

热轧 $\Phi 36 \sim 40$ mm HRB500E 螺纹钢的生产实践

王琳松¹ 张新建¹ 常进¹ 龙雨¹ 陈黔湘² 高长益²

(1 水城钢铁集团公司,六盘水 553028;2 水城钢铁集团公司制造管理部,六盘水 553028)

摘要 根据 GB/T 1499.2-2018 标准,水钢设计了 $\Phi 36 \sim 40$ mm HRB500E 螺纹钢的内控成分为(%)0.22~0.25C、0.60~0.70Si、1.50~1.60Mn、0.11~0.13V、 $P \leq 0.045$ 、 $S \leq 0.045$ 。采用“100 t 顶底复吹转炉冶炼-挡渣出钢-脱氧合金化-LF 炉精炼-160 方坯连铸-方坯加热-棒材轧制-空冷”的工艺流程,生产出的 $\Phi 36$ mm HRB500E 螺纹钢的屈服强度 R_{eL}^0 540~580 MPa,抗拉强度 R_m^0 705~735 MPa,断后伸长率 A 15.5%~20.5%,最大力总延伸率 A_{gt} 11.5%~14.0%,实测抗拉强度与实测屈服强度之比 R_m^0/R_{eL}^0 为 1.25~1.32,实测屈服强度与 GB/T 1499.2-2018 标准要求的最低屈服强度之比 R_{eL}^0/R_{eL} 为 1.08~1.16,因此,钢筋的力学性能满足 GB/T 1499.2-2018 标准要求。生产出的 $\Phi 40$ mm HRB500E 钢筋的微观组织为铁素体+珠光体,晶粒度为 9.5~10 级。

关键词 HRB500E 高强度钢筋 大规格 钒微合金化

Productive Practice of Hot-Rolled $\Phi 36 \sim 40$ mm HRB500E Reinforcing Steel

Wang Linsong¹, Zhang Xinjian¹, Chang Jin¹, Long Yu¹, Chen Qianxiang² and Gao Changyi²
(1 Shuicheng Iron and Steel Group Corp, Liupanshui 553028; 2 Manufacture Management Department, Shuicheng Iron and Steel Group Corp, Liupanshui 553028)

Abstract According to GB/T 1499.2-2018 standard, the internal controlled composition of $\Phi 36 \sim 40$ mm HRB500E rebar is designed as (%) 0.22~0.25C, 0.60~0.70Si, 1.50~1.60Mn, 0.11~0.13V, $P \leq 0.045$, $S \leq 0.045$ in shuigang. The productive process such as steelmaking in 100t top and bottom combined blown converter-tapping with slag stopping-deoxidization and alloying-LF refining-continuous casting of 160 billet-reheating of billet-rolling of rebar-air cooling is used. The mechanical properties of $\Phi 36$ mm HRB500E rebar are as follows: yield strength R_{eL}^0 540~580 MPa, tensile strength R_m^0 705~735 MPa, percentage elongation after fracture A 15.5%~20.5%, total elongation at maximum force A_{gt} 11.5%~14.0%, the ratio of actual measured tensile strength to actual measured yield strength R_m^0/R_{eL}^0 is 1.25~1.32, the ration of actual measured yield to yield strength stipulated in GB/T 1499.2-2018 R_{eL}^0/R_{eL} is 1.08~1.16, therefore, mechanical properties of the bebar meet requirements of GB/T 1499.2-2018 standard. The microstructure of $\Phi 40$ mm HRB500E rebar produced is ferrite and pearlite, its grain size is 9.5~10 grade.

