

控轧控冷条件下 Q345 中厚板的生产工艺研究

朱伏先¹, 李艳梅¹, 刘彦春¹, 张苏渊², 易敏², 刘晶志³

(1. 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学), 辽宁 沈阳 110004;

2. 首钢集团总公司技术研究院, 北京 100041; 3. 首钢集团总公司中板厂, 北京 100041)

摘 要: 通过试验模拟和实机轧制试验, 对传统 Q345 钢的静态再结晶行为、应变累积效应和晶粒细化机制等进行研究, 分析了影响中厚钢板显微组织和力学性能的主要因素。结合首钢中板厂 3500 mm 机组的特点, 确定出 Q345 中厚钢板的 TMCP 生产工艺。实践表明该工艺可使钢板的平均组织晶粒度达到 10~12 级, 带状组织降至 1.5 级以下。

关键词: Q345 钢; 中厚钢板; TMCP; 再结晶

中图分类号: TG335.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0449-749X(2005)05-0032-06

Study on Production of Q345 Plate by Controlled Rolling and Cooling

ZHU Fu-xian¹, LI Yan-mei¹, LIU Yan-chun¹,

ZHANG Su-yuan², YI Min², LIU Jing-zhi³

(1. The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100041, China;

3. Shougang Plate Plant, Beijing 100041, China)

Abstract: By simulation and rolling experiments in lab, the static recrystallization, strain accumulating effect and grain refining mechanism of Q345 steel were studied. And the main factors which influence the structure and properties of plate steel were analyzed. The TMCP of Q345 plate was established for 3500 mm rolling mill at Shougang plate plant. The practice showed that the average grain size of the plate produced by this process can reach ASTM No. 10-12 grade, and the grade of band structure can decreased to below 1.5.

Key words: Q345; plate; TMCP; recrystallization

Q345 系列钢用于中厚板生产已有近 50 年的历史, 在中厚板厂的产量中所占比例最大、涵盖的品种规格范围也最多, 在新的装备条件下, 如何合理应用 TMCP 工艺, 最大限度地挖掘其潜在性能, 这是国内中厚板企业共同关心的技术问题。本文结合首钢 3500 mm 中厚板轧机的改造项目, 就 Q345 中厚钢板的 TMCP 工艺进行了试验研究。

1 试验材料和方法

试验钢化学成分如表 1 所示, 试验材料取自 80 mm 厚中间坯。热模拟试验在东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室的 Gleeble1500 试验机上进行, 试样规格为 $\phi 10\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ 和 $\phi 8\text{ mm} \times 15\text{ mm}$; 热轧试验在配有水幕冷却装置的 $\phi 300\text{ mm}$ 多功能试验轧机上进行, 采用 KO10 箱式电阻加热炉加热, 试验过程采用日本产 ICON 手提式红外线

测温仪测温; 工业试验在首钢中板厂原 3340 mm 机组和改造后的 3500 mm 机组上进行; 按 GB228-87、GB/T229-1994 标准采用 Instron 拉伸试验机等测定常规力学性能, 采用 Leica 图像分析仪等观测分析微观组织。

2 试验结果及分析

2.1 再结晶区变形量对力学性能和组织的影响

为把握 Q345 钢奥氏体再结晶区道次变形量对组织和力学性能的影响规律, 将试验钢加工成宽 70 mm 的阶梯形试件, 加热到 1150 °C 保温 1 h 后在设定的温度点充分均温, 单道次轧制成厚 14 mm 钢

表 1 试验钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of test steel %

钢号	w(C)	w(Mn)	w(Si)	w(S)	w(P)
Q345B	0.17	1.48	0.35	0.008	0.021

基金项目: 国家重大科技攻关计划资助项目(ZZ0113A0101)

作者简介: 朱伏先(1946-), 男, 硕士, 教授; E-mail: zhufuxian@163.com;

