

· 工艺技术 ·

HRB400 钢 Ti 微合金化和轧后冷却工艺优化的生产实践

卓伟伟¹ 张波² 刘浪² 李春晓²

(1 江苏科技大学张家港校区冶金与材料工程学院, 张家港, 215600;

2. 湖南工业大学冶金与材料工程学院, 株洲, 412007)

摘要 HRB400 钢($\% : 0.21 \sim 0.25C, 0.35 \sim 0.60Si, 1.30 \sim 1.55Mn, \leq 0.045P, \leq 0.045S$) $\Phi 14$ mm 钢材的生产工艺为 100 t BOF-吹氩-150 mm \times 150 mm 坯连铸-轧制。为解决因提高 HRB400 钢屈服强度并减少因 C、Mn 元素过高导致的钢材冷弯开裂现象, 采用添加氮化钛合金进行 Ti 微合金化和优化控轧控冷的工艺试验。结果表明, 当钢中 Mn 和 Si 含量($\%$)分别降低 0.35 和 0.10, 添加 0.007% Ti(试验 2)或控制钢筋上冷床温度 670~690 $^{\circ}C$, 成品钢筋强度均能达到 460 MPa 的试验目标值; 而在采用 Ti 微合金化和优化的冷却工艺(上冷床钢筋温度 670~710 $^{\circ}C$, $\% : 0.22C, 0.34Si, 1.00Mn, 0.007Ti$, 试验 3) 试验钢的平均屈服强度 R_{eL} 达到 485 MPa, 原工艺(上冷床温度 690~730 $^{\circ}C$, $\% : 0.22C, 0.43Si, 1.37Mn$)的平均屈服强度 R_{eL} 仅为 435 MPa。

关键词 HRB400 钢 钛微合金化 控轧控冷 工艺优化

Production Practice of Ti Microalloying and Rolled Products Cooling Process Optimization of Steel HRB400

Zhuo Weiwei¹, Zhang Bo², Liu Lang² and Li Chunxiao²

(1 Metallurgy and Material College, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600;

2 School of Metallurgical and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007)

Abstract The production process of $\Phi 14$ mm products of steel HRB400 ($\% : 0.21 \sim 0.25C, 0.35 \sim 0.60Si, 1.30 \sim 1.55Mn, \leq 0.045P, \leq 0.045S$) is 100 t BOF-argon blowing-150 mm \times 150 mm billet casting-rolling. In order to resolve the cold-bending cracking phenomenon by increasing yield strength of steel HRB400 besides higher C and Mn content in steel, the commercial pilot production by adding titanium nitride for Ti microalloying and optimizing control rolling-cooling process is carried out. Results show that with decreasing Mn and Si content ($\%$) in steel respectively by 0.35 and 0.1, and adding 0.007% Ti in steel (test No2), or controlling steel reinforced bar going to cold bed temperature at 670~690 $^{\circ}C$ (test No2), the yield strength of finished reinforced bar is up to 460 MPa the test aim value; as using Ti microalloying and optimizing cooling process ($\% : 0.22C, 0.34Si, 1.00Mn, 0.007Ti$ and going to cold bed temperature at 670~710 $^{\circ}C$, test No3) the average yield strength R_{eL} of test steel is up to 485 MPa, while as using original process ($\% : 0.22C, 0.43Si, 1.37Mn$ and going to cold bed temperature at 690~730 $^{\circ}C$) the average yield strength R_{eL} is only 435 MPa.

Material Index Steel HRB400, Ti Microalloying, Controlling Rolling and Cooling, Process Optimization

目前三级螺纹钢生产主要有两种工艺手段^[1-3]: (1)采用微合金化(主要是 V、Nb、Ti); (2)在轧钢过程中采用控轧控冷技术。本文就钢厂生产 $\Phi 14$ mm 的 HRB400 钢工艺过程进行研究。

1 生产工艺及优化方案

HRB400 钢冶炼工艺流程为: 铁水 \rightarrow 混铁炉 \rightarrow 100 t 转炉 \rightarrow 吹氩站 \rightarrow 连铸(4 机 4 流 \rightarrow 150 mm \times 150 mm 方坯连铸) \rightarrow 轧制(控轧控冷)。HRB400 钢的成分设计是在 HRB335 钢的基础上通过增加 C、Mn 含量来提高强度, 优化前的 HRB 钢内控成分

