

## SM45 钢 300 ~ 410 mm 特厚复合板的组织和性能

李广龙 赵坦 原思宇 李文斌 范刘群 金耀辉

(鞍钢集团钢铁研究院, 鞍山 114009)

**摘要** 将经过清理的两块 300 mm × 2 000 mm × 4 000 mm 连铸坯在真空室将坯料四周焊合成 585 ~ 595 mm 坯料, 经 1 200 °C 加热, 并在 > 1 100 °C 开轧, 轧制速度 1.0 ~ 1.2 m/s, 道次压下量大于 45 mm, 轧成 300 ~ 410 mm 厚 SM45 钢 (C: 0.42 ~ 0.48, Si: 0.17 ~ 0.37, Mn: 0.50 ~ 0.80, P ≤ 0.030, S ≤ 0.035) 复合板, 轧后缓冷 48 h。采用探伤、组织、冷弯、拉伸、冲击及硬度等方法检验复合钢板结合度及力学性能。结果表明, 复合钢板的金相组织为铁素体和珠光体, 钢板结合度良好, 没有明显缺陷存在; 钢板的抗拉强度为 600 ~ 675 MPa, 复合界面 Z 向试样的抗拉强度为 612 ~ 661 MPa。

**关键词** SM45 钢 300 ~ 410 mm 复合钢板 组织 结合性能 复合界面

## Structure and Properties of 300 ~ 410 mm Clad Heavy Plate of Steel SM45

Li Guanglong, Zhao Tan, Yuan Siyu, Li Wenbin, Fan Liuqun and Jin Yaohui  
(Iron and Steel Research Institute, Angang Group, Anshan 114009)

**Abstract** After welding on all sides of cleaned two 300 mm × 2 000 mm × 4 000 mm casting slabs to 585 ~ 595 mm stock in vacuum chamber, and heating at 1 200 °C, the 300 ~ 410 mm clad heavy plate of steel SM45 (C: 0.42 ~ 0.48, Si: 0.17 ~ 0.37, Mn: 0.50 ~ 0.80, P ≤ 0.030, S ≤ 0.035) is rolled with beginning rolling at > 1 100 °C, rolling speed 1.0 ~ 1.2 m/s and pass reduction more than 45 mm, after rolling the clad plate is slow-cooling for 48 h. The degree of combination and mechanical properties of clad plate is examined by ultrasonic inspection, structure analysis, cold bending, tensile, impact and hardness test. Results show that the metallographic structure of clad steel plate is ferrite and pearlite, the combination of steel plate is nice and there is no obvious defect; the tensile strength of clad steel plate is 600 ~ 675 MPa, and the tensile strength of specimen at Z direction of clad interface is 612 ~ 661 MPa.

**Material Index** Steel SM45, 300 ~ 410 mm Clad Steel Plate, Structure, Combined Property, Clad Interface

近年来塑料制品向大型化、精密化方向发展, 模具制造业呈现一模多腔、模具大型化的发展趋势, 对大截面特厚塑料模具钢板的需求越来越大, 其中 SM45 钢板是需求量较大的一类。目前, 特厚钢板的生产多采用连铸坯直接轧制生产<sup>[1-2]</sup>, 但由于受连铸坯厚度规格的限制, 在生产 250 mm 以上钢板时, 钢板的压缩比很小, 造成钢板的综合机械性能降低, 无法生产出高性能的特厚钢板。另外一种应用较多的生产特厚钢板的方法是模铸法, 即采用大型钢锭作为原料, 经轧制或锻造得最终特厚钢板, 但该方法的成材率不高, 且随着钢锭尺寸的增大, 偏析、疏松等缺陷增多。日本川崎钢铁公司 (JFE) 报道了采用连铸坯焊接复合制备坯料<sup>[3]</sup>, 用以生产特厚钢板, 解决了因连铸坯厚度限制, 生产钢板厚度受限的问题。国内外学者对复合轧制技术进行了广泛的研究<sup>[4-7]</sup>。本文以鞍钢生产的 300 ~ 410 mm 特厚 SM45 钢板为研究对象, 对 SM45 特厚复合钢板的组织及性能进行了介绍。