Material Index HRB500E, High Strength Rebar, Big Size, Vanadium Micro-Alloying

水城钢铁公司(水钢)是专门生产棒线材的钢铁企业,年产钢 380 万 t,其中 90% 是建筑用钢筋。对于 $\Phi 28 \sim 40$ mm 的大规格螺纹钢,由于钢筋的横截面大,从铸坯到钢筋的轧制压缩比小,从钢筋表面到中心的成分差异大,在轧制过程中和轧制后,从轧件表面到轧件中心的冷却速率差异大,从钢筋表面到中心的微观组织差异大,性能差异也大,从而造成钢筋的性能不合格,合格率降低^[1]。经过长期实践,摸索出了一套生产 $\Phi 36 \sim 40$ mm HRB500E 螺纹钢的冶炼和轧制工艺,能够规模化地生产大规格螺纹钢,性能合格率达到 100%。

1 HRB500E 螺纹钢的主要技术指标

根据 GB/T 1499.2-2018 标准^[2] 规定的 HRB500E 热轧带肋钢筋的化学成分,结合水钢的生

产工艺流程和大规格钢筋的性能要求,制定了企业内控成分,见表 1,采用钒微合金化强化^[3-7]。GB/T 1499.2-2018 标准规定的 HRB500E 热轧带肋钢筋的力学性能见表 2。

2 $\Phi 36 \sim 40$ mm HRB500E 螺纹钢的生产工艺

2.1 工艺流程

铁水+废钢-100 t 顶底复吹转炉冶炼-挡渣出钢-脱氧合金化-LF 精炼-连铸(方坯 160 mm × 160 mm,全保护浇注)-方坯加热-棒材轧制-冷却-剪切-入库。小于 $\Phi 28$ mm 的所有牌号的螺纹钢都不经过 LF 精炼工序, $\Phi 28 \sim 40$ mm 的 HRB400E 螺纹钢也不经过 LF 精炼工序,但是 $\Phi 28 \sim 40$ mm 的 HRB500E 钢要经过 LF 精炼工序,

表1 Φ36~40 mm HRB500E 热轧带肋钢筋的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of hot rolled Φ36~40 mm HRB500E reinforcing steel / %

| 项目 | C | Si | Mn | P | S | V | Ceq ⁽¹⁾ |
|------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|--------|--------|-----------|--------------------|
| GB/T 1499.2-2018 | ≤0.25 | ≤0.80 | ≤1.60 | ≤0.045 | ≤0.045 | - | ≤0.55 |
| 水钢内控标准 | 0.22~0.25 | 0.60~0.70 | Mn+Cr ⁽²⁾ 1.50~1.60 | ≤0.045 | ≤0.045 | 0.11~0.13 | - |
| 目标 | 0.23 | 0.65 | 1.55 | 0.045 | ≤0.045 | 0.12 | - |

注:(1) Ceq-碳当量,其计算公式为 $Ceq = C + Mn/6 + (Cr + V + Mo)/5 + (Cu + Ni)/15$ 。

(2) 水钢在生产普通建筑钢的过程中,把钢中 Cr、Mn 两元素对钢的强化作用等同视之,钢中残余 Cr 可替代等量的 Mn。

表2 Φ36~40 mm HRB500E 热轧带肋钢筋的力学性能

Table 2 Mechanical properties of hot rolled Φ36~40 mm HRB500E reinforcing steel

| 标准号 | 下屈服强度 R_{eL}/MPa | 抗拉强度 R_m/MPa | 断后伸长率 $A/\%$ | 最大力总延伸率 $A_{gt}/\%$ | R_m^0/R_{eL}^0 | R_{eL}^0/R_{eL} |
|------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|------------------------|------------------|-------------------|
| GB/T 1499.2-2018 | ≥500 | ≥630 | - | ≥9.0 | ≥1.25 | ≤1.30 |

注: R_m^0 -为钢筋实测抗拉强度; R_{eL}^0 -为钢筋实测下屈服强度。

主要目的是精确调整钢水 C 成分,使不同炉次的钢水 C 成分波动小,并且使 C 成分尽可能高,而又不超出标准规定的 C 上限值。碳含量每增加 0.1%,屈服强度和抗拉强度可分别提高 28 MPa 和 70 MPa^[8]。LF 精炼周期为 25~30 min。不经过 LF 精炼工序的钢水,每炉钢的钢水量按 92~93 t 控制,要经过 LF 精炼工序的钢水,每炉钢的钢水量按 87~88 t 控制,保证精炼时有一定的钢包净空。用增碳剂调整钢水碳含量,每包增碳剂的量为 5 kg,在转炉出钢脱氧过程中,每 2.5 包增碳剂使 1 炉钢的钢水增碳 0.01%,在精炼过程中,每 2 包增碳剂使 1 炉钢的钢水增碳 0.01%。在水钢,不经过 LF 精炼工序的钢水的钢包全程加盖,可使出钢温度降低 15~25℃,平均降低 20℃,而经过 LF 精炼的钢水的钢包还没有实现加盖。本文所述的钢包是没有加盖的。

