

首钢船板钢热轧板卷的生产和使用

刘阳春¹ 徐彬² 武军宽² 李飞¹ 金永春¹ 阳代军¹ 朱国森¹

(1. 首钢技术研究院, 北京 100041; 2. 首钢迁安钢铁有限责任公司, 迁安 064404)

摘要 介绍了首钢迁安公司开发生产船板钢热轧板卷的情况, 分析了批量生产的船板钢热轧板卷的化学成分、力学性能、冶金质量和焊接性能, 对开平矫直船板的残余应力研究进行了阐述。

关键词 船板钢 热轧板卷 开平 矫直 残余应力

Production and Use of Hot Rolled Coil of Hull

Structural Steel at Shougang

Liu Yangchun¹ Xu Bin² Wu Junkuan² Li Fei¹ Jin Yongchun¹ Yang Daijun¹ Zhu Guosen¹

(1. Shougang Technology Research Institute, Beijing, 100041;

2. Shougang Qian'an Iron and Steel Co., Ltd., Qian'an, 064404)

Abstract The production and use of hot rolled coil of hull structural steel at Shougang are introduced in this paper, and the chemical composition, mechanical property, metallurgy quality and weldability of hot rolled coil of hull structural steel volume-produced by Shougang Qian'an Iron and Steel Co., Ltd. are analyzed in detail. In addition the residual stress of cross cut shearing plate is also discussed.

Key words hull structural steel, hot rolled coil, decoiling, straightening, residual stress

1 引言

船板是造船工业不可缺少的原材料, 船板的性能和质量状况越来越受到船东、船厂和船舶设计者的重视。

船板钢历来由中厚板轧机轧制^[1-4]。但是中厚板轧机轧制薄规格钢板(不大于18mm)比较困难: 一方面难以保证薄规格钢板的板形和尺寸, 另一方面轧制薄规格钢板时其产能将大大降低, 因此一般中厚板厂对薄规格钢板进行限制性生产。然而热连轧宽带钢轧机则专用于轧制薄规格钢卷, 开平矫直后钢板具有尺寸精度高、板形质量好、成材率高、生产成本低等优点。在目前的经济形势下, 钢材使用部门为了降低生产成本, 追求利益最大化, 对开平钢板的使用越来越重视, 因此使用开平钢板代替部分中厚板轧机的产品就具有重要的经济意义。

首钢迁安公司2160热连轧宽带钢生产线于2006年12月正式建成投产, 可用于轧制1.5~19mm厚、750~2130mm宽、钢卷最大重量达38t的热轧带钢。首钢迁安公司根据船板市场的需要以及2160热连轧宽带钢轧机和钢卷开平矫直设备的特点, 开发出3~18mm厚度的薄规格开平船板, 并且一次通过了九国船级社对首钢迁安公司各级开平矫直船板生产的认证。大批量生产的开平船板推向市场弥补了国内外各中厚板厂薄规格船板生产能力不足的问题, 降低了船舶制造成本, 也为首钢创造了更多的经济效益。

2 首钢迁安公司的生产条件

首钢迁安公司是首钢服从首都环保大局, 平稳实施首钢北京地区钢铁业压产和搬迁调整规划, 依托首钢

刘阳春, 男, 工学博士, 高级工程师, 从事薄板产品开发工作, E-mail: lyc65525@126.com

迁安矿山基地建成的集炼铁—炼钢—热轧—冷轧—钢材深加工多工序为一体的大型钢铁联合企业。公司炼铁系统现有 2 座 2650m³ 高炉、1 座 4000m³ 高炉,设计年产生铁 767 万吨;炼钢系统现有 5 座 210t 转炉,2 座 LF 钢包精炼炉,2 座 CAS-OB 精炼炉,4 座 RH 精炼炉,4 台双流板坯连铸机,2 台八流方坯连铸机,设计年产钢坯 800 万吨;热轧系统现有 1 条 2160mm 和 1 条 1580mm 热连轧宽带钢生产线,设计年产热轧板卷 780 万吨;冷轧系统包括 2 条常化酸洗生产线、1 条酸轧生产线、3 套二十辊轧机机组、6 条连续退火生产线、3 条脱碳退火机组、5 套高温退火机组,设计年产电工钢 120 万吨;钢材深加工系统现有 2 条开平线,设计年产开平钢板 65 万吨,在建罩式退火炉和酸洗线设计产能分别为 12 万吨和 80 万吨。

