

非对称热轧单面不锈钢-碳钢复合板生产工艺研究

陈振业^{1,2} 马 娥¹ 朱文婷² 赵燕青¹ 赵 帅³ 孙 力¹ 王国栋²

(1 河钢集团钢研总院工艺研究所,石家庄 050000;2 东北大学轧制及连轧自动化国家重点实验室,沈阳 110004;
3 燕山大学机械工程学院,秦皇岛 066004)

摘 要 采用“电子束真空焊接制坯+热轧”的工艺在钢厂热连轧生产线上进行了“316L 不锈钢+Q345C 碳钢”的单面不锈钢复合板热轧生产。采用非对称制坯及异步轧制的手段生产出了高品质单面不锈钢复合板,所生产的不锈钢复合板界面剪切强度大于 320 MPa,屈服强度大于 370 MPa,抗拉强度大于 520 MPa,断后伸长率大于 30%,各项指标均达到 GB/T8165-2008 的要求。不锈钢层和碳钢层结合度良好,复合界面平直,无明显缺陷,不锈钢与碳钢之间实现了良好的冶金结合,结合率达 100%。

关键词 不锈钢-碳钢复合板 复合坯 热轧 异步轧制 剪切强度

Research on Production Technology of Asymmetrically Hot Rolled Single Sided Stainless Steel-Carbon Steel Clad Plate

Chen Zhenye^{1,2}, Ma E¹, Zhu Wenting², Zhao Yanqing¹, Zhao Shuai³, Sun Li¹ and Wang Guodong²

(1 Technical Department, Technology Research Institute of HBIS, Shijiazhuang 050000;
2 The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004;
3 School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract The hot rolled single sided stainless steel clad plate of 316L stainless steel and Q345C carbon steel was carried out in a hot rolling line by the technology of “electron beam vacuum welding and hot rolling”. High quality single sided stainless steel clad plates were produced by asymmetrical compound billet and asymmetrical rolling. The productions of stainless steel clad plate have reached the requirements of GB/T8165-2008. The interface shear strength is greater than 320 MPa. The yield strength is greater than 370 MPa. The tensile strength is greater than 520 MPa. The elongation is greater than 30%, Stainless steel layer and plain carbon steel layer combining degree is good, the composite interface is straight and perfect. A good metallurgical bonding between stainless steel and carbon steel was achieved. The bonding rate reached 100%.

Material Index Stainless Steel-Carbon Steel Clad Plates, Compound Billet, Hot Rolling, Asymmetrical Rolling, Shear Strength

不锈钢-碳钢复合板作为一种资源节约型产品,可减少贵金属的消耗,大幅度降低工程造价,实现低成本和高性能完美结合,具有良好的经济效益,国内市场需求量不断增长,被广泛地应用于石油、化工、航天、造船、冶金、建筑、发电等领域^[1-4]。

目前国内外不锈钢复合板的生产工艺主要包括:爆炸焊接、爆炸焊接+轧制、真空电子束焊接+轧制等^[5-6]。“真空电子束焊接+轧制”工艺由于具有生产效率高、环境污染少、产品规格灵活等优势,而成为研究开发的热点。在生产单面不锈钢复合板时,为了便于控制复合板的板形,一般采取焊接对称型复合坯,轧制后切边分开得到单面不锈钢复合板的模式^[7-8],但是对称轧制会增加制坯环节的工序,增加成本,降低生产效率。作者所在的团队开发了一种非对称热轧单面不锈钢复合板的生产工艺并在某热连轧产线上实施,取得了较好的效果。

1 复合制坯

基板材质为 Q345C 碳钢,厚度 100 mm,复板材质为 316L 不锈钢,厚度为 10 mm。Q345C 碳钢和 316L 不锈钢化学成分如表 1、表 2 所示。

表 1 Q345C 钢基板化学成分/%

Table 1 Chemical composition of Q345C steel base plate /%

C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Al	Ti
≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.70	≤ 0.035	≤ 0.035	0.02 ~ 0.15	0.015 ~ 0.060	≥ 0.015	0.02 ~ 0.20

