

AG700L 高强度热轧宽带钢板形缺陷分析与工艺改进

曹树卫 闫宁 陈全

(安阳钢铁股份有限公司第二炼轧厂, 安阳 455004)

摘要 对高强热轧宽带钢 AG700L 开平后的板形缺陷进行了详细分析, 讨论了精轧出口带钢板形和温度均匀性对开平板形的影响, 分析了层流冷却系统中水比、侧喷、冷却模式、边部遮蔽对开平板形的影响以及优化措施。结果表明: 带钢经过层流冷却时边部温降过快造成的边部压应力在开平后得到释放, 是造成开平后板形缺陷的主要原因; 通过优化水比为 1 : 1.35、优化侧喷角度并提高压力至 2.0 MPa、改进冷却模式、使用边部遮蔽可以提高层流均匀化冷却效果并解决开平后的板形缺陷问题。

关键词 高强带钢 板形缺陷 应力 层流冷却

Analysis and Process Improvement of Flatness Defects of High Strength Hot Rolled Wide Strip Steel AG700L

Cao Shuwei, Yan Ning and Chen Quan

(No. 2 Steel Making & Rolling Plant, Anyang Iron and Steel Group Co., Ltd., Anyang 455004)

Abstract The flatness defects of high strength hot rolled wide strip steel AG700L after uncoiling are analyzed in detail. The influences of strip shape and temperature distribution after finishing rolling are discussed, and the influences of the ratio of upper and lower water flow, side spray, cooling methods, edge masking on uncoiling plate and optimization measures are also analyzed. The results show that the main reason of the flatness defects after uncoiling is due to release of the compressive stress caused by the temperature drop of strip edge. The flatness defects could be effectively controlled by optimizing the ratio of upper and lower water flow to 1 : 1.35 and the angle of side spray, increasing the pressure of side spray to 2.0 MPa, improving the type of cooling and using the edge masking.

Material Index High Strength Strip, Flatness Defects, Stress, Laminar Cooling

随着国民经济的不断发展, 对热轧产品多样化的需求日益增长, 要求钢铁企业不断研发新产品并提高产品质量以满足需求。

高强汽车用大梁钢 AG700L 为安钢热连轧生产线面向商用汽车用钢轻量化的重要品种。其工艺路线为铁水预处理-150 t 转炉-LF 精炼-双流板坯连铸机-1780 热连轧。由于在后续的加工中要承受复杂的变形条件和焊接过程, 为防止开裂和变形, 对性能和板形要求异常严格。为得到细小均匀的最终组织 (F + P), 满足复杂的变形和焊接条件, 工艺上对轧后钢带采用集中快速冷却的方式。这种冷却方式对层流的冷却均匀性和冷速均要求较高, 为提高层流冷却的均匀性与冷却能力, 安钢公司 1780 热连轧生产线对层流冷却进行了改造升级。在改造后的调试过程中, AG700L 钢在用户开平后出现批量板形缺陷问题。由此造成的质量异议, 增加了处理成本, 严重影响了产品质量。

关于热轧钢带板形问题的研究, 不少学者针对微中浪轧制、层流均匀化冷却、边部遮蔽技术、热力-相变耦合有限元分析等方面进行了研究并取得

了一定的成果^[1-6]。其中, 微中浪轧制作为一种缓解板形缺陷的方法已经得到广泛应用, 但是, 对于开平后板形缺陷的成因和应对措施, 并没有较多的文献可以参考。本文针对热轧钢带的板形问题, 结合层流设备的改造和调试后遇到的突出问题, 探讨了热轧宽带钢开平后板形缺陷的成因和工艺改进措施。

1 板形缺陷的成因分析

1.1 开平后板形缺陷情况

钢厂通过在开平厂跟踪 700 MPa 级别高强汽车钢开平后板形缺陷 (如图 1 所示), 发现缺陷类型主要分为两类, 一类是较薄规格 (主要规格为 5 mm × 1 500 mm) 带钢在开平切分后出现边浪; 另一类是较厚规格 (主要规格为 8 mm × 1 420 mm) 带钢在开平纵切后出现侧弯, 侧弯的位置为带钢的边部且越靠近边部的切分条, 弯曲量越大, 弯曲的方向为向外侧鼓肚。具体的缺陷情况如表 1 所示:

1.2 开平后板形缺陷分析

有研究表明^[7-8], 在轧后板形平直的条件下, 开平后板形缺陷的直接原因是钢带内应力的不均匀分布在开平后得到释放的宏观表现。

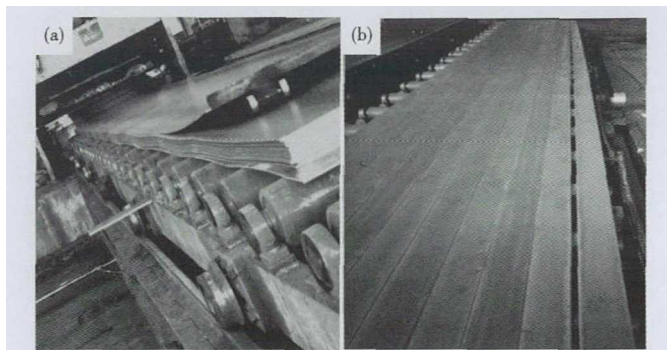


图 1 高强汽车大梁钢开平后板形边浪缺陷(a)和侧弯缺陷(b)
Fig.1 Edge waves (a) and Lateral bending (b) defects of high-strength automobile beam strip after uncoiling