修订日期: 2004-11-12

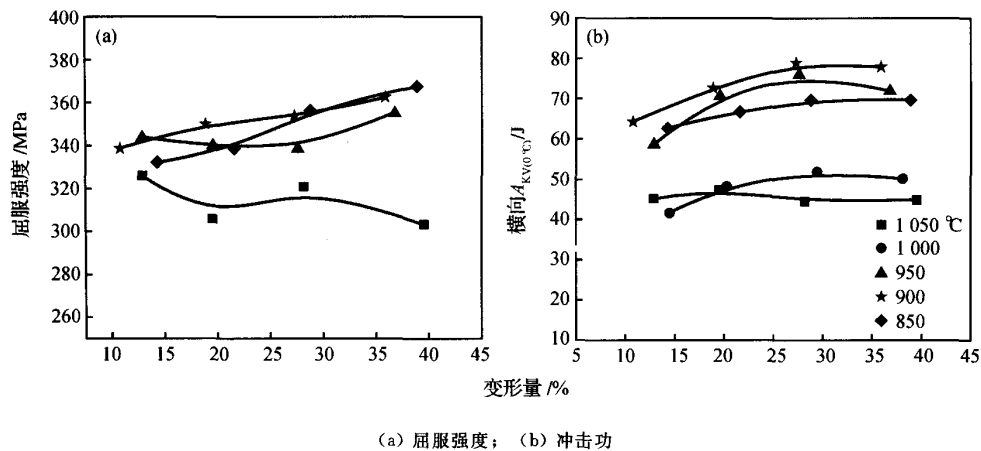


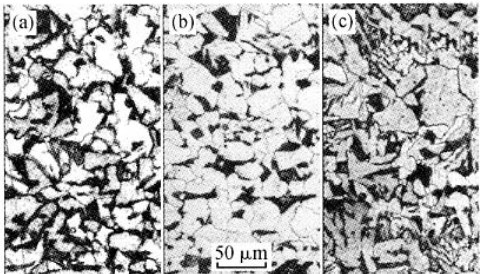
图 1 变形量对屈服强度和冲击功的影响
Fig. 1 Influence of deformation on yield strength and impact energy

板,每个台阶对应的变形量分别为 10%、20%、30% 和 40%,轧后空冷试样对应每种变形量分别沿横向加工成标准 V 型缺口冲击试样和棒状拉伸试样,测定常规力学性能并选择典型试样进行微观组织观察。

图 1 是不同温度不同道次变形量对试验钢屈服强度、0 °C 横向冲击功的影响规律。从图 1 中可以看出:在 1000 °C 以上的高温再结晶区轧制时, Q345 钢的屈服强度和冲击功均比 950 °C 以下的低温区轧制时低。以轧制温度同为 1050 °C 而变形量不同的试样为例,当变形量由 10% 增加到 40% 时,屈服强度呈下降趋势,横向 A_{KV} 值很低且随变形量的增加无明显变化,而在 950 °C 以下的低温区轧制时,不仅整体力学性能比高温区轧制时高,而且道次变形量对力学性能的影响比较显著,随变形量增加,屈服强度和 A_{KV} 值都呈上升趋势,轧制温度越低,上升的趋势越显著。

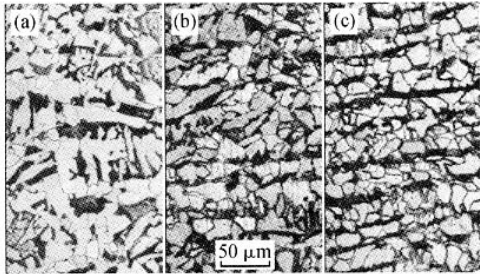
图 2 是 1050 °C 不同变形量轧制试样的室温显微组织。由图 2 可见,变形量为 12.9% 时,显微组织为较细的等轴状铁素体和珠光体,随着变形量的增大铁素体晶粒逐渐增大,变形量为 28.2% 时开始出现魏氏组织,变形量达到 39.6% 时铁素体晶粒粗大且呈片状分布,为典型的魏氏组织特征。这是因为 1000 °C 以上的高温再结晶区轧制时,变形量越大,形变奥氏体的再结晶速率越大,再结晶结束后晶粒长大的速度也越快。当变形量达到一定的数值后,变形过程中还会发生动态再结晶,动态再结晶晶粒在高温缓慢冷却过程中,无需孕育并通过亚动态再结晶方式迅速长大成粗大的奥氏体晶粒。粗大的

