导致晶界界面能升高,碳原子更加容易聚集在晶界处并与合金元素结合形成碳化物^[22],析出的碳化物起到钉扎作用进一步抑制晶粒长大^[23]。层状金属板在热轧时通过元素扩散使界面处实现冶金结合。碳钢中的碳含量明显高于不锈钢,在热轧时界面附近碳元素的浓度梯度作用下向不锈钢中扩散,碳钢侧形成脱碳铁素体层,而不锈钢侧形成渗碳层^[24]。随着总压下率的增大,不锈钢晶粒尺寸减小导致晶界增多,为碳原子扩散提供了快速通道,使得碳原子更加容易扩散至不锈钢中,因此当轧制压下率为 70%时,脱碳层厚度达到 50 μm 。随着轧制压下率的增大,碳钢侧的晶粒变得更加细小均匀。由于低强度钢的疲劳裂纹扩展门槛值随晶粒度的增大而减小^[25],同时晶粒度增大,晶界第二相增多,金属抗蠕变能力减弱^[26],因此碳钢侧裂纹扩展更加容易。由此可知,尺寸小的晶粒不仅促进了低强度脱碳层的形成,还使得裂纹更加容易扩展。综上,轧制总压下率高于 47%时,复合板界面附近碳钢侧脱碳层的形成是导致复合板界面结合强度降低的主要因素,而在轧制总压下率低于 47%时,界面夹杂物的存在是导致复合板界面结合强度降低的主要原因。轧制总压下率在 47%时,脱碳层的影响较小,界面夹杂物的影响减弱,此时复合板界面结合性能较好。

2.6 对剪切断口形貌的影响

由图 8 可以看出:当轧制总压下率为 37%时,断口相对于结合界面的平直度接近 0,有少量碳钢

黏附于不锈钢侧,由于该压下率下的界面夹杂物呈块状,应力集中较大^[27],因此剪切时复合板易在界面结合处断裂;当轧制总压下率为47%时,断口与结合界面不完全平行而是存在30°角度,断裂位置由界面向碳钢侧的脱碳层区域延伸,随着轧制总压

下率的增大,界面处的夹杂物由集中分布的块状转变为沿界面均匀分布的颗粒状,界面处的应力集中减小,因此复合板更容易在脱碳层处断裂;当轧制总压下率达到70%时,断口相对复合界面的平直度接近0,断口位置完全位于碳钢侧脱碳层。

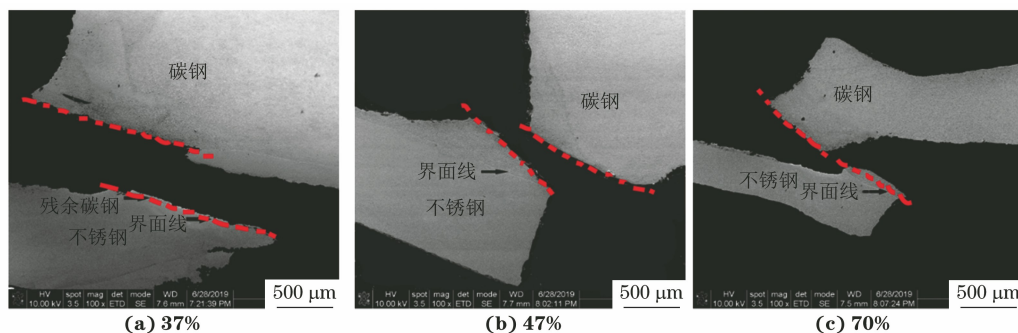


图8 不同总压下率轧制得到复合板剪切试验后的断口形貌

Fig.8 Fracture morphology of clad plate by rolling with different total rolling reductions after shear tests

3 结 论

(1) 轧制压下率会对 Q235 碳钢/304 不锈钢复合板界面夹杂物的形貌和分布产生影响,当轧制总压下率由28%增大到70%时,界面夹杂物由集中分布的块状变为均匀分布的颗粒状,界面夹杂物主要含有硅、铬、锰、铁、氧元素,为硅、铬、锰、铁的氧化物聚集体。

