

低成本HRB400钢筋微合金化轧制技术

徐龙,王德志

(山东钢铁集团有限公司,山东 济南 250101)

摘要:山钢股份莱芜分公司棒材厂根据不同规格钢筋及生产线装备特点,采用微合金化结合控轧控冷技术,探索出了4条生产线不同规格钢筋轧制方法,形成普通热轧、轧后弱冷、轧后强冷等不同工艺模型,满足了不同用户需求,实现了棒材产品低成本、高效化生产。

关键词:带肋钢筋;HRB400钢筋;微合金化;控轧控冷;工艺模型

中图分类号: TG335.64

文献标识码: B

文章编号: 1004-4620(2016)04-0023-03

1 前言

目前,钢筋主要采用普通热轧工艺进行生产,对于400 MPa以上级别的钢筋采用微合金化工艺,这种工艺对微合金元素大量使用,推升了企业的生产成本。控轧控冷工艺通过调整奥氏体状态得到细化的微观组织,从而提高钢材的综合力学性能,此工艺和微合金化相结合可以得到良好的产品性能和可观的经济效益。山钢股份莱芜分公司棒材厂在四条钢筋生产线推进了低成本HRB400钢筋微合金化轧制关键技术的研究,并成功应用在 $\Phi 10 \sim \Phi 32$ mm热轧带肋钢筋上,降低了生产成本。

2 HRB400带肋钢筋强化机理

对20MnSi钢筋而言,其主要合金元素C、Si、Mn都是固溶元素,当钢筋的成分一定时,其性能由钢的晶粒大小、珠光体比例和珠光体片层间距来决定,提高钢筋强度的主要手段还是细化晶粒^[1]。要想进一步提高钢筋的性能,即在炼钢过程中加入微量Nb、V、Ti元素。通过强碳化物元素的加入,达到细晶强化和沉淀强化的目的,进而提高钢筋的综合机械性能;添加微量的V元素可获得成百兆帕的强度增量,当钢中碳和氮含量较高时,以钒微合金化更有效,生产工艺最稳定^[2]。所以,在无特殊性能要求、生产含钒钢是最佳选择。同时微合金碳、氮化合物的析出还具有晶粒细化的作用。

温度控制主要影响轧制前原始奥氏体晶粒的大小,各道次的轧制温度及终轧温度影响道次之间及终轧后的奥氏体再结晶程度及再结晶后的晶粒大小。根据钢在加热过程中的组织变化,碳钢最合适的温度范围是单相奥氏体区内,其中亚共析钢的

加热温度范围是在铁碳相图中 A_{c3} 以上 $30 \sim 50$ °C与固相线以下 $100 \sim 150$ °C,一般在 $1\ 000 \sim 1\ 350$ °C。考虑到降低变形抗力及20MnSi钢筋属于亚共析钢,因此加热温度控制在 $1\ 150$ °C,原始奥氏体晶粒比较细小,且再结晶较为充分,晶粒大小均匀,晶粒尺寸比较细小。奥氏体细化使得相变后的铁素体组织也较为细小,获得的钢材力学性能好^[3]。

3 HRB400钢筋微合金化控冷工艺

与常规热轧相比,经轧后冷却的产品,室温组织将从多边形铁素体(F)+珠光体(P)过渡为贝氏体(B)+多边形铁素体(F)+珠光体(P)为主的组织,从而显示出优良的力学性能^[4]。合理的控轧控冷工艺可以在降低钢中微合金元素含量或含碳量的情况下,在强化的同时又能保持较高的低温韧性。在加速冷却过程中起主要作用的是相变强化以及加强铁素体晶粒细化和加强碳、氮化物析出强化效果。通过轧后的加速冷却,可以使未相变的奥氏体晶粒发生相变生成微细的多边形铁素体晶粒,使铁素体晶粒更加细密,且内部还可能包含亚晶粒,这种包含亚晶粒的混合组织可以使强度增加。

考虑到热轧工艺钒氮合金加入量仍然偏高,在进行成分优化基础上,着手进行控轧控冷工艺试验。工艺设计思路来自400 MPa钢筋控轧控冷的研究以及棒材成功实施的低温控轧工艺经验。初步设计为:成分采用335 MPa成分设计或添加微量钒氮合金,考虑850 °C低温控轧制负荷过高,不能进行连续生产,取消中轧后冷却段,代替以降低开轧温度 100 °C以上+匹配轧后穿水冷却强度调整上冷床温度,找出满足生产线连续生产的“成分-开轧温度-冷却强度-上冷床温度-性能”对应关系。

