

· 组织和性能 ·

600 MPa 低硅 Nb-Ti 微合金化优质 3.5 mm 热轧双相钢板的开发

殷 胜¹ 蔡晓辉² 朱红丹³

(1 宝钢梅山钢铁股份有限公司技术中心,南京 210039;2 东北大学连轧自动化国家重点实验室,沈阳 110819;
3 宝钢梅山钢铁股份有限公司检测中心,南京 210039)

摘 要 通过真空感应炉熔炼和浇铸的 50 kg 锭锻成 40 mm × 150 mm 坯和热轧成 10 mm 板以及热模拟试验研究了开发的低硅 Nb-Ti 微合金化双相钢(‰:0.082C,0.15Si,1.20Mn,0.010P,0.002S,0.020Nb,0.015Ti,0.045Al,0.0035N)静态和动态连续冷却转变(CCT)曲线、组织(11% 马氏体 + 89% 铁素体)和力学性能(抗拉强度 682 MPa)。并通过铁水脱硫-260 t BOF-LF-RH-230 mm × 1 300 mm 连铸-热轧工艺试制了低硅双相钢(‰:0.075C,0.15Si,1.16Mn,0.012P,0.003S,0.016Nb,0.015Ti,0.033Al,0.0043N)3.5mm 板。结果表明,精轧出口温度 810 ℃,水冷至 700 ℃,空冷 4.5 s,卷取温度 150 ℃时,该钢的组织为 15% 马氏体 + 85% 铁素体,晶粒度 12 ~ 12.5 级,抗拉强度 672 ~ 692 MPa,伸长率 24.0% ~ 28.5%,屈服比 0.65 ~ 0.67,钢板冲压成塑性优良,制造的轿车轮辐弯曲疲劳性能 15 × 10⁴ 次。

关键词 600 MPa 低硅 Nb-Ti 微合金化双相钢 3.5 mm 板 开发

Development of 600 MPa Low Silicon and Nb-Ti Microalloying High Quality 3.5 mm Hot-Rolled Dual Phase Steel Plate

Yin Sheng¹, Cai Xiaohui² and Zhu Hongdan³

(1 Technology Center, Meishan Iron and Steel Co Ltd, Baosteel, Nanjing 210039;
2 State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819;
3 Testing Center, Meishan Iron and Steel Co Ltd, Baosteel, Nanjing 210039)

Abstract The static and dynamic continuous cooling transformation (CCT) curves, structure (11% martensite + 89% ferrite) and mechanical properties (tensile strength 682 MPa) of developed low silicon and Nb-Ti Microalloying dual phase steel (‰: 0.082C, 0.15Si, 1.20Mn, 0.010P, 0.002S, 0.020Nb, 0.015Ti, 0.045Al, 0.0035N) have been tested and studied by melting in a vacuum induction furnace, casting 50 kg ingot, forging to 40 mm × 150 mm slab and hot rolling to 10 mm plate and thermal simulation testing. And 3.5 mm low silicon dual phase steel plate (‰: 0.075C, 0.15Si, 1.16Mn, 0.012P, 0.003S, 0.016Nb, 0.015Ti, 0.033Al, 0.0043N) has been pilot-produced by hot metal desulphurization-260 t BOF-LF-RH-230 mm × 1 300 mm slab concasting-hot rolling process. Results show that with finished rolling 810 ℃, water cooling to 700 ℃, air cooling for 4.5 s and coiling at 150 ℃, the structure of steel is 15% + 85% ferrite with grain size rating 12 ~ 12.5, the tensile strength of steel is 672 ~ 692 MPa with yield-ultimate strength ratio 0.65 ~ 0.67, and the yield of steel is 24.0% ~ 28.5%. The steel plate has nice stamping performance and the bending fatigue life of manufactured wheel rib of car is 15 × 10⁴.

