

· 工艺技术 ·

## Si 含量对 10B21 钢热轧盘条组织和性能的影响

李世琳<sup>1,2</sup> 阮士朋<sup>1,2</sup>

(1 邢台钢铁有限责任公司技术中心, 邢台 054027; 2 河北省线材工程技术研究中心, 邢台 054027)

**摘要** 分析和研究了 0.03% ~ 0.21% Si 含量对含硼冷镦钢 10B21 (/%: 0.20C, 0.03 ~ 0.21Si, 0.82 ~ 0.83Mn, 0.009 ~ 0.013S, 0.015 ~ 0.016P, 0.001 9 ~ 0.002 0B)  $\Phi$ 34 mm 热轧盘条组织和性能的影响。盘条热轧的终轧温度为 900  $^{\circ}$ C, 缓冷。结果表明, Si 含量由 0.03% 增加到 0.21%, 10B21 钢盘条抗拉强度由 480 MPa 增加到 489 MPa, 即增加了 9 MPa; HRB 硬度值增加 5.3, 钢的组织中铁素体团尺寸由 52  $\mu$ m 降低至 42  $\mu$ m, 非金属夹杂物尺寸及数量无明显变化, 淬透性能提高。

**关键词** Si 含量 10B21 钢 热轧盘条 组织 力学性能

## Effect of Si Content on Structure and Properties of 10B21 Steel Hot-Rolled Coil

Li Shilin<sup>1,2</sup> and Ruan Shipeng<sup>1,2</sup>

(1 Technology Center, Xingtai Iron and Steel Corp Ltd, Xingtai 054027;  
2 Hebei Province Engineering and Technology Research Center for Wire Rod, Xingtai 054027)

**Abstract** The effect of 0.03% ~ 0.21% Si on structure and properties of 10B21 cold heading steel of containing boron (/%: 0.20C, 0.03 ~ 0.21Si, 0.82 ~ 0.83Mn, 0.009 ~ 0.013S, 0.015 ~ 0.016P, 0.001 9 ~ 0.002 0B)  $\Phi$ 34 mm hot-rolled coil has been analyzed and studied. The end-rolling temperature of hot-rolling coil is 900  $^{\circ}$ C, slow-cooling. Results show that with increasing Si content in 10B21 steel from 0.03% to 0.21%, the tensile strength of coil increasing from 480 MPa to 489 MPa, i. e. that increases by 9 MPa; the HRB hardness value increases by 5.3; the size of ferrite groups in structure of steel reduces from 52  $\mu$ m to 42  $\mu$ m; the size and quantity of non-metallic inclusions has no obvious change; and the hardenability of steel improves.

**Material Index** Si Content, 10B21 Steel, Hot-Rolled Coil, Structure, Mechanical Properties

10B21 钢成分符合美标 SAE J403-2014 或 ASTM A510-2013; 主要用于生产 8.8 级、9.8 级和 10.9 级强度紧固件, 其特点是塑性、淬透性好, 具有优良的冷镦性能和拉拔性能。美标未对 10B21 钢中 Si 含量范围进行要求, 仅给予参考范围; 目前关于硅含量对冷镦钢组织和性能的影响研究较少, 一般都是凭经验认为增加 Si 含量可提高冷镦钢的强度和硬度, 降低塑性和韧性, 影响冷成型性能<sup>[1]</sup>; 故企业标准中多规定 Si  $\leq$  0.10%; 但仍有少数客户要求 Si 含量为 0.15% ~ 0.35%。为此, 本文以 10B21 钢为研究对象, 研究了硅含量对含硼冷镦钢组织、力学性能的影响。

### 1 试验材料及方法

试验所用高硅和低硅 10B21 钢盘条, 规格  $\Phi$ 34 mm, 试验钢化学成分见表 1 所示。盘条生产工艺流程为: 转炉 (80 t)  $\rightarrow$  LF 精炼  $\rightarrow$  280 mm  $\times$  325 mm 大方坯连铸  $\rightarrow$  大方坯加热  $\rightarrow$  开坯 (160 mm  $\times$  160 mm 热轧坯)  $\rightarrow$  钢坯加热  $\rightarrow$  高压水除鳞  $\rightarrow$  控制轧制  $\rightarrow$  控制冷却。控轧控冷工艺方案为开轧温度 1 060  $^{\circ}$ C, 进