(2) 当轧制总压下率由28%增大到70%时,界面不锈钢侧出现渗碳层,奥氏体晶粒尺寸减小,碳钢侧出现脱碳层,组织由奥氏体与渗碳体转变为等轴铁素体与少量珠光体;当轧制总压下率为70%时,碳钢侧出现厚度约为50 μm的脱碳层,不锈钢侧出现厚度约为80 μm的渗碳层,硬度谷、峰值最低。

(3) 随着轧制总压下率的增大,复合板界面结合强度先增大后减小,总压下率为47%时的界面结合强度最大,剪切断口与结合界面呈30°角度,断裂位置由界面向碳钢侧的脱碳层区域延伸。

(4) 轧制总压下率高于47%时,复合板界面附近碳钢侧脱碳层的形成是导致复合板界面结合强度降低的主要因素,而在轧制总压下率低于47%时,界面夹杂物的存在是导致复合板强度降低的主要原因。复合板在非真空条件下可通过合理控制轧制压下率来平衡界面夹杂物和脱碳层对界面结合强度的竞争性影响,从而实现低成本、高质量碳钢/不锈钢复合板的制备。

参考文献:

[1] 孙浩,王克鲁. 不锈钢复合板生产方法和制备技术的探讨[J].

上海金属,2005,27(1):50-54.

SUN H, WANG K L. Discussion on the production method and manufacturing technology of clad plate of stainless steel[J]. Shanghai Metals, 2005, 27(1): 50-54.

[2] 陈燕俊. 贵金属层叠复合材料的制备工艺与界面研究[D]. 杭州:浙江大学,2001.

CHEN Y J. The processing techniques and interface research of precious metal layered clad materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.

[3] 何康生,曹雄夫. 异种金属焊接[M]. 北京:机械工业出版社,1986:109-129.

HE K S, CAO X F. Dissimilar metal welding [M]. Beijing: China Machine Press, 1986: 109-129.

[4] 李永松,沈怡琳. 不锈钢复合板制作新工艺及市场前景的研究[J]. 广西机械,2001(4):34-36.

LI Y S, SHEN Y L. New process for fabricating stainless steel clad plate and marketing prospect [J]. Guangxi Machinery, 2001(4): 34-36.

[5] 马志新,胡捷,李德富,等. 层状金属复合板的研究和生产现状[J]. 稀有金属,2003,27(6):799-803.

MA Z X, HU J, LI D F, et al. Overview of research and manufacture of layer-metal clad plate[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003, 27(6): 799-803.

[6] ZHU Z C, HE Y, ZHANG X J, et al. Effect of interface oxides on shear properties of hot-rolled stainless steel clad plate[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 669: 344-349.

[7] 丁海民,范孝良,王进峰,等. 热轧复合不锈钢-碳钢复合板界面特征[J]. 材料热处理学报,2011,32(11):18-22.

DING H M, FAN X L, WANG J F, et al. Interface characterization of hot-rolled stainless steel/carbon steel clad [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32 (11): 18-22.

[8] 蒋君. 真空热轧复合不锈钢复合板的组织性能研究[D]. 沈阳:东北大学,2014.