迁钢 2160 热连轧宽带钢生产线于 2005 年动工,2006 年 12 月 26 日热负荷试车,年设计生产能力为 450 万吨热轧薄板。主要设备包括 4 座步进梁式加热炉、1 个板坯高压水除鳞箱、1 台压力调宽机、2 个粗轧高压水除鳞箱、1 台二辊可逆式粗轧机、1 台带立辊的四辊可逆式粗轧机、1 个热板卷箱、1 个曲柄式切头飞剪、1 个精轧高压水除鳞箱、6 机架精轧连轧机组(前 3 架为连续可调凸度 CVC 轧机,后 3 架为平辊轧机)、1 套层流冷却装置、2 台地下卧式热卷曲机及相应配套辅助设施、1 套平整分卷机组。

给迁钢 2160 热连轧机提供板坯的炼钢生产线年设计生产能力为 450 万吨钢,装备 3 座单吹颗粒镁脱硫扒渣设施,3 座 210 吨转炉,1 座 LF 钢包精炼炉,2 座 RH 真空精炼炉,1 座 CAS-OB 炉,1 座简易吹氩站;2 台双流板坯连铸机,板坯宽度为 1#机 900~1600mm,2#机 1100~2150mm,厚度为 230mm、250mm,长度为 8000~10500mm。

迁钢 2 条开平线中 1 号开平线的设备和工艺全部从西马克公司引进,2 号开平线为国产设备,设计年产开平钢板分别为 40 万吨和 25 万吨。

3 船板钢热轧板卷的开发

3.1 化学成分设计

GB712—2000《船体用结构钢》国家标准中包括 16 个钢号,截至目前迁钢已经开发生产的有 A、B、D、A32、D32、A36、D36 共计 7 个钢号,其化学成分设计以满足船规和用户要求为基础,以保证钢材性能指标为前提,同时考虑原料条件和降低生产成本。为了提高船板的焊接性能,在船板的化学成分设计上采用了低碳策略,各级船板的化学成分设计如表 1 所示。

表 1 各钢种的化学成分设计

		(%)						
钢号		C	Si	Mn	P≤	S≤	Alt	Nb
A/B/D	标准	≤0.21	≤0.35	0.7-1.20	0.035	0.035	≥0.015	
	判定	0.11-0.15	0.10-0.35	0.90-1.20	0.025	0.020	0.02-0.05	
A32/D32	标准	≤0.21	≤0.50	0.90-1.60	0.035	0.035	≥0.015	
	判定	0.11-0.15	0.10-0.35	1.20-1.50	0.025	0.015	0.02-0.05	
A36/D36	标准	≤0.21	≤0.35	0.90-1.60	0.035	0.035	≥0.015	0.020-0.050
	判定	0.11-0.15	0.10-0.35	1.20-1.50	0.025	0.010	0.02-0.05	0.020-0.040

注: 1. 对于一般强度 A/B/D 级船板, $C_{eq}(\%)=C+Mn/6\leq 0.40$, 对于高强度 A32/D32/A36/D36 级船板, $C_{eq}(\%)=C+Mn/6+(Cr+V+Mo)/5+(Cu+Ni)/15\leq 0.40$ 。

2. 钢中 Cu、Ni 含量应不大于 0.30%, Cr 含量应不大于 0.20%。

3.2 生产工艺

3.2.1 炼钢

根据不同级别船板对质量的要求,迁钢采取两种工艺路线来冶炼船板钢,其工艺流程如图 1 所示。其中,一般强度级别船板可以利用 LF 或 CAS 工艺进行精炼处理,高强度级别船板只能利用 LF 工艺进行精炼处理。