表 1 试验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of tested steel/%

编号	C	Si	Mn	S	P	B
1 <sup>#</sup>	0.20	0.21	0.82	0.013	0.015	0.002 0
2 <sup>#</sup>	0.20	0.03	0.83	0.009	0.016	0.001 9

精轧温度 900  $^{\circ}$ C, 吐丝温度 880  $^{\circ}$ C, 缓冷, 两个成分钢种采用相同的工艺制度。

对轧制后的盘条利用 CMT5305 微控电子万能试验机进行力学性能测试, 利用 Leica DM2700M 光学显微镜进行显微组织和非金属夹杂物观察。将盘条加工成直径 25 mm, 长度 100 mm 且带有凸缘的标准末端淬火试样, 按照 Jominy 法进行末端淬火试验和硬度测试, 淬火加热温度为 860  $^{\circ}$ C, 保温时间 30 ~ 35 min。

### 2 试验结果及分析

#### 2.1 不同 Si 含量 10B21 钢盘条力学性能对比

高 Si 和低 Si 热轧盘条的力学性能检测结果对比见表 2。可见, 在相同的轧制工艺条件下 (即开轧

表 2 硅含量对 10B21 钢热轧盘条力学性能的影响

Table 2 Effect of Si content on mechanical properties of 10B21 steel hot-rolled coil

编号	Si/%	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
1 <sup>#</sup>	0.21	489	24.0	42
2 <sup>#</sup>	0.03	480	25.5	47

1 060 ℃, 进精轧 900 ℃, 吐丝 880 ℃, 缓冷), 高硅 1<sup>#</sup> 钢的平均抗拉强度较低硅 2<sup>#</sup> 钢高 9 MPa, 平均伸长率和断面收缩率较 2<sup>#</sup> 钢低 1.5% 和 5%。

## 2.2 不同 Si 含量 10B21 钢盘条硬度对比

高 Si 和低 Si 热轧盘条的硬度检测结果对比见图 1。可见, 在相同的轧制工艺条件下, 1<sup>#</sup> 钢的硬度较 2<sup>#</sup> 钢高。随着硅含量由 0.03% 提高至 0.21%, HRB 硬度值平均提高 5.3。

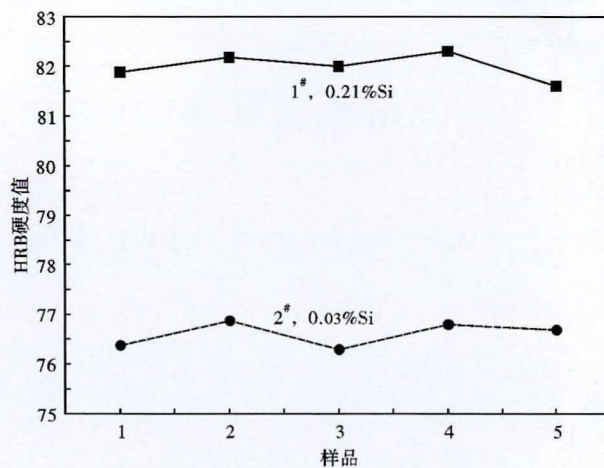


图 1 Si 含量对 10B21 钢  $\Phi 34$  mm 热轧盘条硬度的影响  
Fig. 1 Effect of Si content on hardness of 10B21 steel  $\Phi 34$  mm hot-rolled coil

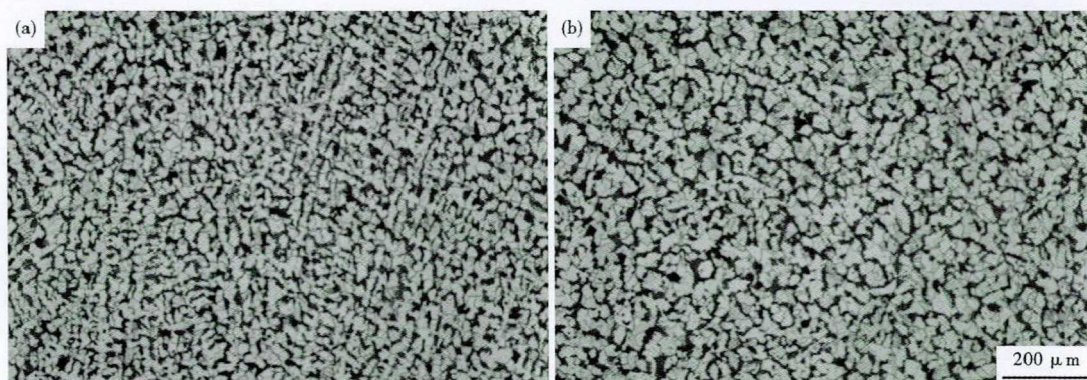


图 2 Si 含量 1<sup>#</sup>, 0.21% (a) 和 2<sup>#</sup>, 0.03% (b) 10B21 钢  $\Phi 34$  mm 热轧盘条组织形貌

