

## 初始板厚和压下量对热轧复合钢板复合厚度比的影响

李 龙<sup>1</sup> 张心金<sup>2</sup> 祝志超<sup>2</sup> 李萌葵<sup>2</sup>

(1 银邦金属复合材料股份有限公司技术研究院, 无锡 214145;

2 中国第一重型机械股份公司能源装备材料科学研究所, 天津 300457)

**摘 要** 通过二辊可逆轧机试验研究了 45 钢、NM360 耐磨钢、310S 和 316 不锈钢, 初始复层 5.1 ~ 15.2 mm 板和 Q345 碳素钢初始基层 82.7 ~ 90.0 mm 板 (初始复合厚度比 5.40% ~ 15.53%) 以及总压下量 35% ~ 75% 对在 1 150 ~ 1 000 °C 热轧的复合钢板复合厚度比的影响。结果表明, 当复层板 (316 和 310S 钢) 变形抗力大于基层板 (Q345 钢) 时, 随压下量增加, 钢板复合厚度比增加, 并且初始复合厚度比越大, 热轧后复合厚度比增加越明显; 当复层板 (45 钢和 NM360 钢) 变形抗力小于基层板 (Q345 钢) 时随压下量增加, 钢板复合厚度比减小; 拟合的复合厚度比相对压下量的变化率  $Y$  与强度差  $S_d$  的关系式为:  $Y = (-0.12 \pm 0.17) + (0.068 \pm 0.004) S_d$ 。

**关键词** Q345 45 钢 NM360 310S 316 热轧 复合钢板 压下量 复合厚度比

## Effect of Initial Plate Thickness and Reduction on Cladding Ratio of Hot-Rolled Clad Steel Plate

Li Long<sup>1</sup>, Zhang Xinjin<sup>2</sup>, Zhu Zhichao<sup>2</sup> and Li Mengnie<sup>2</sup>

(1 Technology Institute for Clad Materials, Yinbang Clad Material Co Ltd, Wuxi 214145;

2 Materials Research Institute for Energy Equipment, China First Heavy Industries, Tianjin 300457)

**Abstract** Effect of the initial cladding ratio 5.40% ~ 15.53% with 0.45C steel, NM360 abrasion-resistant steel, 310S and 316 stainless steel 5.1 ~ 15.2 mm initial cladding plate and Q345 carbon steel 82.7 ~ 90.0 mm initial base plate and the total reduction 35% ~ 75% on cladding ratio of clad steel plate hot-rolled at 1 150 ~ 1 000 °C has been tested and studied by using two-high reversing mill. Results show that as the resistance to deformation of cladding plate (316 and 310S steel) is larger than that of base plate (Q345 steel), with increasing reduction the cladding ratio of plate increases, and the larger the initial cladding ratio, the increasing cladding ratio of hot-rolled plate more obvious; as the resistance to deformation of cladding plate (0.45C steel and NM360 steel) is smaller than that of base plate (Q345 steel), with increasing reduction the hot-rolled plate cladding ratio decreases; the relation between change rate  $Y$  of synthetic relative reduction of cladding ratio and strength difference  $S_d$  is  $Y = (-0.12 \pm 0.17) + (0.068 \pm 0.004) S_d$ .

**Material Index** Q345, 0.45C steel, NM360, 310S, 316, Hot-Rolling, Clad Plate, Reduction, Cladding Ratio

金属复合钢板是将两种或两种以上具有不同性能的金属利用各自的性能优势进行分层组合而形成的一类金属层状复合材料, 既具有复层的耐腐蚀性<sup>[1-2]</sup>、耐磨性<sup>[3-4]</sup>, 又具有基层的高强度<sup>[5]</sup>、高韧性<sup>[3]</sup>、良好的可焊性<sup>[6]</sup>和成型性能等<sup>[7]</sup>, 同时可节约大量贵金属, 因而被广泛用于石油、化工、海洋工程、运输、电力等行业, 具有巨大的社会效益<sup>[1-2]</sup>。目前, 金属复合钢板的工业生产大多采用热轧复合技术, 与爆炸复合、铸造复合相比, 热轧复合在产量、成本、生产率、过程易控制、性能稳定可靠及幅面规格和复层尺寸等方面来说具有较明显的优势<sup>[2]</sup>。