实际冶炼中,严格限制钢中的有害元素、气体及夹杂物含量,控制结晶器液面波动,降低直至消除板坯表面纵裂、横裂、气泡缺陷。

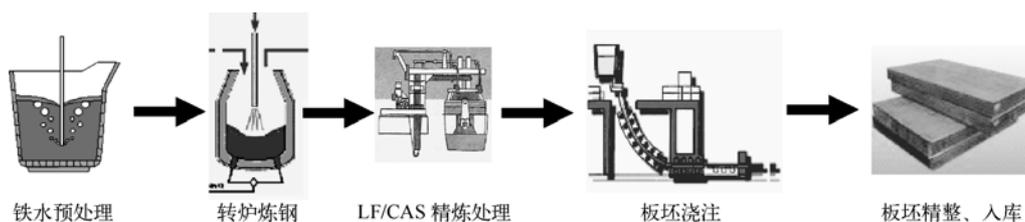


图1 船板炼钢工艺流程

3.2.2 轧钢

加热、轧制和冷却过程严格控制各关键点温度，充分发挥迁钢 2160 热连轧机控轧控冷工艺作用，通过控制变形和温度条件控制船板钢的组织，使轧后的钢板具有优良的强韧性组合。迁钢 2160 热带轧机生产工艺路线如图 2 所示。

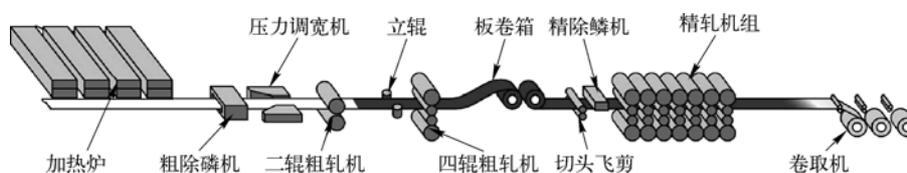


图2 迁钢 2160 热连轧机生产工艺路线

3.3 迁钢船板钢认证

2007 年 7 月首钢迁钢公司船板通过了中国船级社(CCS)、美国船级社(ABS)、挪威船级社(DNV)、法国船级社(BV)、英国船级社(LR)、德国船级社(GL)、韩国船级社(KR)、日本船级社(NK)和意大利船级社(RINA)等九国船级社对迁钢公司各级开平矫直船板生产的认证。

3.4 迁钢船板钢生产业绩

首钢迁钢公司自 2007 年 7 月正式生产船板钢以来，生产工艺成熟，产品质量稳定，船板产量也大幅度上升，2008 年船板生产量为 50.2 万吨，其中中国船级社(CCS)的产量占总产量的 27%；2009 年因金融危机影响迁钢生产船板仅有 1.4 万吨，2010 年恢复为 10.2 万吨。船板厚度为 6~18mm，宽度为 1540~2040mm。

表 2 是首钢迁钢公司 2008 年各钢级船板产量。

表 2 首钢迁钢公司 2008 年各钢级船板产量

(t)

钢号	A	B	D	A32	D32	A36	D36	合计
合计	214522	195073	60	32204	62	58268	1885	502074

3.5 迁钢高强度和高质量等级船用板卷的开发

随着船用钢材向大型化、轻型化方向发展，促使船体结构用钢板的强度和质量等级在不断提高，高强度和高质量等级造船钢板被广泛地用于制造大、中型远洋船舶。大、中型远洋船舶的服役条件较恶劣，特别是在大风大浪和低温条件时，承受着较大的冲击和交变载荷，因此要求船体结构用钢板具有更优良的强韧性、更好的可焊性和更高的表面质量。根据迁钢公司设备和船板生产的特点，开展了 E 级、EH32、EH36 船板钢的研究，成功试制了 E36 高强度和高质量等级船板，目前尚未生产。

4 船板钢热轧板卷的实物质量

4.1 化学成分

表 3 是迁钢公司 2008 年冶炼的各钢级船板的化学成分分布范围和均值。可以看出，各级船板的化学成分控制均达到内控成分要求，硫、磷含量远低于国标规定，极大地改善了钢板内在质量。

表3 各级船板的化学成分

(%)