Material Index 600 MPa Low Silicon and Nb-Ti Microalloying Dual Phase Steel, 3.5 mm Plate, Development

双相钢的组织是在软的铁素体基础上弥散分布着硬质的岛状马氏体。马氏体赋予材料强度,铁素体赋予材料塑性和韧性,其特点是具有高的抗拉强度,低的屈服比,无屈服点延伸,高塑性和高的加工硬化能力。

传统热轧双相钢产品中设计 Si、Cr、Mo 等合金元素,以便在传统热轧轧机上生产双相钢。本文设计了适合梅钢 1780 产线的低成本、高表面热轧双相钢一贯制工艺,产品性能稳定,经用户使用冲压成形性能良好、表面质量高、成品疲劳性能好。

1 产品方案及材料准备

传统热轧双相钢设计 Si、Cr、Mo 等合金元素的

目的是通过这些合金元素改变钢的连续冷却转变 CCT 曲线,使其在卷取后的空冷过程生产双相钢所需要的铁素体和马氏体组织,但存在合金成本高、含硅钢表面质量差、成品疲劳性能低等缺点。

为改善上述缺点,对相关产品^[1]进行设计优化:为降低成本,取消 Cr、Mo 等合金元素;针对表面质量差的缺点,将硅含量限制在 0.1% 以下;为提高钢的疲劳性能,将产品的屈服强度提高,主要加入 0.015% ~ 0.025% Nb,细化产品晶粒尺寸,并使铁素体相变左移,避免生成大量铁素体需要的恒温待温过程,可使前段冷却以连续冷却方式进行;另外设计微量 Ti (0.008% ~ 0.020%),改善产品焊接性

能,提高轮辐和轮辋焊接连接区域的性能,改善钢制车轮的疲劳性能。

C 含量增加使连续冷却转变(CCT)图铁素体向右移减少了铁素体转变量,相对增加了马氏体的转变量,使钢的强度增加,塑性降低;C 含量增加易使与铁素体分离后的奥氏体 C 含量增高形成韧性较差的孪晶马氏体。随着钢中 C 含量的降低,可加速铁素体的析出,也易得到强韧性较好的位错马氏体,但碳过低会降低马氏体总量使钢的强度降低,热轧双相钢中 C 含量一般 $\leq 0.1\%$ [2]。

在 C-Si-Mn 系的双相钢中, Mn 含量一般为 1.0% ~ 1.4%。随 Mn 含量增加,钢的抗拉强度明显增加。

试验用材料由 500 kg 真空感应炉冶炼,按照设计配好料后,浇铸成 50 kg 钢锭,化学成分如表 1,其主要特点是在碳锰钢的基础上添加了 Nb (0.020%),另外加入微量 Ti (0.015%)。钢锭经过锻造成(mm)40 × 150 × 150 的小板坯;取小板坯制成热模拟试样,然后通过热模拟试验研究材料 CCT 曲线特性,确定热轧工艺参数;随后通过宝钢中试平台的实验轧机将锻件轧成(mm)10 × 400 × 100 板料;最后通过力学性能测试、验证获得试验结果;最后通过梅钢二炼钢和 1780 产线现场试制,一次成功。

2 热模拟试验结果及讨论

2.1 静态相变点及静态 CCT 曲线

试验设备为热模拟试验机 Gleeble 3500,试样尺寸 $\Phi 8 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,动态相变方案:利用膨胀法测定试样以 $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速率加热到 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 180 s,以 $0.001, 0.01, 0.01 \text{ s}^{-1}$ 变形速率变形,真应变为 1.0,然后以 $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 冷却到室温,测定冷却过程的相变点;静态 CCT 试验方案:试样尺寸 $\Phi 8 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$,试样以 $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速率加热到 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 180 s,然后以 $0.5 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速率冷却到室温。取热模拟试验金相样,腐蚀剂为 4% 的硝酸酒精,检测设备为金相显微镜 (Axiophot2)。

在 $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 冷却速度下,试验钢的 Ar_3 点

表 1 真空感应炉熔炼的试验钢的分析成分 / %

Table 1 Analysis of test steel melting by vacuum induction furnace / %

C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Al	N
0.082	0.15	1.20	0.010	0.002	0.020	0.015	0.045	0.003 5

为 $767 \text{ }^\circ\text{C}$, Ar_1 点为 $713 \text{ }^\circ\text{C}$ 。试验钢相变特性如图 1(a) 所示,其铁素体转变曲线强烈左移,冷却速度大于 $50 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 就出现马氏体。

2.2 动态 CCT 曲线

动态 CCT 曲线试验方案:试样尺寸 $\Phi 8 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$,试样以 $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速率加热到 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 180 s,冷却到 $800 \text{ }^\circ\text{C}$,真应变 0.3,变形速率为 5 s^{-1} ,然后以 $0.5 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速率冷却到室温,试验钢的动态连续冷却曲线见图 1(b)。