热轧金属复合钢板的板形尺寸精度是评价产品质量的主要性能之一, 但目前对金属复合板的研发主要集中在结合界面和性能方面。本文选取包括中碳钢、耐磨钢及不锈钢等具有不同强度的复层材料

与低碳钢进行热轧复合, 研究压下率对复合板的复合厚度比的影响规律。

### 1 实验材料和方法

实验用复层材料包括 45 钢、NM360 钢、316 和 310S 不锈钢, 基层材料为 Q345 钢, 化学成分见表 1。

使用 Gleeble3500 模拟实验机测定实验钢在高温下的应力应变曲线。热模拟试验尺寸为  $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 。实验在氦气保护环境下进行, 将试样加热

表 1 热轧复合钢板中复层和基层的化学成分 / %

Table 1 Analysis of cladding and base metal of hot-rolled clad steel plate / %

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
基层 Q345	0.16	0.37	1.44	0.013	0.002	-	-
复层 45	0.47	0.25	0.65	0.011	0.007 4	0.12	0.084
NM360	0.17	0.38	1.28	0.014	0.005 2	0.23	0.034
316	0.05	0.64	1.20	0.046	0.013	16.40	10.16
310S	0.08	0.42	1.30	0.037	0.014	23.54	18.16

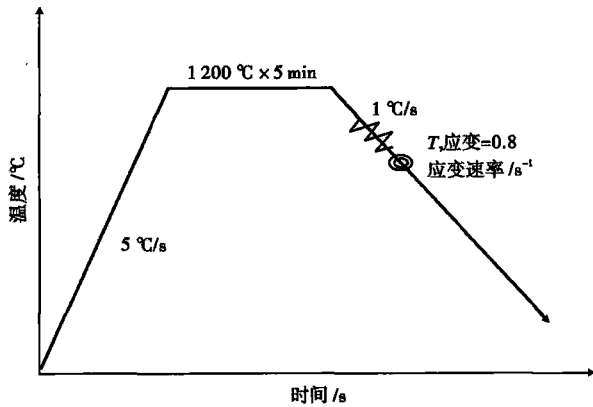


图 1 测定材料高温应力-应变曲线的工艺制度

Fig.1 Process schedule for measuring stress-strain curves of materials at elevated temperature

到 1 200 °C 保温后以 1 °C/s 冷却到变形温度,在此温度下进行单道次压缩,并记录材料的真应力-真应变曲线,具体工艺参数见图 1。

热轧复合实验中复层的设定尺寸(mm)为 15 × 290 × 290, Q345 低碳钢设定的尺寸(mm)为 85 × 300 × 300。将复层材料和 Q345 钢的待复合面机械清理后,采用夹层方式进行组坯,原始厚度 200 mm,四周焊接后进行抽真空处理<sup>[8]</sup>,真空度为 0.1 Pa。将密封后的复合板坯加热至 1 200 °C 保持 2 h 后在两辊热轧机上进行轧制,轧制速度 1 m/s,开轧温度为 (1 150 ± 20) °C,终轧温度控制在 1 000 ~ 1 050 °C。控制每道次的压下量为 20% 左右,设定的总压下量为 35%、50%、65%、75%,终轧后空冷。实验过程中,采用手提红外测温仪测试轧件表面温度,误差为 ± 20 °C。

对于热轧后的试样,观察 TD (Transverse Direction) 面的组织。试样经抛光后,用 4% 硝酸酒精对低碳钢层进行腐蚀,利用德国 ZEISS 生产的 200MAT 金相显微镜观察组织并测定复层的厚度。使用游标卡尺在钢板的四周测定 8 个位置,并取平