表 2 316L 不锈钢复板化学成分/%

Table 2 Chemical composition of stainless steel 316L cladding plate /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
≤ 0.03	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.035	≤ 0.030	16.0 ~ 18.0	10.0 ~ 14.0	2.0 ~ 3.0

将碳钢基板和不锈钢复板的待复合面加工平整,除去氧化层,使得待复合面粗糙度达到 $Ra_{1.6}$,用丙酮酒精溶液清洗,晾干后进入 SEB(W) 30/80-5500 型真空电子束焊机的真空室内进行电子束焊接。得到的复合坯规格 (mm) 为 $107 \times 1500 \times 9000$ 。其中 316L 不锈钢厚度 9 mm, Q345C 碳钢厚度 98 mm。

2 复合坯轧制

2.1 加热及轧制工艺

将两块规格 (mm) 为 $107 \times 1500 \times 9000$ 的“316L 不锈钢 + Q345C”复合坯的不锈钢面朝下入炉,加热制度如表 3 所示。加热过程中随时监控板坯状态,避免板坯出现“塌腰”现象。开启粗轧除鳞水与精轧除鳞水,粗轧 3 个道次,中间坯 30 mm,屏蔽粗轧机的负载平衡功能,在板坯进粗轧机头部 1.5 m 长度范围内采用雪橇轧制方式,即在带坯头部 1.5 m 长度范围内粗轧机下辊速度比上辊大 17% ~ 21%,卷箱直通,精轧 7 个道次,机架间冷却水不投用,计划成品规格:第 1 块 $7 \text{ mm} \times 1450 \text{ mm}$,第 2 块 $10 \text{ mm} \times 1450 \text{ mm}$ 。轧制过程中主要工艺节点温度 $RT5 = 1120 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $FT = 917 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $CT = 683 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2 轧制情况分析

采用复合坯不锈钢面朝下入炉,加热过程中没有出现“塌腰”现象,板坯出炉温度 $1230 \text{ }^\circ\text{C}$,开轧温度 $1192 \text{ }^\circ\text{C}$,首道次压下率 17%,轧制 10 mm 不锈钢复合板时两个轧辊设定了 18% 的速度差,轧制 7 mm 不锈钢复合板时设定了 21% 的速度差,除有些轻微扣头外,两块钢板轧制过程比较顺利,板形良好。据观察,不锈钢复合板产品表面质量良好。

3 不锈钢复合板性能检验

对试生产的不锈钢复合板卷进行了力学及工艺性能检验。试验结果表明,不锈钢复合板的界面剪切强度、屈服强度、抗拉强度、断后伸长率均达到国标要求;从冲击试验数据来看,不锈钢复层对基材的常温冲击性能影响很小;不锈钢层和普碳钢层结合度良好。

表 3 不锈钢-碳钢复合坯加热制度

Table 3 Heating process parameters of stainless steel-carbon steel compound billet

加热制度	预热段	一加热段	二加热段	均热段
炉气温度/ $^\circ\text{C}$	≤ 940	≤ 1070	1170 ± 20	1240 ± 20
在炉时间/min	≥ 60		45	≤ 20
备注	弱氧化气氛,下表面比上表面高 $10 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$			

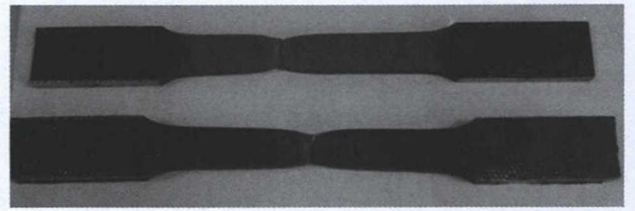


图 1 不锈钢-碳钢复合板拉伸断裂后的试样形貌
Fig. 1 Morphology of tensile-fractured specimen of stainless steel-carbon steel clad plate