3.1 工艺试验

试验1:在一轧车间采用HRB335b钢坯进行 $\Phi 18$ mm规格轧制试验,化学成分未作调整,采用热轧

收稿日期:2016-07-11

作者简介:徐龙,男,1981年生,2006年毕业于济南大学机械工程及自动化专业。现为山钢集团企业管理部工程师,从事科技、质量管理工

工艺,中间不穿水,成品速度设定为13.5 m/s(常规速度),开轧温度控制在 $(1\ 000 \pm 20)^\circ\text{C}$ 。先热轧5支钢坯,进行料型、堆拉钢关系调整,第6支开始进行穿水试验。首先将压力和流量调至最大,水压0.48 MPa,流量200 m³/h,上冷床温度为720~750 $^\circ\text{C}$;然后将第二组水量至83 m³/h,上冷床温度为750~770 $^\circ\text{C}$ 。在此参数下取样,平均屈服强度比热轧提高32 MPa,抗拉强度为589 MPa,C含量0.21%,Mn含量1.38%,V含量0.003%。

试验2:在二轧车间采用HRB400s钢坯进行 $\Phi 16$ mm规格轧制试验,中轧后不穿水,成品速度设定为13.0 m/s(常规速度),开轧温度控制在 $(1\ 000 \pm 20)^\circ\text{C}$,轧后穿水水压2.3 MPa,流量220 m³/h,上冷床温度为710~750 $^\circ\text{C}$ 。试验结果见表1。

表1 二轧 $\Phi 16$ mm控冷工艺试验结果

| 开轧温度/ $^\circ\text{C}$ | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | C/% | Mn/% | V/% |
|------------------------|----------|----------|------|------|-------|
| 1 020 | 451 | 592 | 0.23 | 1.36 | 0.012 |
| 1 020 | 431 | 562 | 0.21 | 1.38 | 0.025 |
| 1 010 | 448 | 592 | 0.23 | 1.40 | 0.012 |
| 1 010 | 441 | 582 | 0.24 | 1.37 | 0.012 |

试验3:在一轧车间进行 $\Phi 22$ mm规格试验,此次试验采用对照组方式,即采用990 $^\circ\text{C}$ 相同开轧温度,在不同冷却条件下轧制普通HRB335(不加V)和HRB335S(加0.008%~0.012% V)钢坯。试验结果见表2。

表2 一轧 $\Phi 22$ mm控冷对照工艺试验结果

| 上冷床温度/ $^\circ\text{C}$ | 屈服强度/MPa | | 抗拉强度/MPa | |
|-------------------------|----------|-----------|----------|-----------|
| | 不加V | 加0.011% V | 不加V | 加0.011% V |
| 700 | 467 | 483 | 597 | 606 |
| 750 | 412 | 441 | 560 | 581 |
| 800 | 416 | 436 | 564 | 582 |

在3种不同冷却条件下,含V0.011%的钢筋和对照组钢筋的强度均得到提高。在上冷床温度为750 $^\circ\text{C}$ 时,对照组平均屈服为412 MPa,抗拉强度为560 MPa,与前一次试验的 $\Phi 18$ mm规格接近。含V0.011%的屈服强度达到441 MPa,抗拉强度达到581 MPa,分别比对照组提高29 MPa和21 MPa,即在上冷床温度为750 $^\circ\text{C}$ 时,0.011%的V对强度的贡献为25 MPa左右。所以在普通HRB335的基础上加入V合金,V含量在0.008%~0.012%可以达到生产HRB400热轧钢筋的性能要求。

3.2 控冷工艺与金相组织

在实施控冷工艺时,基圆表层随冷却强度的降低,过冷奥氏体相应的转变为马氏体、贝氏体、珠光体。GB 1499.2—2007规定,热轧钢筋不得有影响使用性能的其他组织(如基圆上出现的回火马氏体组织)存在。因此,需要精确控制轧件经过冷却器后