Fig. 2 Morphology of structure of 10B21 steel  $\Phi 34$  mm hot-rolled coil with 0.21% Si, No1 (a) and 0.03% Si, No2 (b)

## 2.3 不同 Si 含量 10B21 钢盘条显微组织对比

由图 2 可见, 显微组织均由块状铁素体和珠光体组成。1<sup>#</sup> 钢盘条中铁素体团平均尺寸约 42  $\mu\text{m}$ , 2<sup>#</sup> 钢盘条中铁素体团平均尺寸约 52  $\mu\text{m}$ 。因此, 随着硅含量增加, 铁素体团平均尺寸减少约 10  $\mu\text{m}$ , 珠光体含量未见明显变化。

## 2.4 不同 Si 含量 10B21 钢盘条非金属夹杂物对比

硅元素具有较强的脱氧作用, 脱氧后易形成含  $\text{SiO}_2$  的 C 类和 D 类夹杂物。一般认为, 随着硅含量的增加, C 类和 D 类夹杂增加和积聚, 容易导致冷裂。对高硅和低硅的非金属夹杂物进行观察, 两者均未发现 C 类夹杂物, D 类夹杂物尺寸和数量也相差不大; 在显微镜下观察 0.5  $\text{mm}^2$  正方形视场内, D 类非金属夹杂物数量最多 6 个, 尺寸 5 ~ 8  $\mu\text{m}$ 。

## 2.5 不同 Si 含量 10B21 钢盘条淬透性能对比

不同硅含量的 10B21 钢淬透性对比见图 3。淬

透性曲线一般可分为 3 个部分, 第 1 部分为高硬度稳定区, 该区由水冷端开始至一定距离, 此时曲线很稳定, 硬度下降很少; 第 2 部分为过渡区, 该区硬度急剧下降, 使曲线出现一个比较明显的转折; 第 3 部分为低硬度稳定区, 该区硬度下降减少, 但硬度值很低。从图 3 对比可以看出, 在第 1 部分的高硬度稳定区,  $J_{3.0}$  处的硬度值基本一致, 这主要是受钢中碳含量的影响, 两个试验钢种的碳含量基本相同, 所以检测的淬火端硬度值基本一致, 但随着淬火端距离的增加, 2<sup>#</sup> 钢硬度下降较 1<sup>#</sup> 钢明显; 在第 3 部分低硬度稳定区, 两钢硬度值也基本一致。综上所述, 1<sup>#</sup> 钢淬透性略优于 2<sup>#</sup> 钢。

## 2.6 结果讨论

不同 Si 含量 10B21 钢盘条对比分析可知, 随 Si 含量增加, 盘条的抗拉强度、硬度呈现增大的变化趋势。主要是因为 Si 在钢中是以非碳化物形成元素存在, 易固溶于  $\alpha\text{-Fe}$  中, 在  $\alpha\text{-Fe}$  中, 原子半径为

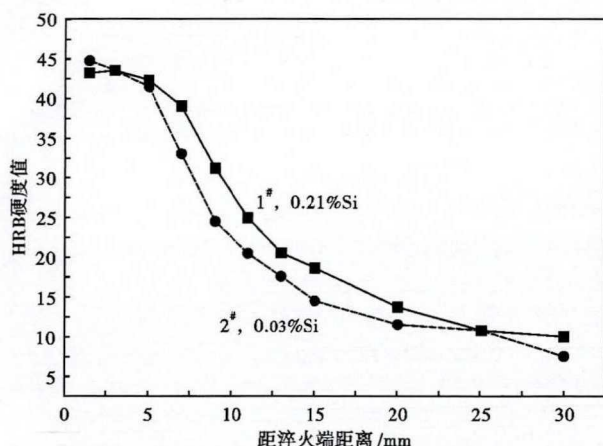


图3 Si含量对10B21钢Φ34 mm热轧盘条末端淬火硬度曲线的影响

Fig. 3 Effect of Si content on end quenching hardness curves of 10B21 steel Φ34 mm hot-rolled coil

