

采用全线奥氏体未再结晶区轧制生产超级钢

胡 林¹, 胡小东¹, 任玉辉², 韩立涛², 王丽惠²

(1. 鞍山科技大学材料学院, 辽宁 鞍山, 114011; 2. 鞍钢线材厂, 辽宁 鞍山, 114003)

摘 要: 分析了高速线材轧机全程控轧控冷的可能性, 开发了湍流式粗轧和中轧强制冷却器和斯太尔摩气雾冷却器, 保证了线材全线在奥氏体未再结晶区的轧制和轧后冷却控制, 成功地在鞍钢线材轧机上, 将普碳钢轧成了“超级钢”。最高的 R_{eL} 达到 470 MPa, Z 达到 67.5%, 铁素体晶粒度最细达 11.6 级, 线材同圈性能均匀性也得到提高。

关键词: 全线; 奥氏体; 未再结晶; 控轧控冷; 超级钢

中图分类号: TG335.6⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0449-749X(2006)02-0051-04

Super Steel Produced by Whole Line Rolling in
Unrecrystallized Austenite RegionHU Lin¹, HU Xiao-dong¹, REN Yu-hui², HAN Li-tao², WANG Li-hui²

(1. Materials College, Anshan University of Science and Technology, Anshan 114011, Liaoning, China;

2. Wire Mill of Anshan Iron and Steel Co., Anshan 114003, Liaoning, China)

Abstract: The possibility of controlled-rolling and controlled-cooling throughout the whole-line of high-speed wire rod mill is analyzed. The turbulent coolers used on rough mills and intermediate mills, and spray coolers on Stelmor conveyor were developed. Using these installations, the whole rolling processes can be performed in the austenite unrecrystallized zone and cooling control after finish rolling can be improved. Super steel has been produced from mild carbon steel in wire mill of Ansteel. The highest R_{eL} is 470 MPa and Z is 67.5%. The finest grain size of ferrite can reach 11.6 grade. The homogeneity of wire coils is also improved.

Key words: whole line; austenite; unrecrystallization; controlled-rolling and controlled-cooling; super steel

实现钢的“强度翻番, 寿命翻番”, 生产“超级钢”(Ultra-Steel)是钢铁工作者普遍关注的课题。而新一代钢铁材料的主要特征是: 超细晶粒、高纯净度、高均匀性, 有良好的强韧性的组合和有良好的性能/价格比。在各种钢的强化机制中, 唯有细晶强化可以在提高钢的强度的同时提高钢的韧性。由 Hall-Patch 公式可知:

$$\sigma_s = \sigma_0 + kd^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

若晶粒尺寸达到 $1 \sim 2 \mu\text{m}$, 则 $kd^{\frac{1}{2}}$ 的增量可以达到 435 MPa^[1], 又由脆性转变温度与晶粒尺寸的关系可知:

$$T_c = A - B \ln d^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

晶粒细化有利于钢的脆性转变温度的降低, 从而提高其韧性。

根据“形变诱导铁素体相变”(DIFT)理论, 实现超细晶粒钢的 3 个要素是: 大过冷度、大应变量、轧制温度略高于 A_{r3} 。“DIFT”的主要特征是: 相变($\gamma \rightarrow \alpha + P$)主要发生在轧制过程中, 而非在轧后的冷却过程中; 它是一种动态相变, 从而区别于传统的相变; 相

变是以形核为主的机制, 从而具有快速相变的特征^[1]。在“DIFT”的过程中, α 相首先形核于具有高畸变能的 γ 晶界, 当应变足够大时晶核也在晶内变形带、滑移带、孪晶带、亚结构晶面处不断生成“DIFT”。

伴随着铁素体的动态再结晶, 使形成的铁素体晶粒等轴化, 从而保证了钢的各向基本同性和强度韧性的同时提高。

在钢的热轧工艺过程中, 一般要经过奥氏体再结晶区轧制和未再结晶区轧制两个阶段, 钢材的最终组织性能不仅取决于其化学成分, 还与变形温度、变形程度、变形速率、轧后冷却强度等因素有关, 因而是要生产超级钢必须对冶炼—浇铸—轧制—冷却等系统工程进行系列优化。