2.2 炼钢工艺

2.2.1 转炉冶炼

(1) 原材料要求

① 铁水成分(%): $[Si] = 0.20 \sim 0.80$, $[Mn] = 0.30 \sim 0.80$, $[P] \leq 0.120$, $[S] \leq 0.040$; 铁水温度 $\geq 1250^\circ C$ 。水钢 100 t 转炉冶炼 11 炉 Φ36~40 mm HRB500E 螺纹钢,采用的铁水成分见表 3。

② 石灰成分(%): $CaO > 90$, $SiO_2 \leq 1.5$, $S < 0.15$; 石灰活性度 > 310 mL。

(2) 装入制度:钢铁料总装入量 (100 ± 2) t (其中废钢加入量为:废钢量 ± 1 t),铁水与废钢比根据

热量情况调整。实际上,水钢 100 t 转炉冶炼 11 炉 Φ36~40 mm HRB500E 螺纹钢,装入量及冶炼过程渣料的加入量见表 4。

(3) 冶炼条件

① 顶吹氧气的工作氧压 0.75~0.95 MPa,氧气纯度 $\geq 99.5\%$,总管氧压 ≥ 1.3 MPa。

② 开新炉前 30 炉、补炉第 1 炉、烟罩漏水成线、氧枪漏水及有严重影响钢水质量的情况不冶炼此钢种。

③ 转炉应具备合适的炉型和完好的炉况,出钢时间 ≥ 3.5 min。若出钢口状况不好,例如,

出钢口大了,则出钢时间就短。

(4) 冶炼操作

① 转炉第一次倒炉,控制钢水 $[C] = 0.15\% \sim 0.25\%$, $[P] \leq 0.030\%$,钢水温度 = 1 620~1 640℃,控制补吹时间 ≥ 15 s (这是为了提高钢水的氧化性,并且使钢水搅拌均匀,以保证钢水的脱磷效果)。水钢 100 t 转炉冶炼 11 炉 Φ36~40 mm HRB500E 螺纹钢,第一次倒炉时的钢水 $[C]$ 、 $[P]$ 、 $[S]$ 及温度见表 5。

② 出钢前,取转炉钢水样进行 $[C]$ 、 $[P]$ 、 $[S]$ 分析,控制出钢 $[C] = 0.07\% \sim 0.12\%$, $[P] \leq$

表3 HRB500E 钢使用的铁水成分及温度,11 炉

Table 3 Composition and temperature of hot metal used for steelmaking of steel HRB500E, 11 heats

| 数值特征 | 成分/% | | | | | | | 入炉铁水温度/℃ |
|------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|--------------|-----------|
| | C | Si | Mn | P | S | Ti | Cr | |
| 范围 | 4.65~5.58 | 0.26~0.75 | 0.33~0.45 | 0.130~0.160 | 0.031~0.049 | 0.120~0.390 | -0.049~0.077 | 1257~1374 |
| 均值 | 5.12 | 0.42 | 0.36 | 0.135 | 0.040 | 0.200 | 0.057 | 1320 |

表4 HRB500E 钢的金属料装入量及冶炼过程渣料加入量,11 炉

Table 4 Amount of charging metal and slagging material in basic oxygen furnace for steelmaking of steel HRB500E, 11 heats

| 数值特征 | 金属料加入量 | | 冶炼过程渣料加入量 | | | | |
|------|-----------|-------------|-----------|-----------|----------|---------|----------|
| | 铁水/t | 废钢/t | 石灰/kg | 轻烧白云石/kg | 污泥/kg | 生白云石/kg | 化渣剂*/kg |
| 范围 | 80.2~87.3 | 14.30~16.23 | 986~3304 | 1492~2613 | 195~4197 | 791~791 | 333~2217 |
| 均值 | 83.6 | 14.97 | 1874 | 2110 | 1370 | 791 | 1437 |