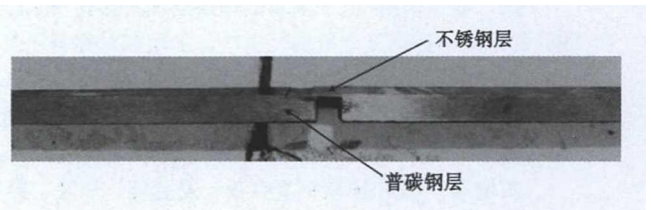


图 2 不锈钢-碳钢复合板拉剪断裂的试样形貌
Fig. 2 Morphology of pulling-sheared specimen of stainless steel-carbon steel clad plate

表 4 拉伸及剪切试验结果

Table 4 Results of tensile and shear tests

不锈钢-碳钢复合板厚度(mm) (基层+复层)	界面抗剪强度(τ)/MPa	屈服强度 (R_{eH})/MPa	抗拉强度 (R_m)/MPa	断后伸长率(A)/%
7(6.29+0.71)	351	382	533	30
10(8.97+1.03)	323	373	527	31
GB/T 8165-2008	≥ 210	≥ 345	≥ 470	≥ 22

3.1 力学性能检验

(1)拉剪试验。根据 GB/T 2975-1998 和 GB/T 6396-2008 的要求对两种规格的不锈钢复合板取样,加工拉伸试样和拉剪试样,在 Z330E 型拉伸试验机上进行了拉伸试验和拉剪试验。拉伸试样如图 1 所示,拉剪试样如图 2 所示,不锈钢复合板的主要力学性能如表 4 所示,各项力学性能均满足 GB/T 8165-2008 的要求。

对两种不同厚度规格的不锈钢复合板剪切试样断面进行了扫描电镜分析,剪切断面上 Q345C 钢一侧存在较大而深的切窝,为典型的韧性断裂,而 316L 不锈钢一侧表面晶粒形状明显,含大量变形带,呈现沿晶断裂与解理断裂。

(2)冲击试验。在常温和 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 两种环境下做了不锈钢复合板的冲击试验,7 mm、10 mm 厚不锈钢复合板冲击试样尺寸分别为: $5.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ 和 $7.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ 。本次试验制作了 3 种试样,试样代号意义如下: A 代表保留不锈钢层, B 代表保留普碳钢层, C 代表保留侧面,表 5 为

不锈钢复合板冲击检验结果,从数据可以看出,不锈钢复层对基材的冲击性能影响很小。

根据 GB/T 6396-2008 的规定,取两种不锈钢复合板的弯曲试样并开展了弯曲试验,每种材料取内弯、外弯两个试样,一个试样以复材为受拉面为进行弯曲试验(外弯试验),另一块试样以基材为受拉面进行冷弯试验(内弯试验)。经试验,两种规格不锈钢复合板的内弯、外弯(弯曲压头直径 $D = 2 a$)试样上均未发现肉眼可见裂纹(图3),界面结合率

表 5 不锈钢-碳钢复合板对应标准试样的冲击功
Table 5 Impact energy of corresponding standard specimen for stainless steel-carbon steel clad plate

不锈钢复合板厚度(基层+复层)	试样代号	常温下冲击功 (K_{V2})/J			0 °C 下冲击功 (K_{V2})/J		
		1	2	3	1	2	3
7 mm 不锈钢复合板 (6.29 mm + 0.7 mm)	A	157	167	160	109	112	117
	B	166	160	162	113	119	120
	C	159	157	163	110	113	115
10 mm 不锈钢复合板 (8.97 mm + 1.03 mm)	A	157	150	148	120	117	111
	B	152	166	162	117	119	112
	C	159	157	161	109	116	119