热交换强度,不但不出现标准不允许的组织,而且还要尽可能使得轧后细小的奥氏体组织转变后的珠光体组织得到细化,以提高强度。

由图1可以看出,HRB400S $\Phi 12$ mm控冷钢筋在相同开轧条件下,在670 $^\circ\text{C}$ 和730 $^\circ\text{C}$ 两种不同上冷床温度下,除了心部均为铁素体+珠光体外,其余部位金相组织差异较大。上冷床670 $^\circ\text{C}$ 时钢筋基圆、横肋、纵肋过冷奥氏体来不及分解,转变为贝氏体+珠光体+少量铁素体,而上冷床730 $^\circ\text{C}$ 时钢筋基圆、横肋、纵肋未出现贝氏体而是变异珠光体类组织,而且由于转变时间较短,轧制形成的条带状组织被保留了下来,铁素体来不及长大成多边形。

根据3条生产线生产实际,将热轧工艺及超快冷工艺1100 $^\circ\text{C}$ 开轧温度下调至1000 $^\circ\text{C}$,即能保证全线各个机架轧制负荷,又能将轧件进冷却器温度下降至950 $^\circ\text{C}$,避免后续穿水强度过大影响钢筋表皮组织控制。相应的上冷床温度控制在750 $^\circ\text{C}$,可以获得不出现切变组织的状态,此时,穿水冷却充分利用了奥氏体轧制变形后的细晶强化作用。

3.3 两种控冷工艺模型确定

模型1,低温控轧+轧后强冷工艺。采用HRB400S牌号钢坯(V0.01%)进行轧后控冷,借鉴超快冷工艺思想,控制轧件上冷床温度不低于750 $^\circ\text{C}$,根据现场装备情况此工艺应用于HRB400 $\Phi 18$ ~ $\Phi 28$ 5种规格。为实现此工艺,在成品轧机出口设置快速冷却器,控制轧件在较短时间内快速降温至目标温度,从而控制轧后组织相变过程,在不影响连轧作业率和小时产量的前提下,提高产品性能。对于中小型生产线的较大规格钢筋,为了保证足够的冷却能力,采用分段式的冷却方式。调整控制轧制工艺参数得到尽可能细小的室温组织是控制轧制工艺的最主要目的。终轧温度降低,低温变形效果较明显,促进了碳、氮化合物形变诱导析出,改变相变前奥氏体组织状态,在奥氏体中形成更多的变形带,增加了铁素体晶粒的形核部位及形核速度,从而达到细化晶粒的效果,对于强度、韧性都是有利的。

模型2,低温控轧+轧后弱冷工艺。切分规格采用轧后强冷工艺易造成通条弯曲,所以将低温控轧和轧后冷却工艺结合,采用适度降低开轧温度($\leq 1\ 030^\circ\text{C}$)+轧后弱冷工艺,钢坯牌号采用HRB400K。此工艺因轧后冷却强度低,表面颜色与热轧状态相同,钢筋氧化层不被破坏,可避免钢筋快速生锈问题,同时配置系列专用冷却器,根据内径磨损情况及时调整、更换,杜绝波浪弯曲。 $\Phi 12$ mm、 $\Phi 14$ mm、 $\Phi 16$ mm 3种规格采用这种工艺。