注:化渣剂的成分为 $MnO \geq 13\%$ 、 $Fe_2O_3 \geq 20\%$ 、 $SiO_2 \leq 20\%$ 、 $P \leq 0.20\%$ 、 $S \leq 0.20\%$ 、水分 $\leq 3\%$ 。

0.020% , [S] ≤ 0.040% 。水钢 100 t 转炉冶炼 11 炉 Φ36 ~ 40 mm HRB500E 螺纹钢时, 出钢前的钢水 [C]、[P]、[S] 及温度见表 6。

③ 脱氧合金化制度

采用硅锰铁配锰, 不足硅用硅铁补齐, 用钒氮、钒铁配钒 (注: 用钒氮配钒, 使钢水含 V 达到 0.05% , 其余部分的钒用钒铁配加; 根据水钢经验, 若全用钒氮配钒, 则钢筋的强屈比较低, 达不到抗震钢的要求, 所以要采用两种合金配钒。水钢使用的钒氮铁合金 (VNFe) 含钒为 80% , 使用的钒铁合金 (VFe) 含钒为 50% , 钢水加入两种合金, 其钒的收得率都按 90% ~ 95% 计算), 使用硅钙钡进行终脱氧, 硅钙钡的加入量根据钢水氧化性控制在 40 ~ 80 kg/炉, 若钢水 [C] 低、氧化性强, 则硅钙钡按上限量加

表 5 HRB500E 钢第一次倒炉时钢水的 [C]、[P]、[S] 及温度, 11 炉

Table 5 [C]、[P]、[S] and temperature of molten steel at first truning down of converter for steelmaking of steel HRB500E, 11 heats

| 数值特征 | 钢水成分/% | | | 钢水温度/℃ |
|------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| | C | P | S | |
| 范围 | 0.09 ~ 0.32 | 0.020 ~ 0.033 | 0.020 ~ 0.028 | 1 618 ~ 1 683 |
| 均值 | 0.17 | 0.025 | 0.025 | 1 644 |

表 6 HRB500E 钢出钢前钢水的 [C]、[P]、[S] 及温度, 11 炉

Table 6 [C]、[P]、[S] and temperature of molten steel before tapping for steelmaking of steel HRB500E, 11 heats

| 数值特征 | 钢水成分/% | | | 钢水温度/℃ |
|------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| | C | P | S | |
| 范围 | 0.05 ~ 0.12 | 0.019 ~ 0.025 | 0.020 ~ 0.029 | 1 652 ~ 1 678 |
| 均值 | 0.08 | 0.021 | 0.024 | 1 662 |

表 7 11 炉 HRB500E 转炉出钢脱氧合金化时加入的各种合金量, kg/炉

Table 7 Quantity of various alloys added to ladle during tapping for steelmaking of 11 heats of HRB500E, kg/heat

| 数值特征 | 硅锰铁 | 硅铁 | 钒氮 | 钒铁 | 钢芯铝 | 增碳剂 |
|------|-------------|-----------|---------|-----------|-------|---------|
| 范围 | 1950 ~ 2068 | 340 ~ 347 | 60 ~ 60 | 120 ~ 130 | 3 ~ 3 | 40 ~ 85 |
| 均值 | 2017 | 341 | 60 | 127 | 3 | 59 |

表 8 转炉出钢脱氧合金化后的要求的钢水成分和实际钢水成分, 11 炉/%

Table 8 Required and actual composition of molten steel after deoxidization and alloying at topping, 11 heats/%

| 项目 | C | Si | Mn | P | S | V |
|----|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------|
| 标准 | 0.18 ~ 0.22 | 0.50 ~ 0.65 | 1.40 ~ 1.50 | ≤ 0.045 | ≤ 0.045 | 0.11 ~ 0.13 |
| 目标 | 0.20 | 0.60 | 1.45 | ≤ 0.045 | ≤ 0.045 | 0.12 |
| 范围 | 0.17 ~ 0.21 | 0.55 ~ 0.61 | 1.35 ~ 1.46 | 0.022 ~ 0.040 | 0.024 ~ 0.032 | 0.11 ~ 0.12 |
| 均值 | 0.19 | 0.58 | 1.41 | 0.029 | 0.027 | 0.12 |

