

细晶强化 Q345 中板的控轧 控冷工艺研究

范建文¹, 易 敏¹, 陈明跃¹, 朱伏先², 赵胜国³

(1. 首钢集团总公司技术研究院, 北京 100041; 2. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004; 3. 首钢集团总公司中厚板厂, 北京 100041)

摘要:采用 Q345 连铸板坯, 在首钢 3300mm 轧机上进行了中板细晶化实验, 研究了轧制温度、变形量分配、待温时冷却方式和精轧中的强制冷却对板材组织性能的影响。结果表明, 精轧开轧温度在 870~910℃ 左右, 同时待温期间采用水幕冷却, 可使厚 12mm 板的铁素体晶粒达到 9 级以上, $\sigma_s > 420 \text{ MPa}$; 采用较低精轧开轧温度及终轧后水幕冷却, 可使厚 20mm 板铁素体晶粒为 8.5~9 级, $\sigma_s = 370 \sim 380 \text{ MPa}$; 强化精轧段的水冷, 可使厚 20mm 板铁素体晶粒达 9 级以上, $\sigma_s > 400 \text{ MPa}$ 。

关键词:Q345 钢; 中板; 控制轧制; 控制冷却; 组织细化

中图分类号: TG335.52, TG142.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-9996(2003)01-0011-05

Research of controlled rolling and accelerated cooling process of Q345 plate for grain refinement strengthening

FAN Jian-wen¹, YI Min¹, CHEN Ming-yue¹, ZHU Fu-xian², ZHAO Sheng-guo³

(1. Technical Research Institute, Shougang Group Co., Beijing 100041, China;
2. The State Key Lab of Rolling & Automation of Northeastern University, Shenyang 110004, China;
3. Plate Mill, Shougang Group Co., Beijing 100041, China)

Abstract: Industrial experiments of Q345 plates for grain refinement strengthening were carried out with continuous casting slabs on the 3300mm rolling mill in the Shougang Plate Rolling Plant. During the experiments, the influence factors, such as the deformation temperature, deformation amount allocation among the steps, cooling methods between roughing and finishing rolling and accelerated cooling method during the finishing rolling, on the microstructure and mechanical properties of the plates were studied.

Key words: Q345 steel; plate; controlled rolling; accelerated cooling; ferrite grain refinement

1 引言

21 世纪, 日本、韩国及我国等国家均开展了新一代钢铁材料的研究, 晶粒超细化、组织高均匀化、高洁净化是共同追求的目标。目前, 我国针对 Q235 材料不仅开展了大量组织超细化的实验室研究工作, 而且在薄板热连轧和棒材轧制中获得了工业应用^[1,2]。然而, 与热连轧板卷、带肋钢筋的轧制相比, 中厚板生产流程自动

化程度低、轧制道次间隔时间长并且难于获得大冷却速度, 所以中厚板的组织细化很困难。为此, 对 Q235 中板进行了组织细晶化的工业实验研究, 获得了很好的结果^[3]。并进而开展了 Q345 板材组织细晶化的研究。

2 试验方法

2.1 试验材料及轧制规程

试验材料是 220mm×1400mm×1700mm 的

收稿日期: 2002-10-09

基金项目: 北京市科技新星计划资助项目 (H013610320111)

作者简介: 范建文 (1970-), 男 (汉族), 山西太原人, 高级工程师, 博士后。

Q345 连铸板坯；化学成分是 0.15%~0.18% C , 0.34%~0.40% Si , 1.26%~1.38% Mn , 0.019%~0.020% P , 0.015%~0.022% S。坯料在燃气炉中加热时间不超过 210min , 温度为 1100~1150℃ 时出炉 , 经高压水除鳞 , 采用轧制力为 34000kN 的 3300mm 四辊轧机轧制。轧机刚度为 4200~4400kN/mm , 工作辊直径 Φ890mm , 转速 55r/min。粗轧阶段开轧温度为 1050~1100℃ , 待温期间采用不同冷却方式 ; 精轧阶段采用不同开轧温度和道次变形量 , 精轧期间部分工艺采用强制水幕冷却 , 终轧后水幕冷却。水冷辊道速度为 2.2m/s。轧制规程见表 1。