钢级	项目	C	Si	Mn	P	S	Alt	Nb
A B D	标准值	≤0.21	≤0.35	0.80-1.20	≤0.035	≤0.035	≥0.020	—
	分布范围	0.11-0.15	0.17-0.28	0.94-1.12	0.006-0.22	0.002-0.02	0.02-0.05	—
	平均值	0.13	0.20	1.0	0.011	0.007	0.040	—
AH32 DH32	标准值	≤0.18	0.10-0.5	0.9-1.60	≤0.035	≤0.035	0.020-0.085	—
	分布范围	0.12-0.15	0.18-0.26	1.31-1.49	0.007-0.017	0.002-0.008	0.023-0.050	—
	平均值	0.13	0.20	1.4	0.011	0.004	0.038	—
AH36 DH36	标准值	≤0.18	0.10-0.5	0.9-1.60	≤0.035	≤0.035	0.020-0.85	0.02-0.05
	分布范围	0.12-0.15	0.18-0.24	1.26-1.49	0.007-0.020	0.002-0.012	0.023-0.050	0.024-0.04
	平均值	0.13	0.20	1.3	0.011	0.004	0.038	0.032

4.2 力学性能

表4和表5为2008年全年生产的各级船板的拉伸性能和冲击性能统计结果。可以看出：各级船板的强度、塑性、韧性均能满足标准和用户的使用要求，与国标比较有较大富余。

表4 各级船板的拉伸性能

钢种	项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
A/B/D	标准值	≥235	400-520	≥22
	分布范围	280-390	410-510	23.0-46.0
	平均值	335	460	32.5
AH32/DH32	标准值	≥315	440-570	≥22
	分布范围	325-395	450-515	22.5-39.5
	平均值	350	485	30.5
AH36/DH36	标准值	≥355	490-630	≥21
	分布范围	395-535	510-615	22.0-37.0
	平均值	440	545	27.5

表5 各级船板的冲击性能

钢种	试验温度	0℃			20℃		
	试样尺寸	10×10	7.5×10	5×10	10×10	7.5×10	5×10
A/B/D	标准值	≥27	≥22	≥18	≥27	≥22	≥18
	分布范围	100-369	73-316	59-130	112-330	68-237	61-120
	平均值	253	179	94	229	163	85
AH32/DH32	标准值	≥31	≥26	≥21	≥31	≥26	≥21
	分布范围	143-356	-	-	-	-	-
	平均值	274	-	-	-	-	-
AH36/DH36	标准值	≥34	≥28	≥23	≥34	≥28	≥23
	分布范围	127-367	104-208	58-118	-	-	-
	平均值	230	160	89	-	-	-

4.3 冶金质量

对各级船板的金相分析表明, 迁钢开平船板的冶金质量优良: 组织均为铁素体+珠光体, 沿长度、宽度和厚度方向上的各个部位比较均匀, 晶粒度在 9.0~11.0 之间, 夹杂物级别一般小于 2.0, 带状组织级别一般也小于 2.0。

图 3 是 CCS/D 和 CCS/DH36 船板的金相组织。

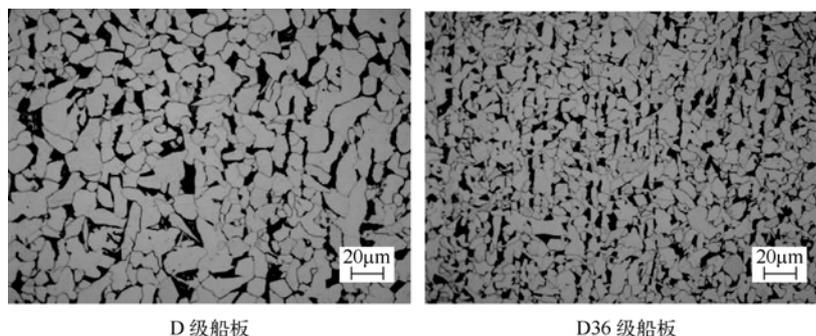


图 3 金相组织 (500×)