($\%$)为: 0.21~0.25C, 0.35~0.60Si, 1.30~1.55Mn, $\leq 0.045P, \leq 0.045S$ 。

在轧制过程中, 上冷床温度为 690~730 $^{\circ}C$, 屈服强度 R_{eL} 为 414~439 MPa, 平均 426 MPa。

但增加 C、Mn 含量会导致钢筋容易产生冷弯开裂, 不合格品几率增加^[4-7]。因此, 考虑通过氮化钛微合金元素细化晶粒, 提高钢的屈服和抗拉强度, 同时适当降低钢中 C、Mn 含量, 优化后内控成分设计为($\%$): 0.20~0.24C, 0.25~0.50Si, 0.90~1.15Mn, $\leq 0.045P, \leq 0.045S, 0.007Ti$ 。

现场试验分为 3 次,每次 4 炉,共 12 炉钢。其优化方案如表 1 所示,其中试验 3 是在试验 1,2 的基础上进行的验证性试验。

2 试验结果及其分析

2.1 优化轧制后冷却工艺试验 1

在 HRB335 钢的浇次后按工艺优化前 HRB400 试验钢成分冶炼 4 炉试验钢。这 4 炉钢筋在试验方案范围内分别按不同的上冷床温度控制,从 670 ~ 710 °C 依次以 15 °C 间隔递增作为控制目标,其实际轧制参数记录如表 2。

轧制后成品化学成分(%)为:0.23C,0.44Si,1.34Mn,0.024~0.038P,0.018~0.030S。

从分析结果可以看出,钢中 Mn 基本按下限控

制,钢中 S 在 0.018% ~ 0.030%,波动较大,这主要是由于废钢中 S 含量和转炉下渣控制有关。检测的屈服强度 R_d 为 463 ~ 483 MPa,平均 470 MPa。

结果表明,(1)控冷温度最低调至 670 °C 时,钢材屈服强度平均达到 470 MPa;(2)在钢材化学成分相同的情况下,钢筋上冷床温度越低,屈服强度越大;(3)进一步降低控冷温度是以牺牲轧制速度为代价。1~3 号试验钢的屈服强度均达到 460 MPa 以上,满足要求。因此,应将上冷床温度控制在 670 ~ 690 °C。

2.2 优化成分试验 2

按优化后 HRB400 钢成分冶炼 4 炉试验钢。上冷床温度按优化前 690 ~ 730 °C 控制。轧制后成品化学成分(%)为 0.23C,0.33Si,0.98Mn,0.027P,0.021S,0.006Ti。其屈服强度 R_d 为:461 ~ 467 MPa,平均为 463.6 MPa。

结果得出,即使不调整轧钢工艺,钢材屈服强度也可以达到 460 MPa。这表明,钢中 Mn 和 Si 分别调低 0.35% 和 0.10% 的情况下,因为氮化钛合金的强化作用,试验钢材性能高于原工艺水平。

3 试验 1 和试验 2 金相组织检测结果

轧后试样金相组织图片如图 1、图 2 所示。

结合图 1,图 2 和表 3,表 4 可见,两种优化方案

表 1 现场试验生产安排

Table 1 Arrangement of pilot production scheme

项目	试验 1	试验 2	试验 3
冶炼成分优化	未进行	进行	进行
轧制工艺优化	进行	未进行	进行

表 2 实际轧制参数

Table 2 Actual rolling parameters

加热温度/ °C	上冷床温度/ °C	水压/ MPa	平均轧制速度/ ($m \cdot s^{-1}$)
1 120 ~ 1 180	670 ~ 710	0.5 ~ 0.9	11.5