入。11 炉 Φ36 ~ 40 mm HRB500E 螺纹钢, 转炉出钢脱氧合金化时加入的合金种类及数量见表 7。

④ 转炉出钢脱氧合金化后要求的钢水成分和实际 11 炉钢脱氧合金化后的钢水成分见表 8。

⑤ 出钢过程采用双挡渣操作, 即在上一炉出完钢后, 用挡渣塞从炉后堵好出钢口, 防止下一炉倒炉出钢时涌渣; 在本炉出钢至 4/5 时, 在炉后加入挡渣锥或挡渣球挡渣, 出钢过程中专人指挥摇炉与压渣, 严禁出钢口下渣, 控制钢包渣层厚度 ≤ 50 mm。

⑥ 转炉出钢后测温, 不加覆盖剂, 直接将钢包吊至精炼炉对钢水进行精炼处理, 以精炼炉第 1 个钢样的成分作为精炼炉调整钢水成分的依据。

⑦ 实际 11 炉钢精炼结束软吹 Ar 后, 钢水的温度: 连铸第一包钢水 1 580 ~ 1 600 ℃, 连浇炉次钢水 1 560 ~ 1 580 ℃。

2.2.2 LF 精炼

(1) LF 精炼工艺流程: 钢水进站 → 测温 → 进加热位 → 第一次精炼 → 测温、取样 → 第二次精炼 → 成分调整 → 出加热位 → 喂 CaSi 丝 → 软吹 Ar → 连铸。

(2) 钢水进入 LF 加热位后, 加入第一批渣料, 即活性石灰 300 kg, 铝矾土 100 kg, 萤石 100 ~ 200 kg (根据化渣情况加入萤石)。采用电压档位 10 档、电流 10198A 下电极化渣, 待第一批渣料熔化后加入第二批渣料, 即精炼渣 50 kg, 活性石灰 200 kg, 采用电石、SiFe 粉 (≤ 30 kg) 造白渣, 炉渣碱度按 2.5 ~ 3.0 控制。在供电 10 min 内形成液态白渣, 6 ~ 8 min 后提升电极取钢样送检验。精炼过程中调节钢包底吹氩气流量, 防止精炼大翻溢渣, 并调节除尘风机风量保证微正压操作。

(3) 精炼结束后喂入硅钙丝: 连铸第一炉喂 150 m, 连浇炉次 120 m/炉, 软吹氩时间大于 8 min, 软吹氩时控制渣面微微涌动不裸露钢水。通常软吹 Ar 后的钢水温度按 1 570 ~ 1 590 ℃ 控制。

(4) 钢水吊包前加入覆盖剂 16 包, 避免将覆盖剂加入裸露钢液面。

(5) 出精炼站钢水目标成分控制见表 9。

(6) 精炼炉出站温度 (软吹 Ar 结束的钢水温

表 9 出精炼站 HRB500E 钢水目标成分/%

Table 9 Desirable composition of molten steel HRB500E out from LF refining station/%

| 规格 Φ/mm | 项目 | C | Si | Mn | P | S | V |
|---------|----|-------------|-------------|-------------|---------|---------|-------------|
| 36 ~ 40 | 标准 | 0.22 ~ 0.25 | 0.60 ~ 0.70 | 1.50 ~ 1.60 | ≤ 0.045 | ≤ 0.045 | 0.11 ~ 0.13 |
| | 目标 | 0.23 | 0.65 | 1.55 | ≤ 0.045 | ≤ 0.045 | 0.12 |

度)控制设定:第一包钢水 $1\ 600 \sim 1\ 610$ $^{\circ}\text{C}$;连浇炉次钢水 $1\ 565 \sim 1\ 575$ $^{\circ}\text{C}$ 。