奥氏体晶粒在相变过程中将遵循 I A 型相变规律转变为粗晶铁素体或魏氏组织,对钢材强度和韧性产生负面影响,这与图 1 所示力学性能规律非常一致。



(a) $\epsilon=12.9\%$; (b) $\epsilon=28.2\%$; (c) $\epsilon=39.6\%$

图 2 1050 °C 不同变形量轧制试样的显微组织
Fig. 2 Microstructure of samples rolled with different reductions at 1050 °C



(a) $\epsilon=10.8\%$; (b) $\epsilon=18.9\%$; (c) $\epsilon=41\%$

图 3 900 °C 不同变形量轧制试样的显微组织
Fig. 3 Microstructure of samples rolled with different reductions at 900 °C

由此可见, Q345 钢在 1000 ℃ 以上的高温再结晶区轧制阶段, 变形量并不是越大越好, 最好能将其控制在 15%~20%, 最大道次压下率不宜超过 30%。

图 3 是 900 ℃ 不同变形量轧制试样的显微组织。由图 3 可见, 低温区轧制时的显微组织与图 2 恰好相反, 变形量小的情况下, 铁素体晶粒粗大、魏氏组织严重, 随着变形量的增加铁素体晶粒变细、魏氏组织完全消失。在力学性能上表现为: 随道次变形量增加, 屈服强度和 A_{KV} 值增加。这是因为, 低温区轧制且变形量较小的情况下, 形变奥氏体内所蓄积的应变能比较小, 再结晶的形核率低, 有限的再结晶核心只在原奥氏体的部分晶界上形成, 再加上轧件温度低所具有的热能又比较小, 形变奥氏体虽然也产生再结晶, 但驱动再结晶或晶粒成长的能量严重不足, 再结晶过程被延缓, 处于这种状态下的不完全再结晶组织进入奥氏体/铁素体相变时, 铁素体和珠光体只能沿着晶内位错密度高的区域有取向地成长, 或以魏氏组织的形态析出^[1]。

因此, 在 Q345 中厚钢板的低温再结晶区轧制阶段, 必须保证道次压下率大于静态再结晶的临界变形量。实际操作时可随着轧制温度的自然降低, 相应地增加后续道次的压下率, 使每道次轧后都实现完全再结晶, 达到反复轧制、反复再结晶, 充分细化奥氏体晶粒的目的。

2.2 精轧工艺对组织和性能的影响

通过粗轧阶段的再结晶区轧制, 获得均匀、细小的奥氏体晶粒将为精轧阶段提供理想的组织基础, 而精轧阶段未再结晶奥氏体晶粒内应变累积的程度, 即形变奥氏体内残余应变及晶内缺陷所诱发的奥氏体/铁素体相变细晶机制强弱, 将对钢材最终铁素体+珠光体组织细化起决定性作用。

利用 Gleeble1500 试验机, 选定变形速率为 10 s^{-1} , 双道次压缩的真应变为 0.36, 道次间隔时间分别为 2、5、10、20、60 s, 测得 Q345 钢道次间静态再结晶软化曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出, 按常规的轧制节奏, Q345 钢在 950 ℃ 以上轧制时可以实现完全再结晶; 800 ℃ 以下才是未再结晶温度区间。由于未再结晶温度区间非常狭窄, 要想完全避开部分再结晶区, 实现单纯的未再结晶区应变累积是比较困难的。为了提高精轧阶段奥氏体部分再结晶区及未再结晶区内应变累积的百分数, 选择合适的精轧温度区间和精轧变形制度是确定 TMCP 工艺的关键。

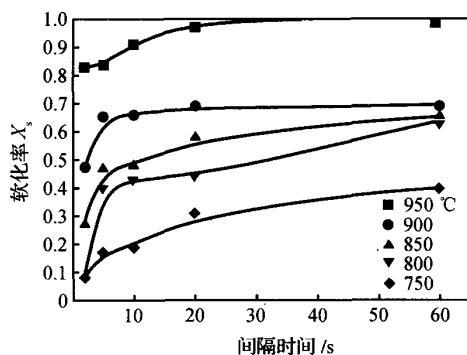


图 4 试验钢道次间静态再结晶软化曲线

Fig. 4 Static recrystallization of test steel in pass-interval

精轧温度区间是指精轧开始温度至精轧结束时的温度间隔。生产现场通常以进精轧温度和终轧温度限定这一温度间隔。模拟生产实际, 通过实验室轧制试验得到进精轧温度、终轧温度与力学性能的关系如图 5 所示。从图 5 中可以看出: 进精轧温度变化、屈服强度和抗拉强度变化不大, 但对室温冲击功的影响却比较显著, 当进精轧温度低于 860 ℃ 时纵向冲击功降低, 当进精轧温度高于 920 ℃ 时, 纵、横向冲击功均显著降低, 据此判定, Q345 钢较好的进精轧温度应在 860~920 ℃; 终轧温度应在 820~850 ℃。