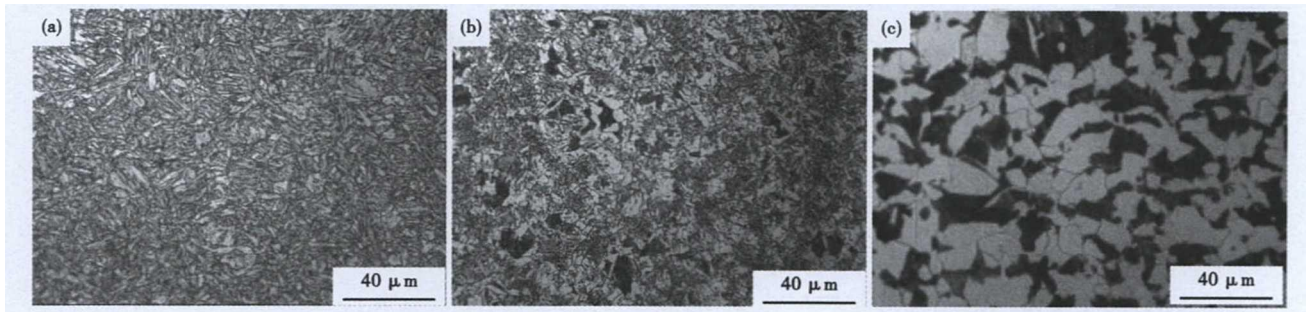


图 1 HRB400 钢(试验 1)Φ14 mm 轧材的组织形貌:(a)表层;(b)过渡层;(c)中心

Fig. 1 Morphology of structure of Φ14 mm rolled products of steel HRB400 produced by test No1: (a) surface layer; (b) transition layer and (c) center

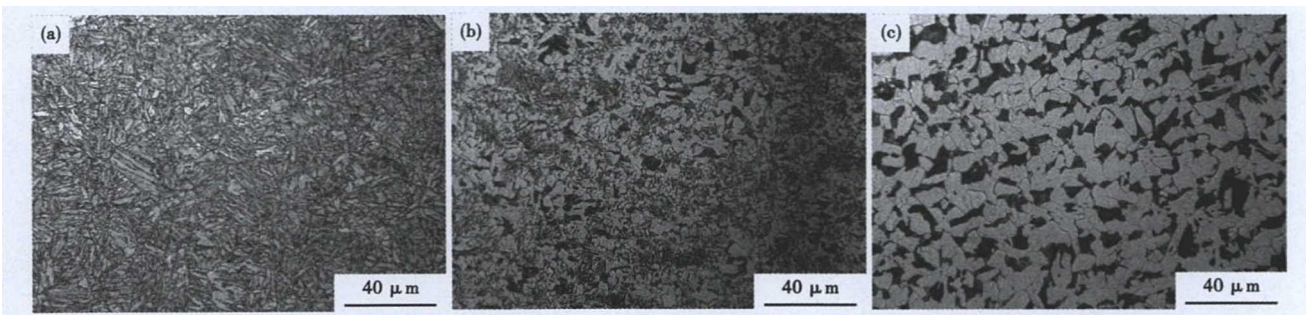


图 2 HRB400 钢(试验 2)Φ14 mm 轧材的组织形貌:(a)表层;(b)过渡层;(c)中心

Fig. 2 Morphology of structure of Φ14 mm rolled products of steel HRB400 produced by test No2: (a) surface layer; (b) transition layer and (c) center

中成品组织结构均可分为 3 层,其中表面组织均为回火索氏体(S),其中试验 2 中 1 号试样因为回火慢导致出现了少量的屈氏体(T)。钢筋上冷床温度下限由 690℃调整至 660℃后,钢材表层回火层增厚,但仍为正常的回火索氏体,而没有出现标准禁止的回火马氏体组织。过渡层组织为贝氏体+铁素体+珠光体(B+F+P),成品中心均为 F+P。随着上冷床温度的降低,钢筋组织结构变细,晶粒尺寸变小,强度相应增加。在试验 2 试样中发现了有硅酸钙夹杂物的存在,这主要是由于连铸过程中中间包保护渣的卷入引起的,因此,应该加强连铸过程控制

表 3 HRB400 钢(试验 1)Φ14 mm 轧材金相组织检测结果
Table 3 Metallographic examination results of Φ14 mm rolled products of steel HRB400 produced by test No1

轧制号	金相检测结果
1	表层回火 S,厚 1.3~1.6 mm;过渡层 B+F+P,厚 1.3~1.4 mm;心部 F+P,晶粒度 10.0 级
2	表层回火 S,厚 1.2~1.5 mm;过渡层 B+F+P,厚 1.3~1.4 mm;心部 F+P,中心轻微 C 偏析,晶粒度 10.0 级
3	表层回火 S,厚 1.2~1.5 mm;过渡层 B+F+P,厚 1.1~1.2 mm;心部 F+P,中心轻微 C 偏析,晶粒度 10.0 级
4	表层回火 S,厚 1.2~1.7 mm;过渡层 B+F+P,厚 1.3~1.4 mm;心部 F+P,中心轻微 C 偏析,晶粒度 10.0 级

表 4 HRB400 钢(试验 2)Φ14 mm 轧材金相组织检测结果
Table 4 Metallographic examination results of Φ14 mm rolled products of steel HRB400 produced by test No2