(7)钢水进 LF 精炼站强吹 Ar 4 min 后取钢水双样送检验,标注为“炉号+精炼 1”。

(8)在连铸正常浇注情况下,控制 LF 精炼周期 ≤ 30 min/炉。

2.2.3 连铸

(1)采用普通钢保护渣,全保护浇注,中间包为普通中间包,铸坯断面为 $160\ \text{mm} \times 160\ \text{mm}$,铸坯定尺长度为 12 m。

(2)中间包钢水温度及拉速控制

①连铸第一包中间包钢水 $1\ 530 \sim 1\ 545$ $^{\circ}\text{C}$,连浇炉次中间包钢水 $1\ 520 \sim 1\ 535$ $^{\circ}\text{C}$ 。实际 11 炉 HRB500E 钢在 LF 精炼结束软吹 Ar 后钢包钢水到中间包钢水的温降为 $32 \sim 54$ $^{\circ}\text{C}$,平均温降为 41 $^{\circ}\text{C}$ 。

②连铸时的铸坯拉速控制: (2.5 ± 0.2) m/min。实际 11 炉 HRB500E 钢的铸坯拉速为 $1.7 \sim 2.3$ m/min,平均为 2.0 m/min。

(3)钢包和中间包的钢水套管完好,中间包和结晶器的钢水不裸露,覆盖剂和保护渣不发红。

(4)连铸一个浇次为一组钢,每组钢每一流取 1 块铸坯样作低倍检验,共 6 流,所以每组钢有 6 块低倍样,低倍样随机地取自不同的炉次。

(5)铸坯冷却实行自然冷却,严禁打水强冷。

2.2.4 铸坯低倍检验的质量目标

中心疏松 ≤ 1.0 级,缩孔 ≤ 1.0 级,非金属夹杂物 ≤ 0.5 级,中心裂纹 ≤ 0.5 级,中间裂纹 ≤ 0.5 级,所有检验结果之和不超过 3.0 级。

2.3 轧钢工艺

水钢共有三条棒材轧制线,因为一棒材轧制线的钢筋剪切是用孔型剪剪切,可以使剪切后的钢筋端头不变形(即呈圆形),所以 $\Phi 28 \sim 40$ mm 的大规格钢筋都在一棒轧制线轧制。

2.3.1 钢坯入口及组批要求

(1)单独堆垛或分层堆垛。分层堆垛时,炉罐号之间要有明显标识。

(2)按炉组批,组批入炉时,批与批之间隔 3 个步进梁空档。

2.3.2 加热及轧制控制要求

(1)铸坯用汽车运输到加热炉,然后用磁性吊卸车装炉。铸坯最高入炉温度为 400 $^{\circ}\text{C}$,因为铸坯温度高了没有磁性,无法用磁性吊装卸。整个加热炉可容纳 80 支钢坯(即两个冶炼炉号的钢坯,每个炉号有 40 支钢坯),钢坯在炉内的时间为 1 h。

(2)钢坯开轧温度按 $1\ 030 \sim 1\ 060$ $^{\circ}\text{C}$ 控制。

(3)轧制道次:用 $160\ \text{mm} \times 160\ \text{mm}$ 方铸坯轧制 $\Phi 36$ mm 钢筋时,粗轧 5 道,中轧 2 道,精轧 4 道,共 11 道;轧 $\Phi 40$ mm 钢筋时,粗轧 5 道,中轧 2 道,精轧 2 道,共 9 道。

(4)轧制速度(轧件出最后一道轧机的速度):

$\Phi 36$ mm 钢筋按 6.5 m/s 控制, $\Phi 40$ mm 钢筋按 5.7 m/s 控制。

(5)基圆直径控制: $\Phi 36$ mm 钢筋按 (34.8 ± 0.2) mm 控制, $\Phi 40$ mm 钢筋按 (38.7 ± 0.2) mm 控制。