4.4 迁钢高强度开平矫直船板的焊接性能

船体结构的建造主要是通过焊接来完成的, 因此船板焊接性能的好坏是保证船舶安全运行的关键。为了考察迁钢公司高强度船用钢板的焊接性能, 按照九国船级社的要求, 对迁钢公司 2160 热连轧宽带钢轧机轧制的 18mm 厚 DH36 级高强度船板进行了焊接性能试验^[5]。焊接试验工艺参数为: 热输入分别为 15kJ/cm、50kJ/cm, 相应的焊接速度分别为 600 mm/min 和 210mm/min; 每两个 18mm×250mm×1000mm 试板进行对接焊焊接, 焊缝分别垂直于轧制方向或平行于轧制方向; 焊丝和焊剂为 CHW-S3/CHF101, 焊丝直径为 $\phi 4.0\text{mm}$; 焊接设备为自动埋弧焊, 采用 K 坡口, 坡口为 50°; 焊接电压 30 V, 焊接电流 550 A。

焊接后对 DH36 级高强度船板焊接接头所做的理化分析结果表明, 焊接接头具有较高的强度和优良的韧性, 拉伸断裂位置均在母材部位, 对焊接接头进行的 180°正弯和背弯试验均未出现开裂, 热影响区的冲击功与母材一致, 两种焊接能量焊接的 DH36 级船板性能基本一致, 不同焊接热输入焊接接头具有一致的力学性能, 焊接热输入值对焊接性能的影响不大, 因此迁钢公司开发的 DH36 级造船用钢具有良好的焊接性能, 焊后各项性能均满足船规和船舶制造的要求。

5 开平矫直船板的残余应力

5.1 残余应力的消除与调整

残余应力的消除与调整主要有热处理和机械矫直两种方法。

热处理即通常的退火和正火法, 只要退火或者正火温度和时间适宜, 残余应力是可以完全消除的, 但与此同时却会造成材料力学性能下降和组织变化, 成本也增加较多。

机械矫直工艺是利用材料内产生的塑性变形来达到减低残余应力和重新分布残余应力的目的。采用这种方法想把残余应力完全消除却是不可能的, 其主要目的是应力的松弛和重新分布。但是用机械的方法不会使性能下降, 而且不需要热处理炉之类的设备, 从实用的角度上看是经济的。

研究表明, 矫直能够消除带钢长度方向上的曲率, 矫直钢板; 而且如果方法得当, 在一边减少曲率, 一边进行反复弯曲后, 带钢表面的残余应力能够得到相当大的松弛乃至重新分布并均匀化, 平直的钢板纵切后切条可以不发生翘曲或者基本上不会发生翘曲^[6]。

因此针对热轧板卷开平矫直后开平板出现的旁弯、翘曲等板形质量问题, 可以进行矫直工艺参数对残余

应力影响的研究, 这些参数包括辊式矫直机各辊的压弯挠度与压弯量、辊缝值、各矫直辊矫直力、不同弯辊凸度值等。

迁钢 2160 热连轧机轧制的船板钢均是钢卷, 须开平矫直切割成钢板后方能使用。开平矫直船板中残余应力的分布和切割下料后钢板的变形问题是制约开平矫直船板应用的一个关键性问题, 引起了各船级社、开平船板生产企业和造船厂的广泛关注。目前开平船板一般仅用于小型船舶的制造和大中型船舶的修补, 而大中型船舶的制造并不使用开平板。

首钢针对热轧板卷开平矫直工艺进行了大量的研究工作, 通过高强度钢板矫直过程中的残余应力值测试和矫直工艺研究, 分析矫直工艺与钢板残余应力分布之间的关系, 初步探讨产生钢板残余应力分布不均的原因, 对矫直工艺进行优化, 设法消除最终成品板翘曲、旁弯等现象, 以满足用户更高的使用要求。通过调整矫直工艺, 可以均匀和部分消除开平钢板中的残余应力, 初步解决了矫直钢板剪切后变形的问题, 并将开平矫直船板应用于船舶制造上。