均值。

表 2 为复合板的初始厚度及对应的复合厚度比,根据 GBT6396-2008 复合钢板力学及工艺性能试验方法中的规定,金属复合板的复合厚度比定义为复材厚度占复合钢板总厚度之比。

## 2 结果与分析

### 2.1 复层与基层材料的金相组织

图 2 为金属复合板的金相组织,从图 2 中可以看出,低碳钢 Q345 和 NM360 的组织主要为铁素体和珠光体,不锈钢的组织为奥氏体,45 钢的组织主要为珠光体和铁素体。

### 2.2 实验材料的应力-应变曲线

图 3 (a, b, c) 分别为 Q345、NM360、45、316 及 310S 在 1 000、1 100、1 200 °C 下的流变曲线。随着变形程度的增加,材料开始发生动态硬化,流变应力先随应变的增加迅速升高。当真应变继续增加,动态回复软化机制导致真应力趋向平稳,即呈现稳态流变特征。当变形量继续增加时,应力应变曲线上则呈现出明显的峰值应力,然后下降,通常这种现象主要是由于材料内部组织发生动态再结晶所致<sup>[9]</sup>。在同一应变速率下,随变形温度的升高,真应力水平明显下降;另外,温度越高材料也越易发生动态再结晶软化,当温度从 1 000 °C 升高到 1 200 °C 时,在 1 s<sup>-1</sup> 的变形速率下, Q345 钢的动态再结晶的临界变形量从 0.5 降低到 0.25 左右。

表 2 复合板复层和基层初始厚度及对应的初始复合厚度比  
Table 2 Initial thickness of cladding and base metal of clad plate and corresponding initial cladding ratio

复合板	复层厚度/mm	基层厚度/mm	复合厚度比/%
316/Q345	5.1	90.0	5.40
	9.2	88.2	9.45
	15.0	84.0	15.15
310S/Q345	15.0	82.8	15.33
NM360/Q345	15.2	82.7	15.53
45/Q345	15.0	83.9	15.16

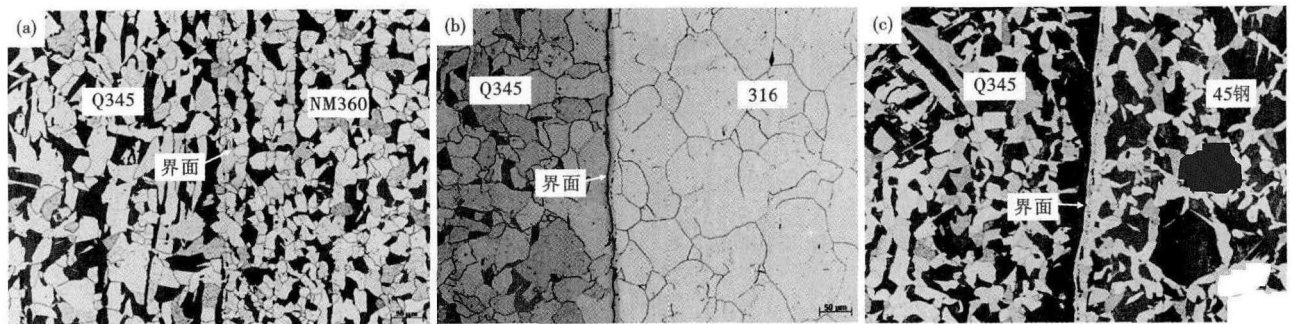


图 2 (a) NM360/Q345; (b) 316/Q345; (c) 45/Q345 钢复合板的组织形貌 (真空度 0.1 Pa, 总压下量 75%)

Fig.2 Structure morphology of NM360/Q345 (a), 316/Q345 (b) and 45/Q345 (c) steel clad plate, vacuum 0.1 Pa and total reduction 75%