从图 1 可知,试验钢的终轧温度必须大于 Ar_3 相变点 $767 \text{ }^\circ\text{C}$ [3-5],设计终轧温度为 $800 \text{ }^\circ\text{C}$;第 1 段冷却速率为 $10 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C/s}$;中间停留温度 Ar_1 以下,

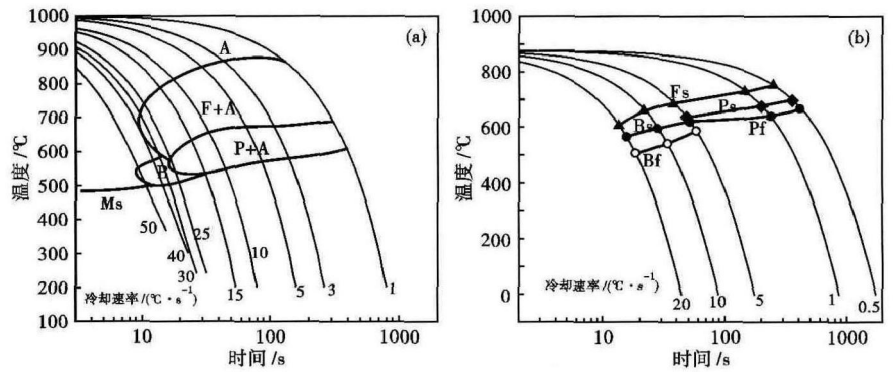


图 1 试验低硅双相钢的静态(a)和动态(b)连续冷却转变(CCT)曲线

Fig.1 Statistic (a) and dynamic (c) continuous cooling transformation (CCT) curves of test low silicon dual phase steel

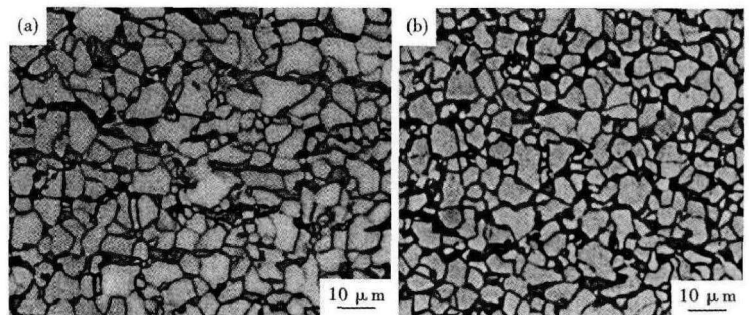


图 2 真空感应炉熔炼、热轧后试验的 10 mm 板 (a) 和工业生产 260 t 转炉-LF-RH-连铸板坯-3.5 mm 热轧板 (b) 低硅双相钢的组织形貌:(a)11% M + 89% F;(b)15% M + 85% F

Fig.2 Morphology of structure of vacuum induction furnace melting and hot rolled test 10 mm plate (a) and 260 t BOF-LF-RH-Slab CC-Hot-rolled commercial produced 3.5 mm plate (b) of low silicon dual phase steel: (a) 11% martensite + 89% ferrite; (b) 15% martensite + 85% ferrite

设计中间温度为 700 °C,中间停留时间为 4~6 s;第 2 段冷却速率为 50 °C/s 以上,设计为 70~100 °C/s,卷取温度为 200 °C 以下。

3 感应炉熔炼低硅双相钢的试验及结果

中试设备为宝钢中试平台试验单机架轧机,将经过锻造后的板坯(50 kg)通过热处理炉加热到 1 200 °C,保温 40 min,随后上轧机进行 7 道次轧制,出口温度为 800 °C,模拟精轧过程;然后喷水冷却到 700 °C,保温 4~6 s,随后将轧制完成的板料喷水冷却到 200 °C 以下,分别模拟层流冷却和卷取过程,其组织为 11% 马氏体和 89% 铁素体,见图 2(a)。