### 1 试验材料及方法

试验用 SM45 钢连铸坯的化学成分 (%) 为: C: 0.42 ~ 0.48, Si: 0.17 ~ 0.37, Mn: 0.50 ~ 0.80, P ≤ 0.030, S ≤ 0.035, 其余为 Fe 及其他杂质。本文采用真空复合轧制工艺过程为, 首先进行坯料准备及组坯, 坯料冶炼流程为: 260 t 转炉冶炼 → LF 精炼 → RH 脱气处理 → 连铸, 连铸坯尺寸 (mm) 为 300 × 2 000 × 4 000。再对坯料进行表面清理, 将待复合面修磨平整干净, 清理完成的表面清洁无氧化, 不平度小于 4 mm。然后在真空室内将坯料的四周焊合, 使坯料之间保持为真空状态。焊接完成的坯料在加热炉中加热, 加热温度 1 200 °C, 保温一段时间后出炉轧制, 开轧温度大于 1 100 °C, 轧制速度控制 1.0 ~ 1.2 m/s, 道次压下量大于 45 mm, 轧制完成的钢板缓冷 48 h 后, 取样检验。坯料的厚度规格及最终轧制钢板的尺寸如表 1 所示。

在钢板一端宽度的 1/4 位置处取检验用样坯, 样坯尺寸 (mm) 为 300 × 400 × 厚度, 在样坯的表面、

表 1 坯料厚度及轧制钢板的规格  
Table 1 Thickness of stock and size of steel rolled plate

编号	坯料厚度/mm	复合方式	钢板尺寸 (mm)	压缩比
1	590		300 × 2 000 × 7 800	1.97
2	595	两块 300 mm	320 × 2 000 × 7 400	1.86
3	585	厚连铸坯	400 × 2 000 × 5 800	1.46
4	590		410 × 2 000 × 5 700	1.44

1/4厚度和复合界面位置切取金相、拉伸以及冲击试样,拉伸试样取横向圆拉伸,冲击试样取纵向试样,尺寸(mm)为10×10×55。1/4厚度、复合界面位置切取Z向拉伸试样。为了更严格的考察钢板的结合性能,对样坯取全厚度的弯曲试样(Z向弯曲),试样尺寸(mm)为10×40×全厚度。对样坯取全厚度硬度试样。金相试样经研磨、抛光、腐蚀后,采用DM15000M光学显微镜进行观察。拉伸试样及Z向拉伸试样在Z1200材料试验机上进行试验,冲击试样采用ZBC2602全自动冲击试验机进行检验,冲击温度为20℃,每组测试3个试样,取平均值作为试验结果。Z向弯曲采用WB-1000电液伺服弯曲试验机进行检验,弯曲角度为90°,弯心直径 $d=2a$ ( $a$ 为试样厚度),弯曲位置为1/4厚度及复合界面。硬度采用DRIN200M-L布氏硬度计进行检验,每个截面检验3个点,取平均值作为试验结果。

## 2 试验结果

### 2.1 钢板结合度检验

按照GB/T2970-2004《厚钢板超声波检验方法》对钢板进行超声波探伤检验。结果表明,采用复合轧制工艺生产的300,320,400,410 mm厚SM45钢板无明显缺陷,满足I级要求。说明复合钢板没有出现分层现象。对钢板进行低倍检验,结果显示在钢板1/4厚度位置存在0.5级的偏析和疏松,应该这是由于原铸坯中心存在偏析及疏松造成的。复合钢板的Z向弯曲检验结果如图1所示。由图1可以看出,钢板1/4厚度处的冷弯试样出现断裂,而复合界面处的试样没有出现断裂及分层现象,说明复合钢板的结合度良好,复合界面处的结合强度不低于钢板的基体位置。

### 2.2 复合钢板力学性能检验

图2(a,b)所示为不同厚度钢板不同位置的拉伸性能检验结果,由图2可以看出,对于不同厚度的SM45钢板,强度分布比较均匀,强度值都在600 MPa以上。不同位置的断后伸长率不同,其中表面与复合界面处断后伸长率相当,1/4厚度处伸长率最低。由图2(c)可以看出,不同厚度钢板的冲击功