1 线材轧机的特点和全程奥氏体未再结晶区轧制的设想

采用“DIFT”生产超级钢对板带而言, 已有许多成功的先例和研究, 但在高速线材轧机上生产超级钢的报导却很少, 这主要由于:

(1) 板带钢轧制基本上属于平面变形,变形温度、变形程度、变形速率在整个轧件断面上基本是均匀的,因而所生产产品的组织、晶粒度、性能也比较均匀;而线材在孔型中轧制,且有多次翻钢,上述各参数是不均匀的,因而造成产品断面上的组织性能不均,通过板带、线材金相组织对比,可发现这一点;

(2) 板带钢的道次变形量可以在较大范围内调整,有利于控制轧制,而线材轧制受孔型充满度影响,难以灵活变化,因此不利于控轧;

(3) 线材的精轧速度远远高于板带(线材最高可达 140 m/s),由于形变热来不及散发,精轧阶段温升显著,有可能将精轧阶段位错强化的效果部分抵消,且影响析出强化和细晶强化的效果。由图 1 可见,线材表面、断面 1/4 处和中心的温差是很大的,而且在有中间水冷的条件下,轧件温升也是比较显著的^[1];

(4) 线材精轧后经吐丝成圈并在斯太尔摩线上控制冷却,由于热轧薄带的比表面积比线材大,且是采用水冷(线材采用空冷),因此热轧薄带的冷却强度比线材大,薄带卷取后的冷却速度又比线材集圈后的冷却速度小,这些都带来控冷效果和晶粒细化、组织性能的差异,其中最显著的差别还在于:线圈吐丝后,圈与圈间存在搭接点问题,造成同圈温度和组织性能差(15~20 MPa),而板带不存在这个问题。

综上所述,在线材轧机上实现超级钢的难度要大于板带钢,如不采取特殊措施,生产超级钢是不可能的。

但是,如果仔细分析,在线材轧机上实现形变诱导铁素体相变,细化铁素体晶粒还有有利的方面,这就是积累压下量大和变形速率高,这两点对位错强

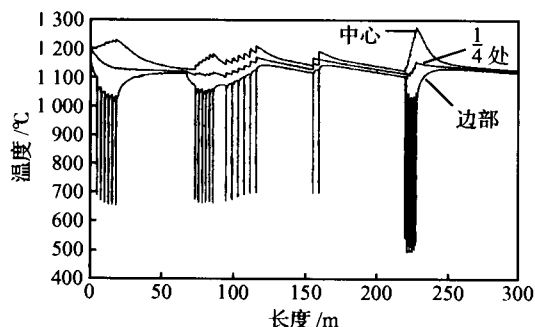


图 1 $\phi 5.5$ mm 304 不锈钢线材整个生产过程中轧件断面各部的温度变化曲线

Fig. 1 Temperature change in cross section of rolling piece during rolling for $\phi 5.5$ mm 304 wire

化是有利的,如果能把线材轧制全程温度控制在奥氏体未再结晶温度范围内,就可以利用位错强化和细晶强化的不断积累,实现线材超级钢的生产。但这里有一个“度”的问题,一是要考虑现场轧机能力和电机负荷,不可能将轧制温度控制的过低,以免造成设备事故;二是要控制位错强化所占的比例,否则容易造成成品屈服比过高和时效作用过大。根据计算,鞍钢线材厂采用 120 mm \times 120 mm 连铸方坯轧成 $\phi 6.5$ mm 线材的总伸长率为 433.5,精轧机线速度为 75 m/s,变形速率平均在 600~750 s⁻¹,精轧机轧件出口温度在 1050~1100 °C,如果利用上述条件,控制加热、粗轧、中轧、精轧温度,使其均降至 900~950 °C,则可实现全程奥氏体未再结晶温度区的轧制。因此笔者利用图 2 和图 3 的关系来考虑实际的温度控制方案^[2]。图 2 是 Q235 钢轧制温度与变形速率的关系,图 3 是轧后冷却速度与铁素体晶粒尺寸的关系。