0.118 nm的Si与原子半径为0.126 nm的Fe发生置换固溶强化,原子半径较小的Si原子的溶入会降低 $\alpha$ -Fe的点阵常数,引起 $\alpha$ -Fe的晶格畸变,它能与材料中的刃形位错产生弹性交互作用,对位错的运动产生阻碍作用<sup>[2]</sup>,从而使材料中随Si含量的增加,材料强度、硬度呈现递增、而伸长率、断面收缩率呈下降趋势。

Si含量对先共析铁素体平均晶粒尺寸有一定程度的影响。在高温区硅增加了碳在奥氏体中的活度,促进铁素体中的碳向奥氏体内部扩散,增加了奥氏体向铁素体转变的驱动力,促进了铁素体形成,从而提高了 $Ar_3$ <sup>[3,4]</sup>。其机理为:(1)先共析铁素体析出温度较高,此时Fe原子活动性较大,Si的加入提高了碳在奥氏体中的活度,促进了碳在奥氏体中的扩散。(2)将铁素体析出近似看作平衡过程,则析出驱动力 $\Delta G$ 为:

$$\Delta G = RT \left[ x_C^\gamma \ln \frac{x_C^{\gamma/\gamma+\alpha}}{x_C^\gamma} + (1 - x_C^\gamma) \ln \frac{1 - x_C^{\gamma/\gamma+\alpha}}{1 - x_C^\gamma} \right]$$

式中: $x_C^\gamma$ -奥氏体的原始碳量; $x_C^{\gamma/\gamma+\alpha}$ - $\alpha$ 、 $\gamma$ 两相平衡

时界面处 $\gamma$ 一侧的碳浓度。在一般低碳钢中, $x_C^\gamma/x_C^{\gamma/\gamma+\alpha} \approx 1$ ,则 $1 - x_C^{\gamma/\gamma+\alpha} \approx 1 - x_C^\gamma$ ,所以上式中起主要作用的是第一项。由于Si缩小 $\gamma$ 相区,由Fe-Fe3C平衡相图知其将使 $x_C^{\gamma/\gamma+\alpha}$ 增大,从而 $\Delta G$ 增大<sup>[5]</sup>。

Si易固溶于 $\gamma$ -Fe中,对奥氏体强烈的固溶强化作用使过冷奥氏体的切变阻力增大,使马氏体转变的 $M_s$ 点降低,提高了钢的淬透性<sup>[2,6]</sup>。

### 3 结论

(1)硅含量由0.03%提高至0.21%,可使10B21钢盘条抗拉强度平均增加9 MPa,伸长率降低1.5%,断面收缩率降低5%,HRB硬度值增加5.3。

(2)硅含量由0.03%提高至0.21%,可使10B21钢盘条中铁素体团平均尺寸减少约17  $\mu\text{m}$ ,淬透性能提高,C、D类非金属夹杂物尺寸及数量未发生明显变化。

### 参考文献

- [1] 乔 淞.低成本高强度含硼冷镢钢盘条研发[D].包头:内蒙古科技大学,2017.
- [2] 龙 骏,郑志斌,郑开宏,等.Si含量对Fe-Cr耐磨合金钢组织与性能的影响[J].铸造技术,2018,39(3):517-520.
- [3] 蔡明晖,丁 桦,李晓滨,等.高扩孔钢变形奥氏体的连续冷却转变[J].东北大学学报(自然科学版),2008,29(11):1576-1579.
- [4] 秦利国,乔孟平,蔡明晖.硅含量对低碳钢连续冷却中转变组织的影响[J].山东冶金,2009,31(6):41-43.
- [5] 张明星,王 军,康沫狂.硅在低碳合金钢中作用的研究(I)-硅对过冷奥氏体转变动力学的影响[J].金属热处理,1992,17(8):3-7.
- [6] 张治国,陈德东,李 卫.含硅中碳低合金钢的组织与冲击磨料磨损行为[J].材料热处理学报,2013,34(9):85-89.

李世琳(1982-),女,硕士(四川大学),高级工程师,河北工业大学(本科)毕业,线材产品研发。

E-mail: Cpkf2@xtsteel.com

收稿日期:2019-09-12