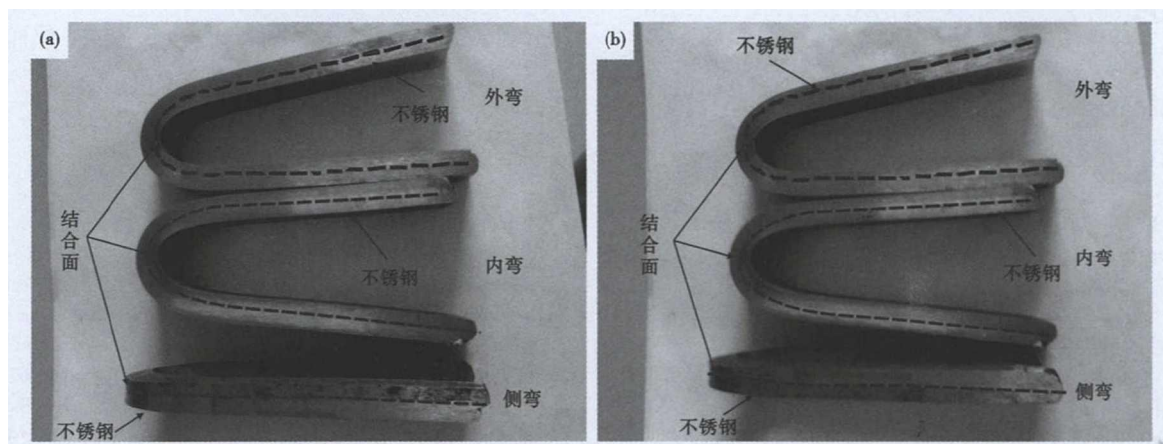


图 3 不锈钢-碳钢 7 mm(a)和 10 mm(b)复合板冷弯后试样形貌

Fig. 3 Morphology of bending specimens of stainless steel-carbon steel 7 mm (a) and 10 mm (b) clad plate

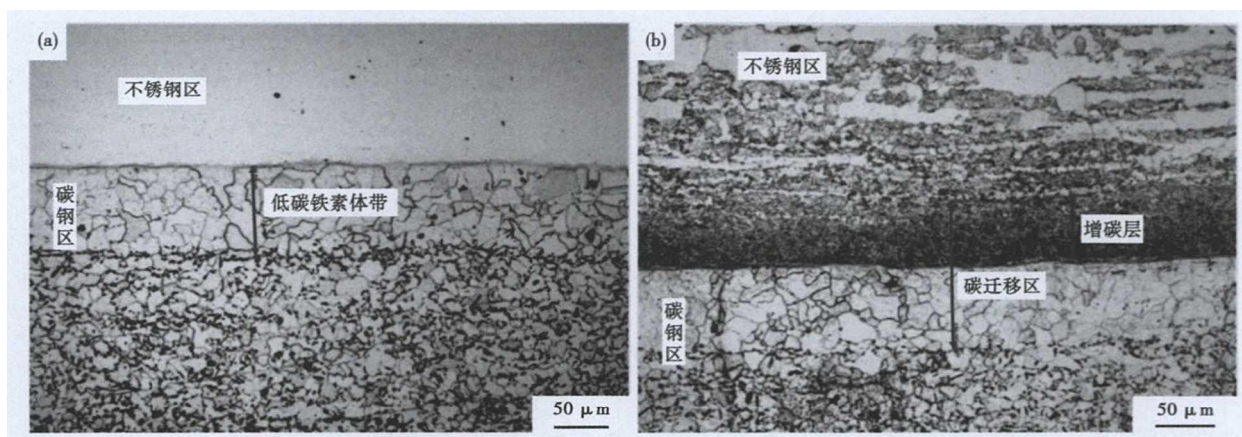


图 4 不锈钢-碳钢复合板界面碳钢侧组织(a)和不锈钢侧增碳层(b)形貌

Fig. 4 Morphology of structure of carbon steel side at boundary of stainless steel-carbon steel clad plate (a) and carburized layer of stainless steel side at boundary (b)

达 100%。

3.2 显微组织观察

对试制的不锈钢复合板结合面处取了金相试样,分步骤观察了不锈钢复合板的显微组织。图 4 (a)为不锈钢复合板结合面附近(碳钢侧)的显微组织照片,图 4(a)中上层金属为不锈钢,下侧金属为普碳钢。从照片中可知,复合界面平直,无未复合