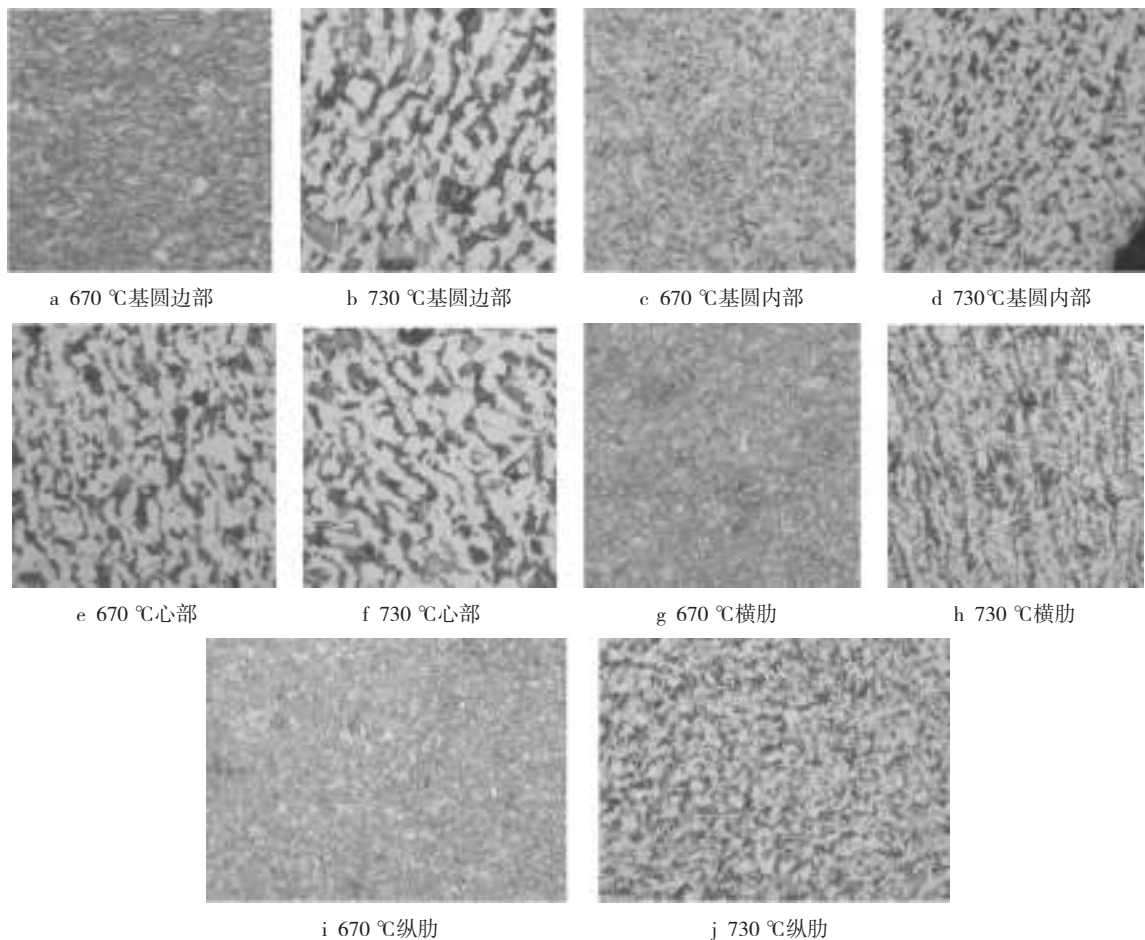


图1 HRB400S Φ12 mm控冷钢筋不同上冷床温度组织对比 500×

4 结 语

低成本HRB400钢筋微合金化轧制关键技术的研究与应用项目自实施以来,在总结低温控轧工艺经验基础上,根据不同规格及生产线装备特点,采用提碳降钒优化、低温控轧+轧后弱冷、低温控轧+轧后强冷3种工艺方式,3种方式特点突出,有机结合,较好地满足了不同用户需求,为实现棒材产品

本质化低成本、高效化生产起到重要促进作用。

参考文献:

- [1] 石德珂.材料科学基础[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [2] 张越峰,刘伟,孟宪珩,等.钒微合金化HRB400抗震钢筋的研制[J].轧钢,2002(3):16-18.
- [3] 康卓他,马党参,刘建华,等.钒氮微合金化技术在高强度钢中的应用[J].天津冶金,2008(3):35-37.
- [4] 马晓艺,徐春,黄光杰.控轧控冷工艺对钒钛微合金高强钢碳氮化合物析出的影响[C]//2007高技术新材料产业发展研讨会暨《材料导报》编委会年会论文集.2007:504-506.

Lower-cost Rolling Technique for Microalloying Production of HRB400 Rebar

XU Long, WANG Dezhi

(Shandong Iron and Steel Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: Based on different specification steel bar factory and production line equipment in Shandong steel laiwu branch, microalloyed controlled rolling and controlled cooling is applied. The rolling methods are explored for the four production lines according to different specifications of steels. The different process models are formed such as the common rolling, weak cooling after hot rolling, strong cooling after rolling. These three ways can meet requirements of different user. The lower cost and the efficient production for ribbed bars can be realized.

Key words: ribbed rebar; HRB400 rebar; microalloying; controlled rolling and controlled cooling; process model

带有中心值的量值的公差表示

对于量值的公差,当上、下公差相同时,无歧义的表达方式,可以使用带有公差的中心值,例如:100 kPa±5 kPa或(100±5)kPa,50.2 mm±0.2 mm或(50.2±0.2)mm,1 150 °C±10 °C或(1 150±10)°C。但对于带有中心值的

百分数的公差,唯一正确的表示形式是“(n±m)%”,例如“(80±5)%”,任何时候都不得写作80±5%,也不应写作80%±5%。前者已不是百分数的公差,后者则会产生歧义,有可能误将“±5%”理解成“80%的5%”。(燕明宇)