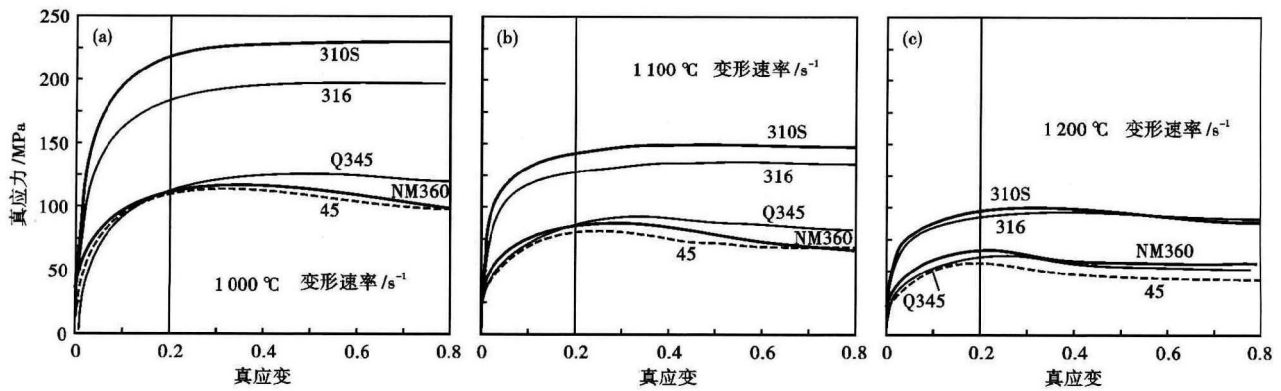


图3 实验钢在(a)1 000 °C;(b)1 100 °C;(c)1 200 °C的真应力-真应变曲线  
Fig. 3 True stress-strain curves of test steels at 1 000 °C (a), 1 100 °C (b) and 1 200 °C (c)

从图3(a, b, c)还可以看出,在高温下310S的强度最高,45钢的强度最低,不过这种差别随着温度的升高而减弱,当温度为1 000 °C,应变为0.2时,Q345与310S的强度差为103 MPa,当温度升高到1 200 °C时,Q345与310S两者的强度差降到34 MPa,降低了约70 MPa。从图3也可看出,Q345与NM360及45钢的流变曲线在1 000~1 200 °C的流变应力相差不大,而Q345与不锈钢的流变应力相差较大。

### 2.3 压下量对复合厚度比的影响

图4为金属复合板的复合厚度比随压下量的变化规律(CR-复合厚度比,Re-压下量),其中图4(a)为316不锈钢复合板在不同初始复合厚度比(5%、10%和15%)的情况下复合厚度比与压下量的关系,图4(b)为初始复合厚度比约为15%的316不锈钢、310S不锈钢、45钢和NM360钢的复合厚度比与压下量之间的关系。

从图4(a)可以看出,对316不锈钢来说,随着变形量的增加,复合厚度比逐渐增加,这主要是由于316不锈钢的高温强度较Q345的要高(图3),在变形过程中316的变形程度要小于Q345,导致了复合厚度比的升高,这种变化基本和压下量呈线性关系(图4)。从图4(b)可以看出,310S不锈钢复合板的复合厚度比随着压下量的增加而增加,并且增加的幅度较316复合板的为大,这主要是由于310S不锈钢在高温时有比316更高的强度所致(图3)。NM360和45钢的强度较Q345

钢为低(图3),使得轧制复合后NM360和45钢复合板的复合厚度比降低。

图5为316不锈钢/Q345复合板的初始复合厚度比与图4(a)所获得的直线斜率的关系,从图5中可以看出,复合厚度比变化的程度(对应图4a拟合的直线斜率)与初始复合厚度比有关,初始复合厚度比约为5%时,直线斜率为0.62,当初始复合厚度比增加到约15%时,直线的斜率增加到了3.03,这说明随着不锈钢厚度比例的增加,变形使得复合厚度比的增加更加明显,即初始复合厚度比越大,复合厚度比与变形程度的直线斜率越大。图5的意义在于当316不锈钢/Q345复合板的初始复合厚度比确定后,利用图5可以确定复合厚度比与压下量直线关系的斜率,再通过图4(a)来预测不同压下量时的最终复合厚度比。