以不同的进精轧温度和不同终轧温度组合成高、中、低 3 种不同的精轧温度区间, 通过实验室轧制试验得到的力学性能如表 2 所示, 由表中数值可以看出: 精轧温度区间为 880~822 ℃ 时, 综合力学性能指标最好, 室温下横向冲击功达到 117 J、纵向冲击功达到 230 J。此种情况下, 进精轧温度和终轧温度恰好都进入了各自的最佳温度范围。

在 880~820 ℃ 的精轧温度区间内, 分别以 72.9%、66%、55.6% 和 38.5% 的累积变形量轧制后空冷, 试样的力学性能如图 6 所示, 可以看出当精轧阶段累积变形量超过 55% 时, 随累积变形量的增加屈服强度略有增加, 当累积变形量达到 70% 时, 屈服强度升高约 30 MPa; 而累积变形量对 0 ℃ 冲击功的影响却十分显著, 随累积变形量的增加冲击值几乎呈线性递增, 可见增加精轧阶段的累积变形量对提高 Q345 钢的冲击韧性非常有效。图 7 为不同累积变形量试样的显微组织照片, 其中(c)的累积变形量为 73%, 其铁素体晶粒尺寸相对较细, 约为 15 μm 左右, 显然精轧阶段应变累积带来的晶粒细化

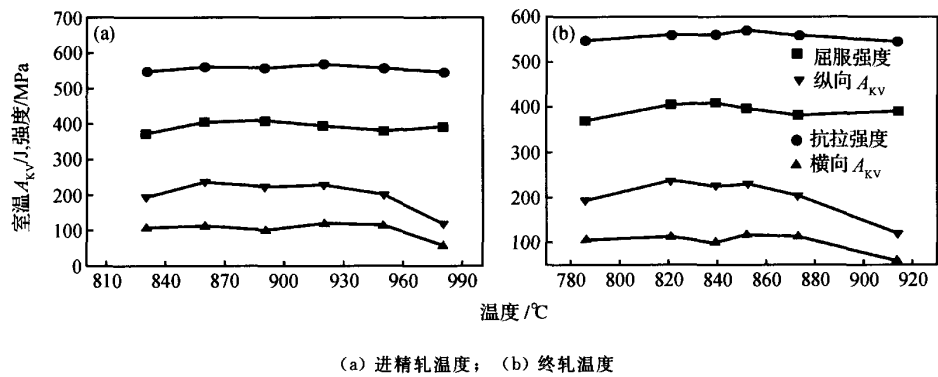


图 5 进精轧温度、终轧温度与力学性能的关系

Fig. 5 Relationships between start,end temperature in finish rolling and mechanical properties

表 2 试验钢不同精轧温度区间控轧时的力学性能

Table 2 Mechanical properties of test steel at different rolling temperature

进精轧温 度/℃	终轧温 度/℃	屈服强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	室温 A_{KV}/J	
				纵向	横向
800	756	371	548	106	193
880	822	396	569	117	230
950	884	390	544	58	117

效果显著,对冲击韧性的正面影响也显著。按此累积变形量换算,则精轧待温厚度约为成品厚度的 3 倍,从加快生产节奏考虑,建议选择 55%~66% 左右的累积变形量、即 2~2.5 倍的成品厚度,如图 7 (b)所示,这样反而可以获得等轴状晶较多且珠光体带状级别相对较低的室温组织。