将试样加工成 GB/T228-2010 中的 P9 试样,使用 Instron5580 进行拉伸试验,结果如表 2 所示(力学性能试样采用短比例试样)。

4 低硅双相钢的生产试制和使用结果

按照中试成分和工艺,在梅钢二炼钢和 1780 热轧产线生产,炼钢主要工艺流程:铁水脱硫-260 t 转炉-260 t LF-260 t RH 精炼-连铸,连铸坯尺寸为 230 mm × 1 300 mm;热轧主要工艺流程:板坯加热-粗轧-精轧-两段式层流冷却(第 1 段冷却-中间空冷-

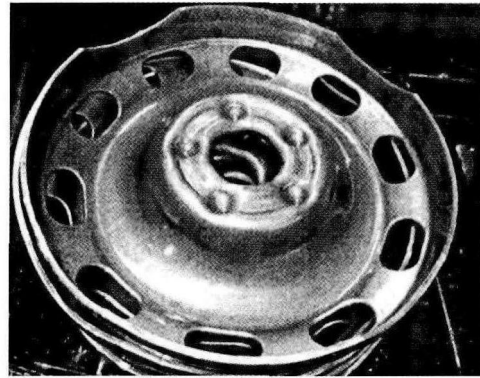


图 3 高表面 3.5 mm 低硅双相钢板制造的轮辐成品
Fig.3 Morphology of wheel rib manufactured by high quality 3.5 mm low silicon dual phase steel plate

第 2 段冷却)-卷取,成品尺寸(厚度 × 宽度)为 3.5 mm × 1 275 mm,具体生产实绩及性能见表 3、表 4、表 5,组织为 15% 马氏体和 85% 铁素体,见图 2(b)。

梅钢生产低成本高表面热轧双相钢经用户生产汽车轮辐,产品冲压成形性能良好(图 3),具有表面质量高成本低的优点,成品车轮弯曲疲劳寿命达 15 万次。

5 结论

(1) 添加 0.015%~0.025% Nb 和 0.008%~0.020% Ti 的热轧双相钢具有细晶、高疲劳性能。

(2) 低硅、铌钛成分设计配合分段冷却工艺可以获得冲压成形性能良好、表面质量高、成品疲劳性能好,成品车轮弯曲疲劳寿命达 15 万次的低成本热轧双相钢。

参考文献

- [1] 时晓光,刘仁东,韩 斌,等.热轧双相钢 DP600 组织性能的研究[J].钢铁研究学报,2010,22(4):39-44.
- [2] 冯惠平,王四根,花礼先,等.碳和锰元素对 Mn-Si 双相钢连续冷却转变的影响[J].金属学热处理,1998(2):31-33.
- [3] 徐 锋,高彩茹,杜秀林,等.冷却路径对低成本热轧双相钢组织性能的影响[J].轧钢,2013,30(2):10-14.
- [4] 董 毅,时晓光,韩 斌,等.冷却工艺对经济型热轧双相钢组织性能的影响[J].鞍钢技术,2012(6):19-22.
- [5] 杜 琛,何宜柱,张 建.热轧双相钢的连续冷却曲线分析[J].热处理技术,2013,28(1):52-55.

殷 胜(1980-),男,硕士研究生,工程师,2004 年南京理工大学(本科)毕业,热轧汽车钢产品开发。

E-mail:8309873@qq.com

收稿日期:2014-04-16

表 2 真空感应炉熔炼热轧后试验钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of vacuum induction furnace melting and hot rolling test steel

试样编号	下屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A/\%$	屈强比
试验钢-1	461	682	24.5	0.68

表 3 工业试生产低硅双相钢的分析成分 / %

Table 3 Analysis of commercial pilot produced low silicon dual phase steel / %

C	Si	Mn	P	S	Al	N	Nb	Ti
0.075	0.15	1.16	0.012	0.003	0.033	0.004 3	0.016	0.015

表 4 热轧工艺参数要求

Table 4 Scheme of hot rolling parameters

板坯加热 温度/°C	粗轧出口 温度/°C	精轧出口 温度/°C	第 1 段水 冷后/°C	空冷时 间/s	卷取温 度/°C
1 200	1 000~1 100	810	700	4.5	150

表 5 低硅双相钢 3.5 mm 热轧板的力学性能

Table 5 Mechanical properties of 3.5 mm hot rolled plate of low silicon dual phase steel

试样 编号	下屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长 率 $A/\%$	屈强比	晶粒度/ 级
1#	434	672	28.5	0.65	12
2#	452	677	26.0	0.67	12.5
3#	448	692	24.0	0.65	12