5.2 残余应力测试

残余应力的测量有多种试验方法, 目前应用最多的是小孔法(钻孔法)。

小孔法的测量原理是: 在应力场中钻一小孔时, 应力的平衡将遭到破坏, 钻孔周围的应力场将重新分布以达到新的平衡, 这样钻孔周围将产生应变, 测量钻孔附近的应变变化, 就可用弹性力学知识推算出小孔处的应力。研究表明, 小孔法的测量结果较为准确^[7,8]。

为衡量迁钢公司船板开平后的残余应力分布和消除情况, 采用小孔法对船板中残余应力的分布情况进行了测试, 试板尺寸为 8mm×2000mm×2000mm, 测点布置如图 5 所示, 测量钢板上、下表面在宽度方向和长度方向残余应力的分布, 分析钢板上下表面残余应力的分布特点。

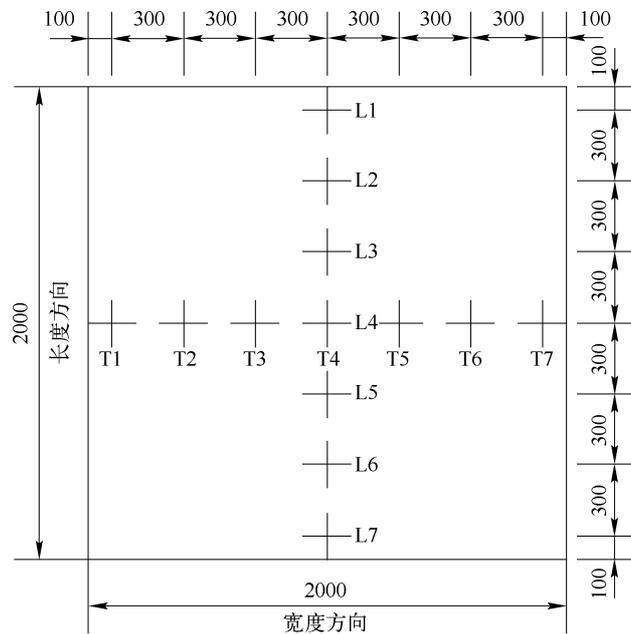


图 4 残余应力测点布置

图 6 和图 7 分别为 18mm 厚 DH36 级船板上表面和下表面的残余应力分布。从图中可以看出总体应力分布比较均匀, 上表面宽度方向的残余应力在 20~130MPa 之间, 长度方向的残余应力在 10~130MPa 之间; 下表面宽度方向的残余应力在 -110~40MPa 之间, 长度方向的残余应力在 -5~85MPa 之间。