都在20 J以上,对同一钢板的不同位置来说,表面与复合界面的冲击功略高,1/4厚度处冲击功较低。钢板的Z向性能检验结果如表2所示。由表2

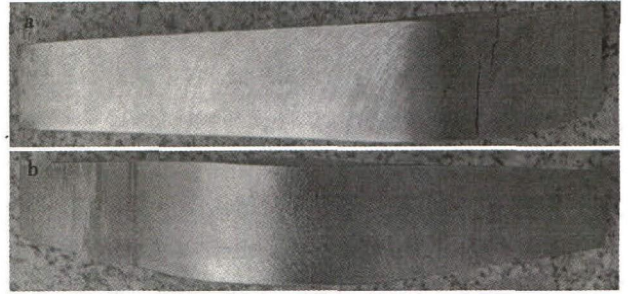


图 1 复合钢板弯曲形貌:(a)1/4厚度;(b)复合界面  
Fig. 1 Morphology of bending of clad steel plate: at 1/4 thickness (a) and clad interface (b)

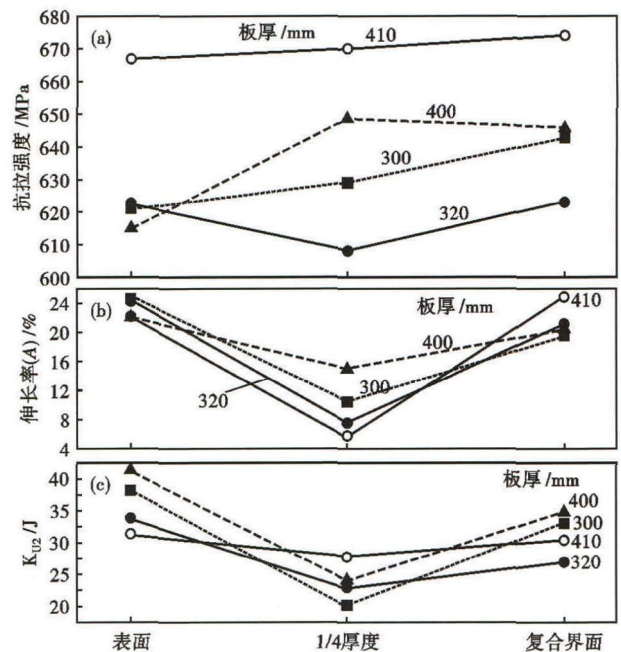


图 2 SM45 钢复合板表面、1/4厚度和复合界面的 (a) 抗拉强度;(b) 伸长率和 (c) 冲击性能

Fig. 2 Tensile strength (a), elongation (b) and impact toughness (c) of clad plate of steel SM45 at surface, 1/4 thickness and clad interface

表 2 SM45 钢复合板 Z 向性能

Table 2 Properties of clad plate of steel SM45 at Z direction

编号	复合钢板厚度/mm	位置	$R_m$ /MPa	Z/%
1#	300	1/4	640	8
		复合界面	627	29
2#	320	1/4	621	17
		复合界面	612	23
3#	400	1/4	635	39
		复合界面	633	20
4#	410	1/4	644	31
		复合界面	661	25

可以看出,不同厚度钢板 Z 向抗拉强度也在 600 MPa 以上,复合界面处 Z 向断面收缩率都在 20% 以上,1#、2# 钢板复合界面的 Z 向断面收缩率高于 1/4 位置,3#、4# 钢板复合界面的 Z 向断面收缩率低于 1/4 位置。说明复合界面处的 Z 向性能达到甚至超过基体性能,钢板结合度良好。

图 3 所示为复合钢板不同截面的布氏硬度分布。由图 3 可以看出,不同厚度钢板的硬度都位于 170~200 HB,厚度方向截面硬度差在 10 HB 以内,满足塑料模具对钢板的硬度及硬度均匀性的要求。