### 2.4 复合厚度比与强度差的关系

图6为复合厚度比与压下量线性斜率和强度差的关系(选择的强度差为1 100 °C时压下量为75%)

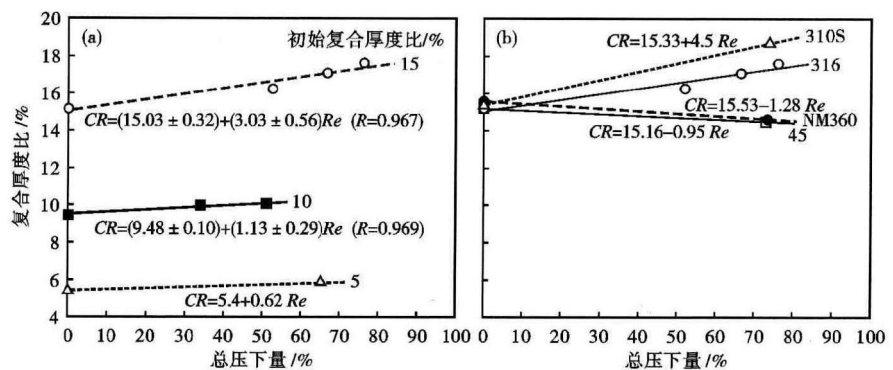


图4 总压下量对复合钢板复合厚度比的影响:(a)初始复合厚度比5%、10%和15%,316不锈钢;(b)初始复合厚度比15%,复层材料310S、316、NM360和45钢

Fig. 4 Effect of total reduction on cladding ratio of clad steel plate, CR- cladding ratio, Re- Reduction: (a) initial cladding ratio 5%, 10% and 15%, 316 stainless steel; (b) initial cladding ratio 15%, cladding materials 310S, 316, NM360 and 0.45C steel

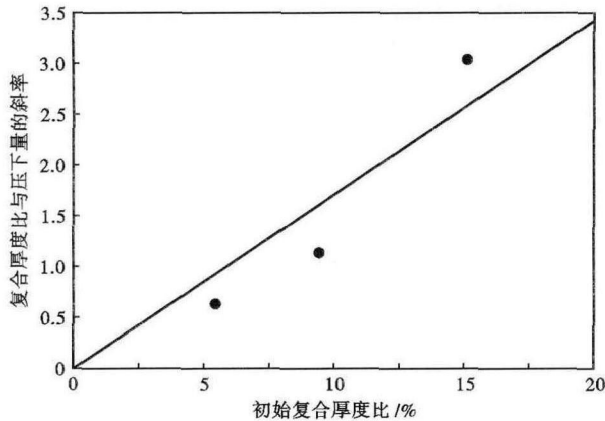


图 5 316 不锈钢/Q345 钢复合板的初始复合厚度比与图 4 (a) 所获得的直线斜率关系

Fig. 5 Relation between initial cladding ratio of 316 stainless steel/Q345 steel clad plate and slope of straight-line got in Fig. 4 (a)

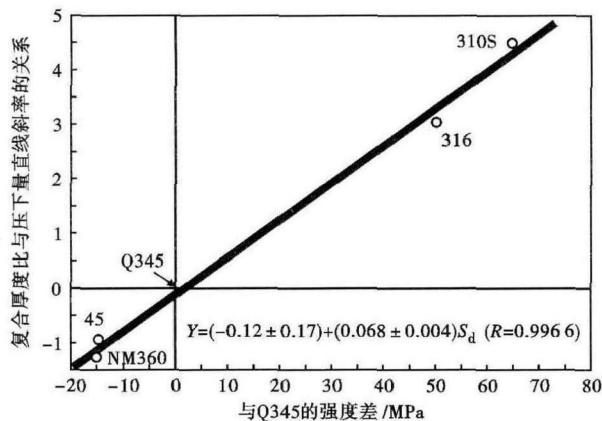


图 6 复层材料与基层 Q345 钢强度差与复合厚度比和压下量直线斜率的关系

Fig. 6 Relation between strength difference of cladding materials-base Q345 steel and slope of straight-line of cladding ratio-reduction