(6)轧后冷却:轧后空冷,不用穿水冷却,上冷床温度 $> 1\ 000$ $^{\circ}\text{C}$,钢筋的剪切温度为 400 $^{\circ}\text{C}$ 。

3 $\Phi 36 \sim 40$ mm HRB500E 螺纹钢的微观组织及力学性能

3.1 微观组织

$\Phi 40$ mm HRB500E 钢筋的微观夹杂物评级见表 10。从表 10 中可见,钢筋中有少量硅酸盐类和球状氧化物类夹杂,无其它夹杂物,说明钢质较洁净。 $\Phi 40$ mm HRB500E 钢筋的金相微观组织为铁素体+珠光体,珠光体约占 53%,晶粒度为 9.5~10 级,见图 1。

3.2 拉伸性能

统计了 7 炉 $\Phi 36$ mm HRB500E 钢的成分和性能见表 11。将表 11 中的数值与表 1 和表 2 中的数

表 10 $\Phi 40$ mm HRB500E 钢筋的夹杂物评级/级
Table 10 Rating of inclusion in $\Phi 40$ mm rebar of steel HRB500E/rating

| 试样号 | 硅酸盐类 | | 硫化物类 | | 球状氧化物类 | | 氧化铝类 | | 单颗粒球状类 |
|-----|------|-----|------|----|--------|-----|------|----|--------|
| | 粗系 | 细系 | 粗系 | 细系 | 粗系 | 细系 | 粗系 | 细系 | |
| 1 | 2.5 | 2.0 | - | - | 1.5 | 1.5 | - | - | - |
| 2 | 3.0 | 2.5 | - | - | 1.0 | 1.0 | - | - | - |
| 3 | 2.5 | 3.0 | - | - | 1.5 | 1.5 | - | - | - |

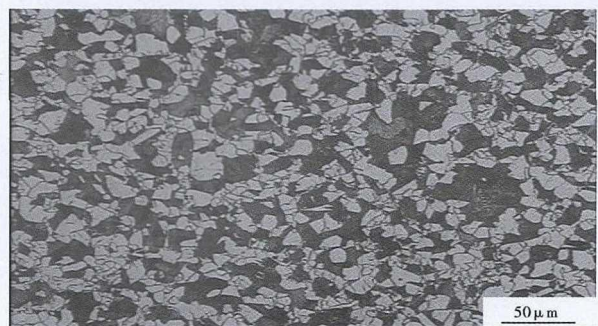


图 1 $\Phi 40$ mm HRB500E 钢筋的微观组织,铁素体+珠光体,晶粒度 9.5~10 级

Fig. 1 Microstructure of $\Phi 40$ mm rebar of steel HRB500E, ferrite + pearlite, grain size rating 9.5~10

表 11 $\Phi 36$ mm HRB500E 钢筋的成分和性能, 7 炉
 Table 11 Composition and properties of $\Phi 36$ mm rebar of steel HRB500E , 7 heats

| 数值特征 | 化学成分/% | | | | | | | 力学性能 | | | | | |
|------|--------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------------|-----------|--------|-------------|------------------|-------------------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | V | R_{eL}/MPa | R_m/MPa | $A/\%$ | $A_{gt}/\%$ | R_m^0/R_{eL}^0 | R_{eL}^0/R_{eL} |
| 最小值 | 0.22 | 0.59 | 1.48 | 0.021 | 0.005 | 0.033 | 0.109 | 540 | 705 | 15.5 | 11.5 | 1.25 | 1.08 |
| 最大值 | 0.24 | 0.64 | 1.60 | 0.037 | 0.015 | 0.056 | 0.122 | 580 | 735 | 20.5 | 14.0 | 1.32 | 1.16 |
| 平均值 | 0.23 | 0.61 | 1.55 | 0.028 | 0.010 | 0.044 | 0.117 | 557 | 716 | 17.5 | 12.6 | 1.29 | 1.11 |