### 2.3 复合钢板金相组织检验

图 4 所示为不同厚度钢板的金相组织照片。由

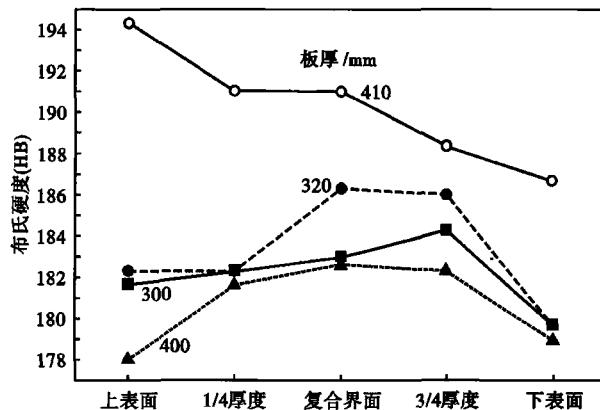


图 3 SM45 钢 300~410 mm 复合板面布氏硬度分布  
Fig. 3 Distribution of Brinell hardness number of 300~410 mm clad plate of steel SM45

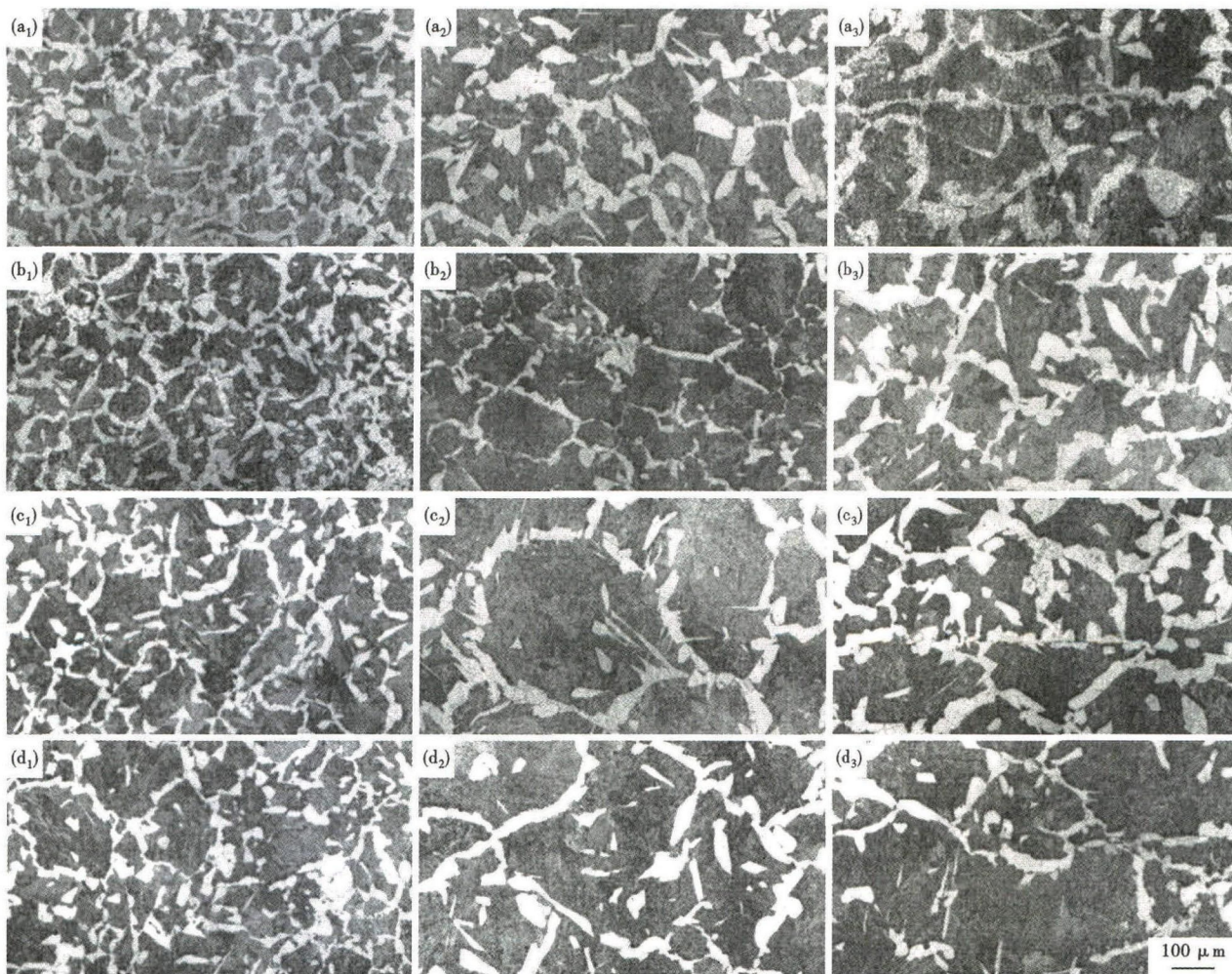


图 4 SM45 复合钢板的组织形貌:(a<sub>1</sub>)(b<sub>1</sub>)(c<sub>1</sub>)(d<sub>1</sub>)分别为 300,320,400,410 mm 钢板表面;(a<sub>2</sub>)(b<sub>2</sub>)(c<sub>2</sub>)(d<sub>2</sub>)分别为 300,320,400,410 mm 钢板 1/4 厚度位置;(a<sub>3</sub>)(b<sub>3</sub>)(c<sub>3</sub>)(d<sub>3</sub>)分别为 300,320,400,410 mm 钢板复合界面

Fig. 4 Morphology of structure of steel SM45 clad plate: (a<sub>1</sub>) (b<sub>1</sub>) (c<sub>1</sub>) (d<sub>1</sub>)- respectively at surface of 300, 320, 400 and 410 mm clad plate; (a<sub>2</sub>) (b<sub>2</sub>) (c<sub>2</sub>) (d<sub>2</sub>)- respectively