2 湍流式强制冷却器和斯太尔摩气雾冷却器的开发

鞍钢线材厂是购进美国弗尔利斯厂的二手设备,原为 4 线并列轧制,精轧速度为 50 m/s,盘重小于 1 t,后经改造,提速至 75 m/s,改为 3 线轧制,但由于受场地限制,粗轧机组与中轧机组间没有控冷装置,中轧机组与精轧机组间的 4 号水箱冷却能力也不足,精轧机到吐丝机间的 1~3 号水箱长度较短,斯太尔摩线长度也只有 64 m(宝钢等均在 100 m

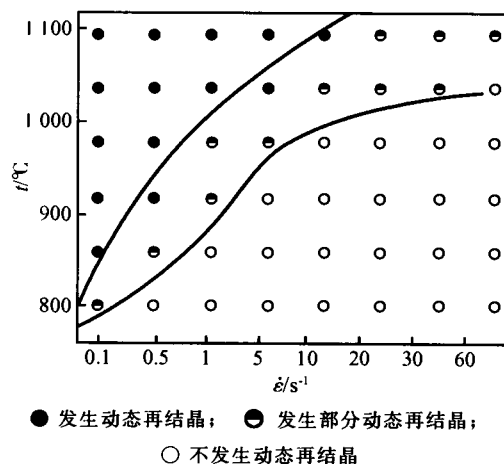


图 2 Q235 钢轧制温度,变形速率与再结晶类型之间关系

Fig. 2 Relationship among rolling temperature, strain rate and type of recrystallization of Q235

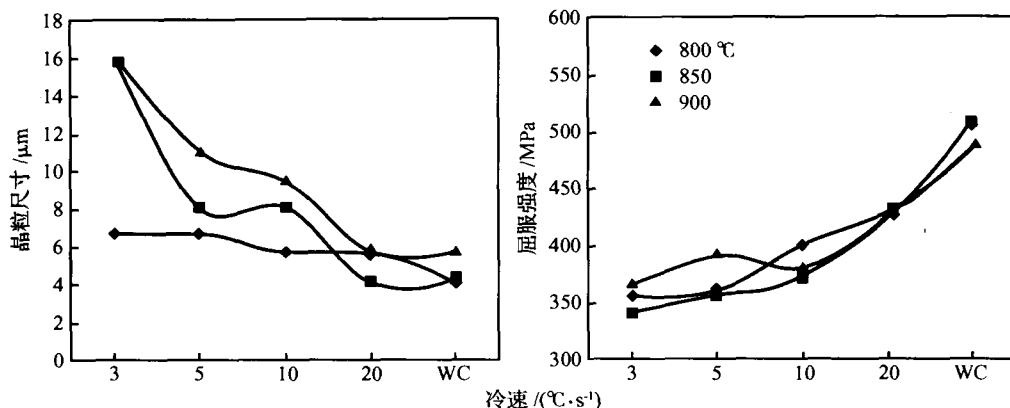


图3 轧后冷却速度与铁素体晶粒和屈服强度的关系

Fig. 3 Influence of cooling rate after rolling on ferrite grain size and yield strength of Q235