根据本节的试验结果,确定Q345中厚钢板精

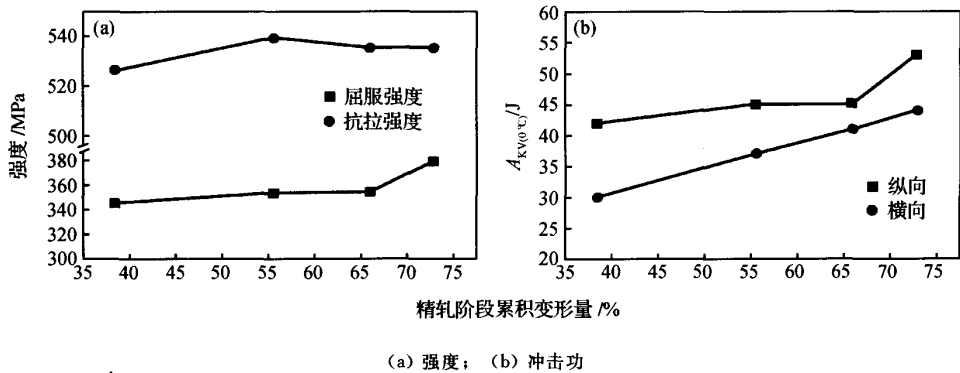


图 6 精轧累积变形量与强度和冲击功的关系

Fig. 6 Relationships between accumulated reduction in finish rolling and strength, impact energy

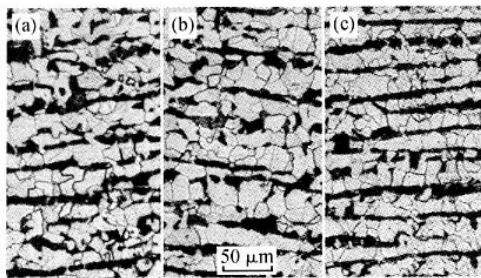


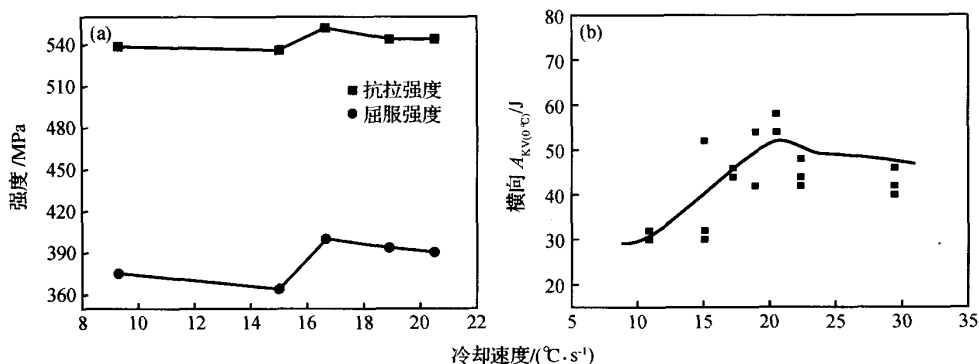
图 7 不同累积变形量试样的金相照片

Fig. 7 Microstructure of samples with different accumulated reductions

轧阶段的主要 TMCP 工艺参数如下:进精轧温度 (880±20)℃;终轧温度(820±10)℃;最佳精轧温度区间 880~820℃;较好的待温厚度为 2~2.5 倍成品厚度。

2.3 轧后冷却制度的确定

为了解轧后冷却制度对 Q345 钢力学性能的影响规律,在实验室 φ300 mm 轧机上进行了控轧控冷综合试验。图 8 是冷却速度对 Q345 钢强度和冲击功的影响规律,由图可以看出,当冷却速度由 14℃/s 提高到 18℃/s 时,屈服强度从 360 MPa 上升到 400 MPa,继续提高冷却速度,屈服强度基本保



(a) 强度; (b) 横向 0 °C 冲击功

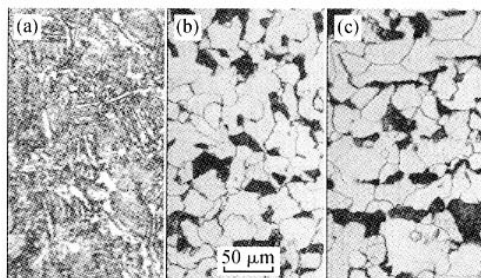
图 8 不同冷却速度下试验钢的力学性能

Fig. 8 Mechanical properties of samples cooled at different rate

持在 400 MPa 左右;当冷却速度由 10 °C/s 提高到 18 °C/s 时,横向 0 °C 冲击功提高 25~35 J,当冷却速度大于 20 °C/s 时,横向 0 °C 冲击功随冷却速度增大显著降低。