面。结合面附近的夹杂物尺寸小且数量少,呈颗粒状。远离复合界面的碳钢区为典型热轧组织,即铁素体 + 珠光体;近复合层碳钢内珠光体明显减少,存在宽约 80 μm 的低碳铁素体带,组织为单一的铁素体,说明该区存在一定程度脱碳。

进一步对结合界面处不锈钢侧进行了金相腐蚀,图 4(b)为复合界面处的金相照片,近界面区域

存在宽约 60 μm 的碳元素的扩散影响区,在图中显示为一条暗灰色条带,称之为增碳层。

增碳层和脱碳层产生的主要原因是碳元素在界面两侧金属中的化学势不相同,碳钢侧 C 的质量分数(0.2%)高于不锈钢侧(0.027%),二者间的 C 存在较大化学势,两侧浓度梯度导致 C 元素从碳钢侧迁徙到不锈钢侧,并且 Si 也能提高 C 的化学势,尽管 Cr 对 C 扩散有所抑制,但最终碳钢中 C 向不锈钢发生明显扩散,形成了增碳层和脱碳层^[9-11]。

4 结论

(1)采用非对称热轧工艺生产单面不锈钢复合板,轧制过程中采用异步轧制功能,在带坯头部 1.5

m 长度范围内粗轧机下辊线速度比上辊大 18% ~ 21%,复合板产品的不锈钢层和碳钢层结合度良好,复合界面平直,无明显缺陷,结合率达 100%,不锈钢与碳钢之间实现了良好的冶金结合。

(2)采用该工艺生产的不锈钢复合板界面剪切强度大于 320 MPa、屈服强度大于 370 MPa、抗拉强度大于 520 MPa、断后伸长率大于 30%,各项指标均达到 GB/T8165-2008 的要求。

(3)经实践得知,在采取轧制工艺生产单面异种材质金属复合板时,可以采用异步轧制或异径轧制的方法来避免由于两种材质延伸率不一致而造成的板形问题。

参考文献

[1] Li L, Yin F X and Nagai K. Progress of Laminated Materials and Clad Steels Production [J]. Materials Science Forum, 2011, 675-677:439-447.

[2] 唐 华,肖伟亭,曹洪海,等.压力容器用热轧不锈钢复合钢板可行性的探讨[J].压力容器,2015,32(3):76-80.

[3] 孙 浩,王 克.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.

[4] 王廷傅.不锈钢复合板生产技术发展现状[J].钢铁,1986,21(1):47-51.

[5] 李 炎,祝要民,周旭峰,等.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.

[6] 刘晓涛,张延安,崔建忠.层状金属复合材料生产工艺及其新进展[J].材料导报,2002,16(7):41-43.

[7] 王一德,王立新,李国平.太钢不锈钢复合板生产发展及展望[J].中国管理科学,2002,8(11):612-622.

[8] 李 龙,张心金,刘会云,等.热轧不锈钢复合板界面剪切强度测定[J].钢铁,2013,48(12):52-56.

[9] 郑红霞,李宝宽,昌泽舟.金属复合板生产方法的发展现状[J].炼钢,2001,17(2):20-23.

[10] Pozuelo M, Carreno F and Cepeda-Jimenez C M, et al. Effect of Hot Rolling on Bonding Characteristics and Impact Behavior of a Laminated Composite Material Based on UHCS-1.35 Pct C [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(3):666-671.

[11] Hanzaki A Z, Hodgson P D and Yue S. The Influence of Bainite on Retained Austenite Characteristics in Si-Mn TRIP Steel [J]. ISIJ International, 1995, 35:81-84.

陈振业(1983-),男,博士生(2017年东北大学),高级工程师,2006年武汉科技大学(本科)毕业,中厚钢板产品开发及工艺技术研究。E-mail:wustchenzhenye@163.com

收稿日期:2018-07-19

欢迎订阅 2019 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社