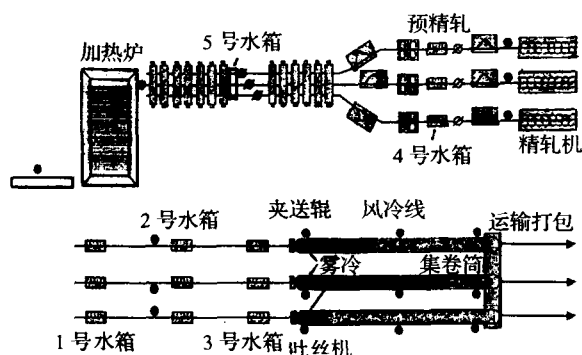


图4 鞍钢线材厂工艺平面布置图及改造后的水冷系统

Fig. 4 Layout of wire mill and modified cooling system at Ansteel

以上),因此要实现全程奥氏体未再结晶区控轧控冷难度极大,为此,鞍钢线材厂与鞍山科技大学冶金工程技术中心合作,对全线控冷设备进行了全面改造^[3](图4)。

(1) 4号水箱由开式直喷式冷却器改造成为闭式湍流式冷却器,用3个顺向喷嘴2个逆向喷嘴和一组扑水器,加大中轧后的轧件冷却强度,同时改造了管道、阀门系统,实现了自动控制,改造后水冷段仅4.38 m,水压仅0.3 MPa,在0.56 s的时间内将 $\phi 19.5$ mm轧件整个温度下降100 °C,经平行对比测试,新旧冷却器的冷却强度相差1倍,为控轧控冷打下了良好基础,现场很快将其由1号线推广到2号和3号线上。

(2) 全线控轧控冷,在粗轧机组与中轧机组间加装了5号水箱,考虑到粗、中轧机组为3线并列轧

制,且轧件断面较大($\phi 47$ mm),温度难以降低等特点,在现场只能提供1.43 m安装位置的条件下,开发了全逆向湍流式三线并列冷却器,加大了水量和水压,试验结果,仅用1.02 s时间就将轧件整体温度下降了50 °C,从而控制了进中轧机组的轧件温度。

(3) 为了控制精轧机组轧制时的轧件温升,在精轧机组10架轧机间的导卫装置内加装了机架间水冷器,从而减少了精轧过程的温升,保留了位错强化的效果。

(4) 开发了斯太尔摩线气雾冷却器^[2]。试验发现,当线材吐丝温度过高时,造成终轧后奥氏体和铁素体晶粒迅速长大,很难达到细晶强化效果,同时吐丝后线圈间搭接点温度差加大,造成同圈组织性能差加大。但如果吐丝温度过低,吐丝机又不能正常工作。为了解决上述矛盾,必须采用吐丝温度在700 °C以上,并加速吐丝后的冷却速度。通常斯太尔摩控线头一段为自然空冷的摆动辊道,第二段以后才是下部风冷的辊道段,依靠下部风机对成圈的线材自下而上吹风冷却,并控制各段风量,以达到不同的冷却速度,并用“佳灵装置”重点对搭接点吹风,以解决同圈温度差和组织性能不均的问题,但即使这样效果也并不理想,笔者为此开发了旋流式二次雾化气雾冷却器,在吐丝后先从上部重点对线圈搭接点实现雾冷,待线圈走到斯太尔摩线第二段时再实施下部风冷,这种上下夹击的冷却方法,不但加速了吐丝后的冷却速度,同时也减少了搭接点的温度不均和组织性能差。该气雾冷却器为国内线材轧机首次采用,冷却速度可在1~25 °C/s范围内任意调节,效果良好。

3 鞍钢线材厂用普碳钢生产 $\phi 6.5$ mm 超级钢的工业试验结果

在采用了上述诸多研究和设施的基础上,鞍钢线材厂和东北大学、鞍山科技大学合作于 2003 年 12 月成功地进行了超级钢的生产试验,该钢种的化学成分如表 1 所示。

表 1 坯料的化学成分

Table 1 Chemical composition of billet %

$w(C)$	$w(Si)$	$w(Mn)$	$w(P)$	$w(S)$
0.21~0.25	0.30~0.50	0.70~0.90	≤ 0.030	≤ 0.030