表 1 实验轧制方案

工艺 编号	中间坯厚 度/mm	水幕冷却		终轧成品 厚度/mm	水幕冷却	
		水管组数	道次		水管组数	道数
01	30	2	4	12	2	1
02	50	2	6	20	2	1
03	60	2	6	20	2	3
04	80	2	6	20	2	2
05	40	空冷		20	2	3
06*	60	2	6	20	2	3

注 : 所有试样采用两阶段控轧 , 06 号工艺在精轧期间有强制水幕冷却

2.2 现场数据采集

表 2 坯料出炉至四辊轧机的各段温度及冷却参数

工艺编号	II 阶段		终轧控冷开始温度/℃	终轧控冷终止温度/℃	冷却时间/s	冷却速度/℃·s ⁻¹
	开轧温度/℃	终轧温度/℃				
01	860	750	729	677	—	—
02	845	803	789	662	44	2.9
03	830	755	716	644	46	1.6
04	836	752	735	620	47	2.4
05	826	816	785	651	44	3.1
06	830	742	717	601	43	2.7

3.2 组织及力学性能检验结果

试样组织及力学性能检验结果如表 3 所示。对于厚 12mm Q345 中板 (01 工艺) 的铁素体晶粒度达到 9.0 级 , σ_s 在 400MPa 左右 , σ_b 在 535~550MPa , 但冲击韧性低于正常生产同厚度板。检验发现其硫含量较高 , 为 0.024% , 这是该板冲击韧性下降的一个重要原因。与表 3 中列出的 Q390 国家标准比较 , 此次采用 Q345B 连铸坯轧制 , 各项性能指标达到了 Q345D 的水平 , 但超出量不大。

厚 20mm Q345 中板轧制是工业试验研究的

道次压下量、轧机轧制力数据由控制台工业计算机采集 , 采用红外线测温仪测温 , 分别记录精轧开轧温度、终轧温度、轧后控冷开始温度和进矫直机前的温度。

2.3 试样组织与性能检验

对轧制的中板现场取样进行组织性能检验。并进行横、纵向常温拉伸、不同温度下的冲击实验 : 时效冲击实验和冷弯实验。拉伸实验试样尺寸为 T_0 mm (中板原厚) × 25mm (宽度) × 100mm (标距) (12mm 板) 和 T_0 mm × 25mm × 130mm (标距) (20mm 板) ; 冲击实验试样尺寸 V 型 10mm × 10mm × 55mm ; 低温冲击试样采用 JCD 低温浴。时效冲击时 , 采用箱式电阻炉对试样加热保温 , 其余与冲击试验相同。

3 试验结果

3.1 坯料出炉至四辊轧机终轧后各段的温度

试验各阶段的温度如表 2 所示。正常生产粗轧开轧温度为 1000~1050℃ , 精轧开轧温度为 950~1000℃ ; 6~30mm 板确保终轧温度在 830~890℃ , 实际控制范围一般在 850~950℃。由表 2 可见 , 和正常生产的温度比较 , 试验精轧温度大幅度下降。

重点。试验结果得出 , 材料的铁素体晶粒度达到 9~9.5 级 , 强度水平除部分维持在工业生产平均水平外 , 有些工艺获得的板材强度大幅度上升 , 所有板材的冲击韧性均比正常生产的板材大幅度提高 , 同时具有良好的伸长率。采用 04、06 工艺轧制后的板材 , 铁素体晶粒度达到 9~9.5 级 , 比工业生产厚 20mm Q345 板的组织明显细化 ; 力学性能方面 , σ_s 达到 400MPa 以上 , σ_b 提高到 550~565MPa , $\delta > 27\%$, 稍下降 , 同时冲击韧性保持良好水平。与国家标准比较 , 目前试验所得板材已完全达到同规格 Q390D 要求。结