- JIANG J. Microstructure and mechanical property of stainless steel clad plate made by vacuum hot roll-cladding [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [9] 谢广明, 骆宗安, 王光磊, 等. 真空轧制不锈钢复合板的组织和性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(10): 1398-1401.
- XIE G M, LUO Z A, WANG G L, et al. Microstructure and properties of stainless steel clad plate by vacuum rolling cladding[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2011, 32(10): 1398-1401.
- [10] 马兴旺. 真空热轧复合不锈钢/管线钢复合板的工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- MA X W. Process research on vacuum hot roll-clad stainless steel/pipeline steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [11] 李龙, 张心金, 祝志超, 等. 真空热轧不锈钢复合板界面结合行为的研究[J]. 材料与冶金学报, 2014, 13(1): 46-50.
- LI L, ZHANG X J, ZHU Z C, et al. Investigation on bonding of stainless steel clad plate by vacuum hot rolling[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2014, 13(1): 46-50.
- [12] 安朴艳. 层状金属复合板生产方法专利技术综述[J]. 中国发明与专利, 2019, 16(增刊2): 100-106.
- AN P Y. Summary of patent technology for production methods of layered metal clad sheet[J]. China Invention & Patent, 2019, 16(S2): 100-106.
- [13] 李志强. 桥梁用不锈钢复合板的开发与应用研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- LI Z Q. The development and application of stainless steel clad plates for bridges [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [14] 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.
- WANG G L. Research on interface inclusions' evolution mechanism and process control of vacuum hot roll-cladding [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [15] 王泽鹏. 轧制工艺对热轧 Q235B/304L 不锈钢复合板组织性能的影响[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2016.
- WANG Z P. Effect of rolling process on microstructure and mechanical properties of Q235B/304L stainless steel clad plates[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2016.
- [16] 董珂. 2205/Q235 热轧复合界面与不锈钢基体微观结构分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- DONG K. Microstructure analysis of 2205/Q235 hot rolling bonding interface and duplex stainless steel [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [17] 金贺荣, 韩民峰, 段昌新. 压下率对 316L/EH40 复合板界面微观形貌的影响[J]. 钢铁, 2019, 54(12): 62-69.
- JIN H R, HAN M F, DUAN C X. Effect of reduction rates on interfacial microstructure morphologies of 316L/EH40 clad plate[J]. Iron & Steel, 2019, 54(12): 62-69.
- [18] 于涛. 不锈钢复合板界面碳化物析出及其控制[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2019.
- YU T. Carbide precipitation and control of stainless steel clad plate interface [D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2019.
- [19] 梁英教, 车荫昌. 无机物热力学数据手册[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993: 49.
- LIANG Y J, CHE Y C. Handbook of inorganic thermodynamics data [M]. Shenyang: Northeast University Press, 1993: 49.
- [20] 张朝阳. TA2 钛/Q345 钢爆炸焊接界面四点弯曲行为研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- ZHANG C Y. Research on four-point bending behavior of explosive welding interface of TA2 titanium /Q345 steel [D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [21] 张勇明, 白月香. 低碳钢变形奥氏体动态再结晶行为及组织演变[J]. 热加工工艺, 2012, 41(4): 45-48.
- ZHANG Y M, BAI Y X. Austenite dynamic recrystallization and microstructure evolution of low carbon steel [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(4): 45-48.
- [22] 熊辉辉. 钢中碳化物析出及其界面行为的第一性原理研究[D]. 上海: 上海大学, 2019.
- XIONG H H. First-principles study on the precipitation and interface behavior of carbides in steel[D]. Shanghai: Shanghai University, 2019.
- [23] 李维娟, 王国栋, 刘相华. 低碳钢的晶粒细化与碳化物析出[C]//2001 中国钢铁年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 921-924.
- LI W J, WANG G D, LIU X H. Grain refinement and carbide precipitation of low carbon steel [C]//2001 China Steel proceedings. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001: 921-924.
- [24] 王震, 叶静静, 张庆安, 等. 304/Q235B 热轧复合板界面的显微组织特征[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2019, 36(2): 103-107.
- WANG Z, YE J J, ZHANG Q A, et al. Microstructure characteristics of interface in hot-rolled 304/Q235B clad plate [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2019, 36(2): 103-107.
- [25] 吴健栋, 蔡志鹏, 潘际銮, 等. 疲劳裂纹扩展门槛值的影响因素综述[J]. 热力透平, 2013, 42(2): 84-89.
- WU J D, CAI Z P, PAN J L, et al. Overview of influencing factors of fatigue crack growth threshold [J]. Thermal Turbine, 2013, 42(2): 84-89.
- [26] 王璞, 董建新, 韩一纯, 等. 组织特征对 GH864 合金裂纹扩展行为的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 79-84.
- WANG P, DONG J X, HAN Y C, et al. Microstructure and crack propagation behavior of GH864 alloy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 79-84.
- [27] 李继红, 谢威威, 杨军, 等. 钛/钢复合板熔化焊接头的组织和性能[J]. 金属热处理, 2016, 41(5): 48-52.
- LI J H, XIE W W, YANG J, et al. Microstructure and properties of melting welded joint of Ti / steel clad plates[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(5): 48-52.