at 1/4 thickness of 300, 320, 400 and 410 mm clad plate; and (a<sub>3</sub>) (b<sub>3</sub>) (c<sub>3</sub>) (d<sub>3</sub>)- respectively at clad interface of 300, 320, 400, 410 mm clad plate

图 4 可以看出,采用连铸坯复合轧制生产 SM45 钢板,其金相组织以铁素体和珠光体为主,但不同位置的晶粒尺寸不同,钢板表面的晶粒尺寸最小,1/4 厚

度的晶粒尺寸最大,复合界面的晶粒尺寸介于二者之间。这是由于钢板表面对应于原始铸坯的表面,其原始晶粒较细,且在轧制过程中变形量较大,从而

使其最终的晶粒细;复合界面对应于原始铸坯的另一表面,原始晶粒也比较细,但由于该位置位于坯料的中心位置,在轧制过程中产生的变形量小,因此其晶粒尺寸比表面晶粒尺寸大;钢板 1/4 厚度位置对应于原始铸坯的中心位置,其原始晶粒比较粗大,在轧制过程中产生的变形量也不大,因此晶粒尺寸为厚度方向最大。

由钢板复合界面的金相组织照片可以看出,界面处的金相组织也是以铁素体和珠光体为主,界面两侧钢板已经紧密结合在一起,表现为界面处晶粒已横跨两侧的钢板,没有发现明显的裂纹等缺陷。

### 3 分析讨论

复合轧制是将两层或多层金属或合金叠放在一起进行轧制,依靠原子之间金属键的相互吸引力而使金属复合的一种工艺。轧件在高温状态和强大轧制压力作用下,金属产生塑性变形,使接触面的氧化层破碎,破碎后露出新鲜金属表面,金属表面的原子相互接触,两组元金属接近至原子量级距离时,原子相互吸引,当相邻原子以平衡间距稳定排列时,金属原子的外层自由电子成为共同的电子,形成金属键,加上金属原子相互扩散形成共有的扩散层而实现复合。