合表 1、表 2 的工艺方案及现场实测可见，中间坯厚 50mm（工艺 02），精轧开轧温度在 840~850℃，终轧温度 800℃ 左右时，材料的 σ_s 在 355~365MPa（横向）370~380MPa（纵向）， σ_b 为 530~540MPa。当中间坯厚 60mm 时（工艺 03），精轧开轧温度在 830℃，终轧温度为 750℃ 左右，材料的力学性能未发生较大变化，但在此基础上增加精轧道次间水幕冷却（工艺 06）则发生了重大变化，终轧温度降至 740℃，材料的铁素体晶粒进一步细化， σ_s 升至 430MPa 以上， σ_b 达到 560MPa 以上，同时保持良好的伸长率和优良的冲击性能。由此说明，在合适的轧制温度

时，增加精轧道次间水幕冷却对于材料性能的提高具有重要作用。中间坯厚度增至 80mm 时（工艺 04），与工艺 03 的精轧温度基本相同，但是，材料的 σ_s 升至 400MPa 以上， σ_b 达到 550MPa，同时具有良好的冲击韧性和塑性。由此看出，增加中间坯厚度，增加精轧变形量，可有效提高材料的力学性能。对于厚 40mm 的中间坯（工艺 05），待温期间采用空冷，使坯料从心部到表面温度梯度小，均匀化，采用较低的轧制温度，仍可达到较厚中间坯（50~60mm），在没有道次间冷却效果前提下获得的力学性能和微观组织。

表 3 试样微观组织与力学性能

工艺 编号	晶粒 度/级	带状 物/级	屈服强度 /MPa		抗拉强度 /MPa		伸长率 /%		室温冲击 韧性/J		0℃冲击 韧性/J		-20℃冲击 韧性/J		时效冲击 韧性/J	冷弯 性能
			纵	横	纵	横	纵	横	纵	横	纵	横	纵	横	纵	横
01	9.0	3.5	398	402	538	547	33	27	93	41	93	40	80	33	81	30
02	9.0	4.5	378	365	533	538	32	31	159	88	157	66	123	50	122	53
03	9.0	3.0	370	377	533	540	30	29	165	79	147	60	123	45	151	53
04	9.0	2.75	420	403	547	550	30	28	159	72	156	73	122	51	134	54
05	9.5	3.5	378	375	533	538	29	29	167	81	143	58	114	48	127	49
06	9.5	1.5	435	440	565	565	28	27	116	47	100	45	92	36	76	39
正常产品	8~ 12mm 板	8.5	379		529		28	123								
正常产品	8~ 20mm 板	8.5	371		524		28	101								
Q390D 国标： 厚度≤16mm			390		490~		19~	≥34			≥34		≥34			
Q390D 国标： 厚度 16~25mm			370		650		20	(B 级)			(C 级)		(D 级)			
					490~		19~	≥34			≥34		≥34			
					650		20	(B 级)			(C 级)		(D 级)			

对比图 1a 和图 1b，降低精轧开轧温度并采用精轧间强制水冷，即使中间坯和成品板较厚，板材的铁素体晶粒细化仍可达到薄规格板材的水平，并可减轻带状物。对比图 1c、图 1d、图 1e 可见，04 工艺获得的组织比 02、03 工艺的细小，这说明增加中间坯厚度有助于板材的组织细化，对比带状物的评级结果可见，中间坯厚度增加，不仅组织细化而且带状物减轻。图 1f 中的铁素体呈长条状，形成一定的魏氏组织，而图 1d、图 1e 为正常等轴状铁素体。结合相应的工艺制度可见，如果精轧期间中间坯薄，产生魏氏组织的可能性增加，会影响板材的冲击性能。由于 05 工艺的魏氏组织在整个组织中仅占小部分，因此冲击韧性几乎未受影响，但仍应避免出现这种情况。