轧制号	金相检测结果
1	表层回火 S+F+T,厚 0~0.85 mm,心部 F+P,晶粒度 10.5 级(因回火慢导致产生回火 T)
2	表层回火 S,厚 0~0.7 mm;过渡层 F+P+B,厚 0.4~0.7 mm;心部 F+P,晶粒度 10.5 级,两处有大颗粒夹杂
3	表层回火 S,厚 0.1~0.85 mm,过渡层 B+F+P,厚 0.6~1.1 mm,心部 F+P,晶粒度 10.5 级,有一个大颗粒夹杂
4	表层回火 S,厚 0.1~0.85 mm,过渡层 F+B+P,厚 0~0.9 mm(局部为 0),大部分 0.7~0.9 mm,心部 F+P,晶粒度 10.5 级,有一个大颗粒夹杂及几个小颗粒夹杂

注:夹杂物以硅酸钙为主,低倍 25 倍即可见。

表 5 HRB400 钢成分和冷却工艺优化后(试验 3)和优化前屈服强度 R_{eL} 对比

Table 5 Comparison between yield strength R_{eL} of steel HRB400 after composition and cooling process optimization (test No3) and before optimization

项目	上冷床温度/℃	化学成分/%				R_{eL} /MPa
		C	Si	Mn	Ti	
试验钢(优化后)	670~710	0.224	0.335	0.998	0.007	485
对比钢(优化前)	690~730	0.223	0.430	1.373	0	435
比较平均值(增减)		0.001	-0.095	-0.375	0.007	50

操作。

4 优化成分和轧制工艺试验 3 结果及分析

在前两次试验的基础上完全按试验方案组织生产一个浇次的 HRB400 试验钢,本浇次共计生产 4 炉。钢筋上冷床温度的目标控制在 690℃,实际温度控制在 670~710℃。钢材轧制速度保持在正常的 12.8 m/s,试验结果如表 5 所示。

从表 5 可知,试验钢成分控制完全达到试验方案要求,钢中 Si 和 Mn 分别降低 0.095% 和 0.375%,钢中 Ti 平均控制在 0.007%。试验结果表明,钢材平均屈服强度达到 485 MPa,比同期同规格钢筋平均 435 MPa 提高了 50 MPa,达到目标要求。

5 结论

(1)当钢筋上冷床温度控制在 670~690℃,试验钢的屈服强度均达到 460 MPa 以上,满足实际要求。

(2)通过氮化钛微合金化,并将钢中 Mn 和 Si 分别调低 0.35% 和 0.10% 的情况下,钢材平均屈服强度也可以达到 460 MPa 的试验目标值。

(3)在同时采取微合金化和控轧控冷的手段时,钢材平均屈服强度达到 485 MPa,比同期同规格钢筋平均 435 MPa 提高了 50 MPa。

弹簧钢中大尺寸镁铝尖晶石夹杂形成机理及控制措施研究项目(G201603)资助

参考文献

- [1] Qin Bin. Anti-seismic behavior of HRB400 reinforced steel bars [J]. 重庆大学学报(英文版), 2005, 4(1):23-27.
- [2] 李贵阳,马立明,张志强,等. 20 MnSiNb HRB400 钢筋生产实践[J]. 钢铁, 2006, 41(5):53-56.
- [3] 姚娜,兴超. 60 t 转炉用含铬铁水冶炼 HRB400 钢的工艺实践[J]. 特殊钢, 2017, 38(3):41-43.
- [4] 雷三祥,彭其春,王友华. HRB400 螺纹钢冷弯断裂的原因分析[J]. 热加工工艺, 2017(7):246-248.
- [5] 王世超,郭旭峰. 高线 Φ6~Φ10 规格 HRB400E“去钒降锰”轧制工艺开发[J]. 河北冶金, 2017(9):167-168.
- [6] 柳洪义,徐峰,李哲,等. 钒氮微合金化在 HRB400E 钢筋生产中的应用及研究[J]. 河北冶金, 2017(2):15-19.
- [7] 杨才福,陈雪慧,王瑞珍. 高强度建筑钢筋质量分析及标准修改建议[J]. 钢铁, 2017, 52(10):94-103.

卓伟伟(1984-),男,硕士(2009年武汉科技大学),实验师,2006年武汉科技大学(本科)毕业,炼钢工艺研究。

收稿日期:2018-05-29