加热、轧制变形是决定复合轧制效果的关键工艺。有研究表明<sup>[8]</sup>,在高温条件下长时间保温,可以使界面处的原子被激活,并向空隙处迁移,使缝隙变窄,逐渐愈合。因此合理的加热工艺是实现钢板复合轧制过程中复合界面结合的前提。加热完成后的轧制变形可以使待复合面达到紧密接触,更利于后续的复合过程。坯料表面在加工过程中会形成一层加工硬化层,并存在不同程度的氧化,硬化层的存在会阻止钢板的结合,坯料的变形可以使塑性差的硬化层和氧化层破裂,露出新鲜金属,坯料之间的新鲜金属相互接触从而形成牢固的冶金结合。因此为了能使更多的硬化层破裂,并改进板坯厚度中心性能,需采用尽量高的道次压下率来进行轧制。

由于本试验是由两块连铸坯复合生产 SM45 钢板,因此其晶粒粗大的区域位于 1/4 厚度位置,而不是传统连铸坯直接轧制钢板由表面到心部晶粒越来越粗大的特点。该种组织分布,对钢板的组织性能造成以下影响,首先,提高钢板的组织均匀性,两块连铸坯复合,使铸坯原始晶粒粗大的区域由心部变

为 1/4 厚度,这可以使原始晶粒粗大区域在轧制过程中产生更大的变形量,有利于该区域晶粒的细化,缩小与其他位置晶粒尺寸的差别。其次,提高钢板的强度均匀性,一方面钢板 1/4 位置厚度处晶粒粗大会使其强度降低,另一方面,珠光体的数量对钢板的强度有较大的影响,复合钢板 1/4 厚度处由于碳偏析形成的珠光体组织比表面与心部的多,珠光体多会引起强度升高,两方面的综合作用,使复合钢板的强度具有很好的均匀性。

### 4 结论

(1) 采用两块连铸坯,经表面清理-真空焊合-加热-轧制等工序,成功生产出 300 ~ 410 mm 厚 SM45 钢板。钢板结合性能良好,没有发现裂纹等缺陷存在。

(2) 不同厚度的钢板都具有良好的力学性能,抗拉强度都在 600 MPa 以上,复合界面处的 Z 向性能达到甚至超过基体性能,钢板截面硬度分布均匀,最大截面硬度差在 10 HB 以内。

(3) 复合钢板的金相组织以铁素体和珠光体为主,但不同位置的晶粒尺寸不同。复合界面处的晶粒已横跨两侧的钢板,没有明显的裂纹存在。

### 参考文献

- [1] 刘清梅,魏丽艳. 特厚板品种生产现状及新技术研究[J]. 上海金属,2011,33(6):57-60.
- [2] 李文斌,曹忠孝,李阳,等. 应用连铸坯生产特厚钢板技术[J]. 轧钢,2011,28(1):28-31.
- [3] Nishida S, Matsuoka T, Wada T. Technology and Products of JFE Steel's Three Plate Mills [J]. JFE Technological Report, 2005, 5(3):1-8.
- [4] 陈振业,张晓力,张云飞,等. 低合金高强度结构钢 Q345B 特厚板的复合轧制工艺[J]. 特殊钢,2014,35(4):31-33.
- [5] 李龙,张心金,祝志超,等. 初始板厚和压下量对热轧复合钢板复合厚度比的影响[J]. 特殊钢,2014,35(5):43-46.
- [6] 余伟,张焯铭,何春雨,等. 轧制复合生产特厚板工艺[J]. 北京科技大学学报,2011,33(11):1391-1395.
- [7] 骆宗安,谢广明,胡兆辉,等. 特厚钢板复合轧制工艺的实验研究[J]. 塑性工程学报,2009,16(4):125-128.
- [8] 韦东滨,韩静涛,谢建新,等. 真空环境下钢中裂纹的高温愈合[J]. 金属学报,2000,36(7):713-717.

李广龙(1985-),男,硕士(2009年北京理工大学),工程师,2007年济南大学(本科)毕业,钢铁品种开发。  
E-mail: ag\_lgl@163.com

收稿日期:2016-01-16