4 分析讨论

4.1 精轧温度对材料性能的影响

工业试验中，精轧开轧温度在 840℃ 以下，终轧温度为 820~740℃，结合连铸坯的化学成分，根据文献 [5] 提供的图表，确认精轧属于未再结晶区轧制。这一点，根据表 3 中试验材料横纵向强度水平接近这一事实也得到证明。因为在两相区结束终轧，材料的屈服强度横向大于纵向，并且差值将随终轧温度下降而增加。试验板材的强度水平稳定达到工业正常生产的平均至上限水平，并且冲击韧性高于正常生产水平。

对于实验成分的 Q345 钢，材料的未再结晶区相对较小，在较高温度下开始精轧，将进入奥氏体部分再结晶区，材料变形获得的组织缺陷、形变能累积作用小，同时终轧温度较高，奥氏体



图 1 材料的微观组织

a) 01 工艺 ; b) c) 04 工艺 ; d) 02 工艺 ; e) 03 工艺 ; f) 05 工艺

由于变形产生的缺陷易发生回复而进一步减弱形变累积作用，因此发生奥氏体—铁素体相变时，铁素体形核率较小，并且形成的铁素体晶粒易长大。降低精轧温度，有利于形变累积，终轧温度下降，一定程度上减缓了奥氏体组织的回复，使更多组织缺陷、形变能保留至发生相变，促进铁素体晶粒形核，易获得细晶粒组织，从而提高了材料的强度水平。01、03、04、06 工艺的终轧温度在 750℃ 左右，正好在相变前结束终轧，有力地储存了形变能和形变缺陷，促进相变时铁素体晶粒细化，除 03 工艺外，均获得 400MPa 以上的屈服强度。

4.2 精轧道次间水幕冷却对材料性能的影响

06 工艺与 03 工艺形成鲜明对比。相同的精轧温度区间，相同的中间坯厚度，06 工艺在精轧期间增加了 2 次 2 组 2 道水幕冷却，材料的 σ_s 、 σ_b 值大幅度提高，铁素体晶粒进一步细化，采用 Q345B 连铸坯轧制后完全达到 Q390D 的工业标准，略超出 Q420 的工业标准。这充分说明精轧期间水幕冷却的重要作用。与国外相关文献比较，用 06 工艺轧制的中板组织和性能与目前国际水平相差不多。

4.3 成品厚度和性能与轧制工艺的关系

对于厚 12mmQ345 中板，中间坯厚度
· 14 万方数据

30mm，精轧开轧温度在 860℃，精轧期间不采用道次间水幕冷却，终轧后采用 2 组 1 道水幕冷却，材料的铁素体晶粒度达到 9 级， $\sigma_s > 400\text{ MPa}$ ， σ_b 达到 560MPa 左右。

对于厚 20mmQ345 中板，为达到较高强度要求，除终轧后采用更大的水冷强度、2 组 3 道水幕冷却外，还须采取一定的措施。中间坯不超过成品厚度 3 倍时，精轧开轧温度在 850℃ 以下，不采取道次间水幕冷却时， σ_s 可以达到 360MPa 以上， σ_b 可达到 530 ~ 540MPa。另外，如果再具有道次间水幕冷却，可使材料的 σ_s 达到 400MPa 以上， σ_b 达到 560MPa 以上。中间坯厚度为成品厚度 4 倍时，精轧开轧温度在 850℃ 以下， σ_s 、 σ_b 也可分别达到 400、560MPa 以上。

可见，随着成品板厚度的增加，在不添加合金化元素的条件下，为了获得较高的力学性能，轧制工艺也相应复杂且需严格控制。随成品厚度增加，精轧开轧温度下降，并且为防止轧制过程中材料维持较高的温度，必要时应对板坯进行强制冷却。同时，终轧后需尽量实现快速冷却。

5 结论

现场工业实验条件下：

精轧开轧温度严格控制在 850℃ 以下，中间

(下转第 32 页)

受最大卷重限制时，一道立轧后，长度不够，立轧机起不到帮助咬入的作用，此时需增大平辊轧机的轧辊直径。如果采用燃气或步进梁式加热炉，可将高压水除鳞箱布置在立辊轧机之前，缩短立轧机与平轧机之间的间距，立轧机便可起到帮助咬入的作用。