时的强度差,见图 3c)。

从图 6 中可以看出,310S 和 316 不锈钢复合板的复合厚度比与压下量的斜率为正值,而 45 钢和 NM360 复合板的复合厚度比与压下量的斜率为负值,斜率与强度差非常符合线性关系(相关系数  $R = 0.9966$ ),拟合后的直线方程的截距为 0.12,非常接近 0,而 0 点的意义为当复层材料与基层材料都为 Q345 时的斜率(应为 0)。可以通过图 6 拟合的  $Y = (-0.12 \pm 0.17) + (0.068 \pm 0.004) S_d$  ( $S_d$  指强度差)关系并结合图 4 来预测不同金属复合板的复合厚度比变化规律,从而可以根据最终产品的要求来设计原始组坯的尺寸比例,为制定工艺和控制板形提供参考。

以上结果可以为热轧金属复合板复合厚度比的

控制提供实验数据和思路上的参考,当然为了较为精确控制复合板的复合厚度比,一方面需要较为精确地确定高温变形时的流变曲线,如考虑摩擦、变形道次、相变等对变形抗力的影响;另外还需考虑热轧复合的变形特性如金属的流动规律、复合板组坯特征及复合板尺寸等因素的影响。

### 3 结论

(1) 当复层材料的变形抗力大于基层材料的抗力时(如 316 及 310S 不锈钢),随着变形量的增加复合厚度比逐渐增加;当复层材料的变形抗力低于基层材料的抗力时(如 45 钢及 NM360 钢),随着变形量的增加复合厚度比逐渐减小。

(2) 316 不锈钢复合板的复合厚度比随压下量的变化程度与初始复合厚度比有关,初始复合厚度比约为 5% 时,直线斜率为 0.62,当初始复合厚度比增加到约 15% 时,直线的斜率增加到了 3.03,即初始复合厚度比越大,复合厚度比与变形程度的直线关系的斜率越大。

(3) 利用最小二乘法拟合了复合厚度比相对压下量的变化率  $Y$  与强度差  $S_d$  的关系为:  $Y = (-0.12 \pm 0.17) + (0.068 \pm 0.004) S_d$ ,通过该方程可以初步预测不同金属复合板的复合厚度比变化规律。

国家 863 计划项目资助(2013AA031302)

### 参考文献

- [1] Li Long, Yin Fuxing, Nagai Kotobu. Progress of Laminated Materials and Clad Steels Production[J]. Materials Science Forum, 2011, 675-677: 439-447.
- [2] 李 龙, 张心金, 刘会云, 等. 不锈钢复合板的制造技术及工业应用[J]. 轧钢, 2013, 30(3): 43-47.
- [3] 符寒光, 黄兆军. 钢管热连轧机架耐磨复合衬板的研制[J]. 特殊钢, 2004, 25(6): 46-49.
- [4] 阎志醒, 孟昭宏. 耐磨复合钢板及其应用[J]. 冶金设备, 1997, 6(3): 55-57.
- [5] 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的试验研究[J]. 钢铁, 2013, 48(12): 46-50.
- [6] 韩丽娟, 范绍林, 税小勇, 等. 16MnR + 0Cr18Ni9 不锈钢复合板的焊接[J]. 现代焊接, 2008(5): 43-49.
- [7] 李文军, 殷江宁, 邢高磊, 等. 321/15CrMoR 金属复合板压力容器封头的制造[J]. 材料开发与应用, 2001, 16(5): 34-35.
- [8] 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.
- [9] 王有铭, 李曼云, 韦 光. 钢材的控制轧制和控制冷却[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 93.

李 龙(1977-), 男, 博士(东北大学), 高级工程师, 2004 年内蒙古科技大学(本科)毕业, 金属层状复合材料技术开发。  
E-mail: lichen040928@163.com

收稿日期: 2014-04-28