试验采用 120 mm×120 mm 连铸方坯经 26 道轧成 $\phi 6.5$ mm 线材,其中粗轧 8 道,总伸长率为 8.30,中轧 6 道和预精轧 2 道,总伸长率为 5.81,精轧 10 架,总伸长率为 8.99,钢坯出炉温度为 $(900 \pm 30)^\circ\text{C}$,中轧为 $(800 \pm 30)^\circ\text{C}$,精轧为 $(800 \pm 20)^\circ\text{C}$,吐丝温度为 $(700 \pm 20)^\circ\text{C}$,吐丝后快速冷却至 500°C 以下。轧制中监测各机架负荷,未出现任何问题。试验中发现,精轧后如 1~3 号水箱给水量过大,会造成吐丝温度过低、线材屈服比偏高和线圈“翘尾”现象,后经减少水量和修改吐丝机提前量,解决了该问题。

经鞍钢和东北大学、鞍山科技大学联合检测,试验钢的结果如下:

(1) $R_{\text{eL}}=415\sim 470\text{ MPa}$, $R_m=595\sim 640\text{ MPa}$, $A_{10}=22\%\sim 28\%$, $Z=58.5\%\sim 67.5\%$,冷弯全部合格;

(2) 平均晶粒度 10.4~11.0 级,其中铁素体晶粒度 10.3~11.6 级,细晶粒占 76.4%~86.5%(图 5);

(3) 斯太尔摩线用气雾冷却比不用气雾冷却 R_{eL} 提高 10~15 MPa,同圈性能均匀性也得到了提高。

4 结论

(1) 线材采用“DIFT”生产超级钢有着与板带不同特点和难点,必须充分利用变形速率高、积累变形率大和能够多段控冷的特点,才能生产超级钢。

(2) 鞍钢线材厂的经验证明,在线材轧机上,不

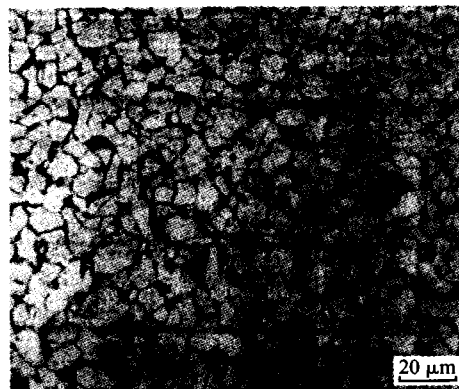


图 5 控扎、控冷后的轧件金相组织

Fig. 5 Microstructure of controlled rolled and cooled sample

必追求过低的轧制温度,以保护设备,但只要实现全线奥氏体未再结晶区轧制,就可能生产超级钢,或在不加微量合金元素条件下,将 II 级钢筋轧成 III 级钢筋,从而显著提高经济效益。

(3) 开发的顺、逆交替,闭式湍流冷却器和斯太尔摩线气雾冷却器,具有调节范围广、冷却效率高的特点,保证了全线控扎控冷生产超级钢的要求,其中斯太尔摩线气雾冷却器的采用在国内尚属首次,具有推广价值。

参考文献:

- [1] 翁宇庆.超细晶粒钢—钢的组织细化理论与控制技术[M].北京:冶金工业出版社,2003.10.(WENG Yu-qing. Ultrafine Grain Steel—Theory and Control Technology of Fine Microstructure of Steel [M]. Beijing: The Metallurgical Industry Press, 2003. 10.)
- [2] 胡林,宋立国,高朋,等.生产 400 MPa 带肋钢筋用强制冷却器的研究[J].轧钢,2003,20(3):4-6.(HU Lin, SONG Li-guo, GAO Peng, et al. Study of Strengthening Cooling Device for Production of 400 MPa Steel Rod Ribs[J]. Steel Rolling, 2003, 20(3): 4-6.)
- [3] 高朋.鞍钢线材厂控扎控冷项目的开发和研究[J].鞍山科技大学学报,2004,(3):22-26.(GAO Peng. Study and Development of Control Rolling and Control Cooling Project in Anshan Steel Co. Wire Plant[J]. Journal of Anshan University of Sci. and Technol, 2004, (3): 22-26.)