4.3 立轧道次的数量

由于粗轧万能可逆式方案及连续式布置方案均采用平辊轧机，宽展为自由宽展，所以生产普碳钢的车间，至少需3个立轧道次，若生产塑性较差的钢种，则立轧道次还要增加。

4.4 粗轧机组后是否设头（尾）剪切机

根据生产钢种的不同情况，对于普碳钢，粗轧机组后没有必要设头、尾剪切机。对塑性较差的钢种或采用钢锭时，需在粗轧机组后设头（尾）剪切机。

若粗轧机组与中精轧机组形成连轧，则剪切机必须选飞剪。如果粗轧机组与中精轧机组脱头，则采用固定剪即可。

4.5 粗轧机的调宽能力问题

由于目前国内热轧窄带钢立轧机的机型问题，不论采取哪种布置方案，粗轧机调宽能力都

较差，所以一般选择坯料的宽度较成品宽度小20~30mm，利用轧件的自由宽展和调节立轧机开口度将带钢轧成所需宽度。

4.6 与原有中精轧机组匹配问题

由于各个车间中精轧机组轧机能力不尽相同，而且一些机组经多次改造，使得粗轧机组与原中精轧机组参数匹配很复杂。而在与原中精轧机组匹配时，终轧机架出口速度的大小、各机架的最佳速比、最佳中间坯的厚度及最少的中间坯厚度数量问题均与其密切相关。所以新增机组是无条件服从原有设备，还是尽可能统一考虑整个轧线，全面改造成最佳匹配，需根据各自不同情况，因地制宜，区别对待。

5 结束语

随着热轧窄带钢轧机设计、制造技术的不断发展和创新，热轧窄带钢生产工艺和技术已达到相当高的水平，轧制区的布置已完全宽带钢化。若要进一步提高年产量，增大卷重，提高产品质量，开发新品种，须开发新设备和新工艺，如：热卷箱、有芯地下卧式卷取机、层流冷却装置、控制冷却与控制轧制等。

（上接第14页）

坯厚度为50~60mm并采用水幕冷却时，厚20mm Q345中板的铁素体晶粒度达到9~9.5级， σ_s 可达到370MPa， σ_b 达到530~540MPa；精轧开轧温度严格控制在850℃以下，中间坯厚度为40mm，待温期间空冷，厚20mm Q345中板的铁素体晶粒度达到9~9.5级， σ_s 可达到370MPa， σ_b 达到530~540MPa。

精轧开轧温度严格控制在850℃以下，中间坯厚度为60mm并采用水幕冷却，精轧期间采用道次间水幕冷却，厚20mm Q345中板的铁素体晶粒度达到9.5级， σ_s 可达到430MPa， σ_b 达到560MPa。

精轧开轧温度严格控制在850℃以下，中间坯厚度为80mm并采用水幕冷却，厚20mm Q345中板的铁素体晶粒度达到9.5级， σ_s 可达到400MPa， σ_b 达到550MPa。

到400MPa， σ_b 达到550MPa。

参考文献：

- [1] 王国栋. 400MPa级超级钢的开发和利用 [A]. 新一代钢铁材料研讨会(NG STEEL'2001) [C]. 北京: 中国金属学会, 2001. 299~306.
- [2] 杨忠民. 普通碳素钢超细晶组织的形成 [A]. 新一代钢铁材料研讨会(NG STEEL'2001) [C]. 北京: 中国金属学会, 2001. 283~286.
- [3] 范建文. 细晶强化Q345中板的控轧控冷工艺研究 [A]. 第7届轧钢年会论文集 [C]. 本溪: 中国金属学会, 2002. 195~204.
- [4] 杨平. Q235碳素钢应变强化相变的基本特点及影响因素 [J]. 金属学报, 2001, 37(6): 592~600.
- [5] 李曼云, 孙本荣. 钢的控制轧制和控制冷却技术手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.

欢 迎 订 阅 2001、2002 年《轧 钢》杂 志 合 订 本！