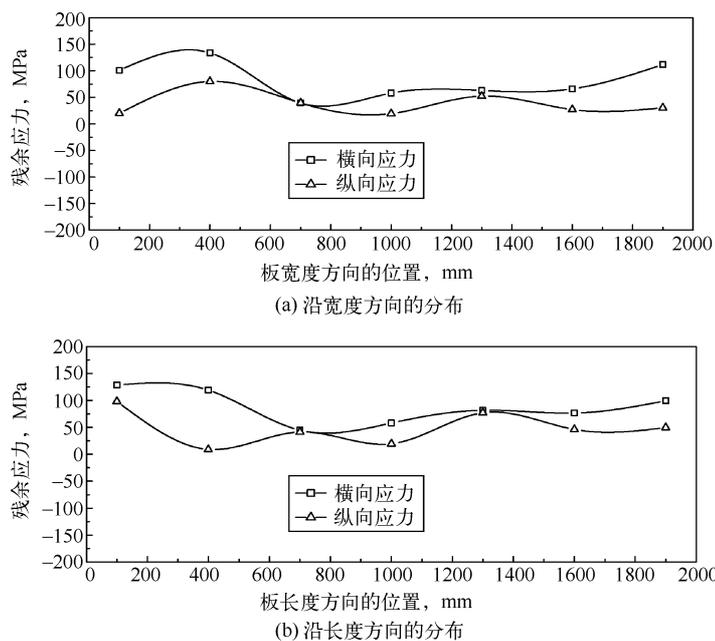


图 5 DH36 级船板上表面残余应力分布

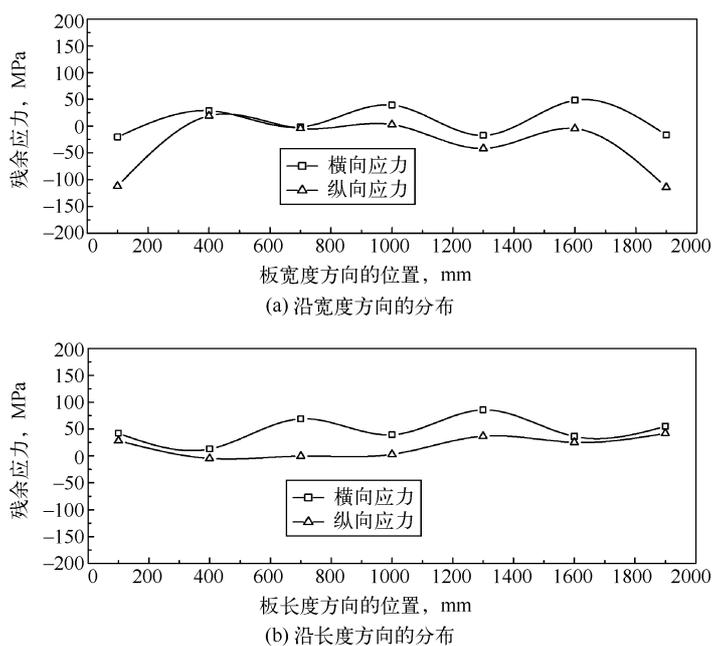


图 6 DH36 级船板下表面残余应力分布

表 6 为国内某中厚板厂生产的 Q345C 钢板的残余应力测试结果，不难看出，最大应力达 172MPa，比较首钢开平矫直船板中的残余应力，基本上在同一应力水平，因此通过矫直使首钢开平船板的应力状况得到了极大的改善，达到了中厚板轧机生产的钢板的残余应力状态。

表 6 中厚板中的残余应力

样号	材质	规格/mm×mm×mm	测点	纵向残余应力/MPa	横向残余应力/MPa
1	Q345C	12×2200×9650	1	76	121
			2	172	115
2		16×1800×8450	1	81	35

5.3 切条试验

残余应力的测量费时费力,很不方便,可以采用开平板切条试验来评估开平板的矫直效果^[9]。试验方法是:从开平钢板上切取 100mm×2000mm 的长条样,切割前,在每个 100mm×2000mm 的长条样中间划定位线,如图 7 中虚线所示,切割完成后测量定位线的侧弯量 B 和横弯量 H ,如图 8 所示。