图 9 是进精轧温度 880 °C、终轧温度 830 °C、终冷温度 650 °C 时,不同冷却速度下的试样金相组织。由图 9 可见,当冷却速度达到 30 °C/s 时,得到的是贝氏体和马氏体的混合组织,对应的力学性能为: $R_{eL} = 456$ MPa、 $R_m = 618$ MPa、 $A = 23.6\%$ 、0 °C $A_{KV} = 78$ J。当冷却速度为 18 °C/s 左右时,得到的组织是均匀的铁素体和珠光体组织,其中珠光体组织没有形成明显带状;对应的力学性能为: $R_{eL} = 390$ MPa、 $R_m = 540$ MPa、 $A = 32.7\%$ 、0 °C $A_{KV} = 75$ J。当冷却速度为 10 °C/s 时,其室温组织也是均匀的铁素体和珠光体,但珠光体的带状组织比较明显,对应的力学性能为: $R_{eL} = 367$ MPa、 $R_m = 533$ MPa、 $A = 35\%$ 、0 °C $A_{KV} = 40$ J。综合比较分析后确定,普通级别 Q345 钢板的轧后冷却速度范围为: 15~18 °C/s,不宜超过 20 °C/s。

在冷却速度 15~18 °C/s 范围内,试验比较了终冷温度与强度指标的关系,发现当终冷温度大于 700 °C 时,随终冷温度升高,屈服强度开始降低,降低的幅度为 30~40 MPa,但所有示值都满足 GB/T1591-94 标准要求;另外,从所测定的 Q345 钢动态 CCT 曲线上发现, Q345 钢的贝氏体形成温度范围比较宽,当终冷温度处于 400~600 °C 时,都有可能形成贝氏体,因此确定普通级别 Q345 钢板的终冷温度为 650~700 °C。同时,冷却过程中还应当控制钢材表面的瞬时温度尽量不低于 550 °C,以避免钢板上下表层形成过量的贝氏体,导致塑、韧性指



(a) 30 °C/s; (b) 20 °C/s; (c) 10 °C/s

图 9 不同冷却速度下试验钢的室温组织

Fig. 9 Microstructure of samples

cooled at different rates

标下降。

2.4 TMCP 工艺确定及工业应用效果

为了使实验室条件下得出的 TMCP 工艺参数能够更加切合工业生产实际,2002 年 1—8 月在首钢中板厂 3340 mm 机组上进行了多轮 Q345 中板 TMCP 工业试验^[2]。通过大量工业试验数据与实验室研究结果的比较分析,结合首钢中板厂改造后的 3500 mm 轧机特点,确定了控轧控冷条件下 Q345 中厚钢板的生产工艺要点:钢坯加热温度 1050~1150 °C,在炉时间 3~3.5 h;开轧温度 1000~1100 °C,粗轧道次压下率 $\geq 10\%$,最大压下量 ≤ 30 mm;生产厚度 ≥ 12 mm 钢板时实行中间待温,待温厚度为成品钢板厚度的 2~2.5 倍;精轧开轧温度 (880 ± 20) °C,终轧温度 (820 ± 20) °C;轧后开冷温度 ≥ 760 °C,冷却速度 15~18 °C/s,终冷温度 650~700 °C。

本研究所确定的生产工艺已于 2003 年 1 月在改造后的首钢中板厂 3500 mm 机组上投入应用。

表 3 首钢3500 mm 机组生产 Q345 钢板的力学性能

Table 3 Mechanical properties of Q345 steel produced on 3500 mm mill in Shougang

序号	成品厚度/ mm	R _{EL} /MPa	R _m /MPa	A/%	室温纵向冲			冷弯试验
					击功 A _{KV} /J			d=2a,180°
1	12	410	555	30.0	136	152	150	合格
2	12	405	550	29.0	140	138	136	合格
3	12	410	545	26.5	128	132	122	合格
4	20	405	545	28.5	124	140	128	合格
5	20	405	535	26.0	176	180	162	合格
6	20	400	555	26.0	154	144	150	合格