值比较可知, 7 炉钢(7 批)的成分和性能满足 GB/T 1499.2-2018 标准要求。

水钢生产的 $\Phi 36 \sim 40$ mm HRB500E 螺纹钢的实测抗拉强度与实测屈服强度之比(即强屈比),其水钢内控要求大于 1.27, GB/T1499.2-2018 国家标准要求大于 1.25。在水钢, 一般来说, $\Phi 36 \sim 40$ mm HRB500E 在轧制后经过 7 天释放应力的自然时效后, 钢筋的屈服强度下降 10 ~ 20 MPa^[9], 7 天自然时效后钢筋的强屈比为 1.27 ~ 1.30, 满足抗震钢筋的性能要求。

4 结论

根据 GB/T1499.2-2018 标准, 水钢设计了 $\Phi 36 \sim 40$ mm HRB500E 螺纹钢的内控成分(%): 0.22 ~ 0.25 C、0.60 ~ 0.70 Si、1.50 ~ 1.60 Mn、

0.11 ~ 0.13 V、 $P \leq 0.045$ 、 $S \leq 0.045$ 。采用“100 t 顶底复吹转炉冶炼 - 挡渣出钢 - 脱氧合金化 - LF 精炼 - 160mm × 160mm 方坯连铸 - 方坯加热 - 棒材轧制 - 空冷”的工艺流程, 生产 $\Phi 36$ mm HRB500E 螺纹钢的力学性能为屈服强度 $R_{eL} = 540 \sim 580$ MPa, 抗拉强度 $R_m = 705 \sim 735$ MPa, 断后伸长率 $A = 15.5\% \sim 20.5\%$, 最大力总延伸率 $A_{gt} = 11.5\% \sim 14.0\%$, 实测抗拉强度与实测屈服强度之比(简称为强屈比) $R_m^0/R_{eL}^0 = 1.25 \sim 1.32$, 实测屈服强度与 GB/T 1499.2-2018 标准要求的最低屈服强度之比(简称为屈屈比) $R_{eL}^0/R_{eL} = 1.08 \sim 1.16$, 因此, 钢筋的力学性能满足 GB/T 1499.2-2018 标准要求。 $\Phi 40$ mm HRB500E 钢筋的微观组织为铁素体 + 珠光体, 晶粒度 9.5 ~ 10 级。

参考文献

- [1] 范银平, 李 璟, 杨陈莉. HRB500E 抗震钢筋生产工艺及性能优化[J]. 河南冶金, 2017, 25(1): 32-34.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 1499.2-2018, 钢筋混凝土用钢 第 2 部分: 热轧带肋钢筋[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [3] 郭 湛, 于同仁, 陈开智, 等. 高效节约型 HRB500E 高强抗震钢筋的研制[J]. 轧钢, 2013, 30(增刊 1): 1-4.
- [4] 郑雅文, 白天平. 宣钢大规格高强度螺纹钢的开发与生产[J]. 河北冶金, 2015, (8): 21-23.
- [5] 孔维斌, 黄贞益. BS G460 大规格微合金化钢筋的开发[J]. 安徽工业大学学报, 2001, 18(4): 319-322.
- [6] 王洪锋, 王耀山. 钒氮微合金技术在 HRB500E 开发中的应用[J]. 甘肃冶金, 2014, 36(2): 32-35.
- [7] 陈 伟, 赵 宇, 张卫强, 等. 采用富氮钒微合金化生产大规格 HRB500 钢筋[J]. 钢铁研究, 2011, 39(1): 23-27.
- [8] 马 文, 朱宝晶, 陈文达, 等. HRB400E、HRB500E 大规格抗震钢筋的研发[J]. 莱钢科技, 2011(4): 55-58.
- [9] 王绍荣. $\Phi 50$ mm 大规格 HRB500E 抗震钢筋的试制[J]. 轧钢, 2011, 28(2): 67-70.

王琳松(1959-), 男, 硕士(2009 年武汉科技大学), 工程技术应用研究员, 1982 年江西冶金学院(本科)毕业, 钢铁冶金工艺研究. E-mail: sgvongls@gmail.com

收稿日期: 2018-07-19

欢迎订阅《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号: 38-183 定价: 16.00 元/期 96.00 元/年 邮编: 435001

地址: 湖北省黄石大道 316 号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社