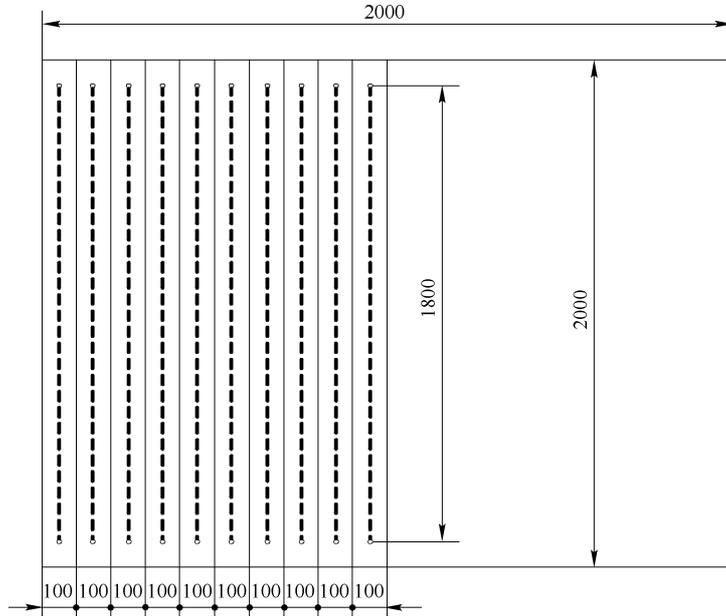


图 7 切割示意图

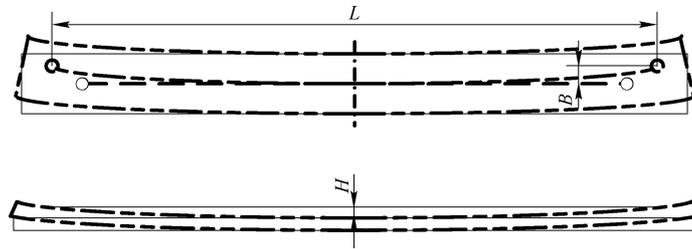


图 8 定位线的侧弯 B 和横弯 H

为避免采用火焰切割钢板导致切缝处金属受热膨胀,板条张开,产生明显的测弯,必须采用等离子切割方式。

图 9 是部分开平船板采用等离子切割方式切割后板条的照片。



图 9 部分开平船板采用等离子切割后的板条照片

表 7 是部分船板切割后切条的测量数据,可以看出几乎没有侧弯和横弯:侧弯数值分布为 0~3mm,横

弯数值分布为 0~5mm, 说明船板在开平矫直后不存在较大的残余应力, 矫直效果比较好。

表 7 2 块船板切割后切条的侧弯和横弯 (mm)

钢种	CCS/D		CCS/DH36	
规格 /mm×mm×mm	6×1400×2000		18×2000×2000	
切条编号	侧弯 B	横弯 H	侧弯 B	横弯 H
1	2	0	3	1
2	1	2	3	2
3	3	4	0	2
4	3	0	3	4
5	0	0	3	5
6	0	4	3	2
7	0	0	0	3
8	1	0	3	2
9	—	—	0	4
10	—	—	2	3

首钢选择不同钢级、不同厚度的船板进行了大量切条试验, 将切条变形与开平矫直工艺联系起来, 证明只要开平矫直工艺得当, 则开平矫直船板切割后 100mm×2000mm 长条样的侧弯可以控制在 3mm 以下, 横弯控制在 5mm 以下, 可以完全满足用户对船板切割下料后的要求。

6 结论

首钢迁钢公司根据船板市场的需要以及 2160 热连轧宽带钢轧机的特点, 开发出薄规格船板钢热轧板卷, 开平矫直后提供给用户使用。各钢级船板钢的化学成分和力学性能完全满足国家标准和各国船级社船规的要求, 开平矫直后钢板中不存在较大的残余应力, 矫直效果良好, 解决了开平船板切割下料后变形严重的问题, 使开平船板能被各大船厂所接受, 提高了迁钢船板的附加值, 提升了迁钢公司船板的市场竞争力, 为首钢创造了更多的经济效益。

参 考 文 献

- [1] 帅奇. 浅谈我国船舶工业中厚板用钢的生产与营销实践[J]. 冶金信息导刊, 2005, (5): 5~8.
- [2] 牛琳霞. 我国船舶用钢的需求分析[J]. 武钢技术, 2006, 44 (5): 48~50.
- [3] 朱岩, 丁建华. 宝钢船板钢的开发和生产[J]. 轧钢, 2007, 24 (增刊 1): 222~224.
- [4] 龚红根, 肖榕, 杨淞波, 等. A32 和 A36 船板开发过程中存在的主要问题及消除措施[J]. 江西冶金, 2006, 26 (5): 17~20.
- [5] 阳代军, 陈延清, 李飞. D36 级高强度造船用钢板焊接性能的分析[J]. 焊接, 2008, (4): 17~21.
- [6] 肖承香. 热连轧钢板纵切条时产生翘曲现象的初探及消除措施[J]. 宝钢技术, 2000, (3): 1~5.
- [7] 林丽华. 残余应力测量技术现状及其发展动向[J]. 机械, 1998, 25 (5): 46~49.
- [8] 陈会丽, 钟毅, 王华昆, 等. 残余应力测试方法的研究进展[J]. 云南冶金, 34 (3): 52~54.
- [9] 阳代军, 马耀峰, 徐彬. 首钢开平矫直船板切割变形和焊接变形的分析[C]//第七届(2009)中国钢铁年会论文集(第4卷): 108~114.