表 3 是 Q345B 级坯料按上述工艺生产的 12 mm 和 20 mm 钢板的力学性能抽验结果,图 10 是表 3 中 4 号试样的显微组织,铁素体平均晶粒尺寸约为 10 μm,由于铁素体晶粒得到有效细化,珠光体也同时得到细化、带状组织减弱,有效地提高了钢材的综合使用性能。

据首钢中板厂科技科的统计资料,3500 mm 机组投产后,在正常生产条件下, Q345B 级钢板的强韧性指标可稳定达到 Q390C、D 级水平;Q345D 级钢板的各项力学性能都超过了高强船板 D36、E36 的水平,达到了 D40、E40 的要求;Q345 系列钢板的组织晶粒度比改造前平均提高了 3~4 级,由改造前的 7~8 级提高到现在的 10~12 级;带状组织由改造前的 3~5 级降低至目前的 1.5 级以下;使高性能厚板的规格范围不断扩大,由改造前的 30 mm 以下提高到现在的 60 mm,这说明 TMCP 技术在首钢 3500 mm 机组上的应用已获得显著效果。

3 结论

(1) 采用再结晶方法细化奥氏体晶粒时,道次变形量宜控制在 15%~20%,最大道次变形量≤30%。这有利于避免混晶形成,减少相变后生成魏氏组织的几率。

(2) 降低进精轧温度或增加待温厚度,有利于提高有效应变累积的百分数,促进铁素体形核、增强相变驱动力,获得均匀细小的铁素体+珠光体组织,

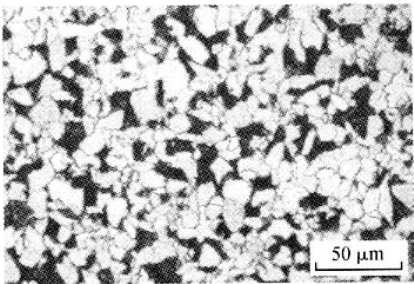


图 10 工业生产 Q345 钢板的显微组织

Fig. 10 Microstructure of Q345 steel of mass production

推荐的较好精轧温度区间为 820~880 ℃,待温厚度为 2~2.5 倍成品厚度。

(3) 采用加速冷却促进铁素体相变时,推荐的冷却速度为 15~18 ℃/s,终冷温度为 650~700 ℃,以避免过量的脆性相形成而导致钢材塑、韧性降低。

参考文献:

[1] 吉江淳彦. 熱間加工オーステナイトの再結晶粒の成長速度に及ぼす未再結晶部の転位密度の影響[J]. 鉄と鋼, 1994, 80 (12): 50-55.

[2] 范建文. 细晶强化 Q345 中板的控轧控冷工艺研究[J]. 轧钢, 2003, 20(1): 11-14. (FAN Jian-wen. Research of Controlled Rolling and Accelerated Cooling Process of Q345 Plate for Grain Refinement Strengthening[J]. Steel Rolling, 2003, 20 (1): 11-14.)

包钢结束了无冷轧薄板的历史

2005 年 3 月 27 日,包钢冷轧薄板生产线酸轧机组成功轧出第一个冷轧卷,从此结束了内蒙古不产冷轧薄板的历史,同时标志着效益潜力巨大的包钢板材精品线得到进一步完善,标志着包钢的产品深加工能力正在实现质的飞跃。

包钢冷轧薄板项目是国家和内蒙古自治区“十五”期间的重点项目。该项目总投资 28.696 亿元,以包钢目前生产的热轧薄板为原料,产品除冷轧板外,还将延伸至镀锌板,年

生产能力 140 万 t。产品中有冷轧商品卷 60 万 t,镀锌卷 41 万 t,冷硬卷 34 万 t 等。可用在建筑、轻工、家电、汽车等行业中。该生产线主体设备从德国、意大利、奥地利等国引进,工艺设备达当今世界一流水平。

包钢冷轧薄板工程自 2003 年 8 月 31 日破土动工到成功轧出第一个冷轧卷仅用了 18 个月。预计在今年第 3 季度前,热镀锌机组投产,将生产出镀锌薄板。

驿 路