表 1 高强汽车大梁钢开平后的板形缺陷

Table 1 Flatness defects of high-strength automobile beam strip

项目	规格	
	5 mm × 1 500 mm	8 mm × 1 420 mm
缺陷类型	边浪	侧弯
不平度/侧弯量	最大 70 mm	最大 50 mm
后果	辊压成型后不平直、焊接困难	扭曲、无法焊接使用
特点	可能是单边浪,也可能是双边浪	边部产生,越靠近边部切分条的弯曲量越大,向外侧鼓肚
轧机出口板形	平直度良好	平直度良好

内应力包括组织应力和热应力。组织应力是指在材料相变过程中,不均匀的相变引起体积膨胀收缩而产生的应力。热应力是指由于材料内部温度分布不均匀,造成不同区域的热胀冷缩而产生的应力。有研究表明^[9],在同等温差下,由不均匀相变引起的组织应力要远大于由于温差引起的热应力。因此,温度不均匀引起的组织应力在钢带的内应力分布上占主导作用。

带钢温度的均匀性包括 3 个方面:横向(垂直于轧制方向)温度的均匀性、纵向(轧制方向)温度的均匀性、厚度方向(垂直于钢板表面)温度的均匀性。其中,横向温度均匀性与厚度方向温度均匀性对最终板形具有重要的影响^[10]。

通过分析开平后边浪的产生位置和特点可以得出,在生产过程中,由于带钢边部区域温降过快,产生了较大的压应力并超过了材料的屈服下限。由于成卷后张力的拉伸作用,边部浪形并未显现。在开平切分后,张力消失

引起钢带纵向收缩,最终使浪形显现出来。具体过程分析如图 2 所示。

通过分析纵切后发生侧弯的位置和方向得出,在生产过程中,由于带钢边部区域温降过快,边部产生了压应力且越靠近边部压应力越大,成卷时由于钢带厚且宽,在未切分时应力不足以使钢带产生弯曲。纵切成条后,变形抗力减小,压应力得到释放从而使切分条产生侧弯。而且由于越靠近边部,温降越大,因此应力值也越大。所以钢带边部侧弯缺陷最严重。具体过程分析如图 3 所示。

综上所述,造成高强钢开平后浪形和侧弯的共同原因为钢带边部存在较大的压应力。带钢在经过层流冷却时的边部温降过大,是引起边部压应力过大的根本原因。因此,研究层流的均匀化冷却特别是如何控制边部温降,对解决开平后板形缺陷问题具有重要意义。

2 工艺改进

2.1 精轧出口板形与温度均匀性

关于精轧出口浪形与成品浪形的对应关系,有相关研究表明,不同的精轧出口板形与层流出口板形不能够一一对应,这是因为层流冷却对板形产生了重要影响^[11]。目前微中浪轧制已经得到广泛实践和应用,这对缓解板形问题具有一定作用,但是在实践中发现,通过加大微中浪无法消除因层流冷却不均和边部温降过快所引起的板形缺陷。因此,微中浪轧制的作用是非常有限的。而且,微中浪轧制需要操作人员手动增加末机架弯辊力,标准无法统一,无法保证板形质量的稳定性。

精轧出口带钢温度均匀性也是影响带钢板形的因素之一,主要表现为带钢冷却前的温度差异影响相变过程。为了减缓带钢在经过层流冷却时边部温降过快的趋势,采取让精轧出口带钢边部 150 mm

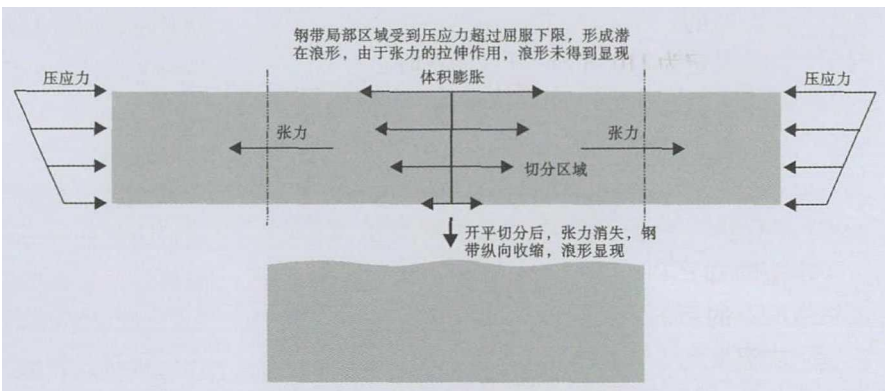


图 2 开平后边浪缺陷分析示意图

Fig. 2 Analysis diagram of defects of edge waves after uncoiling

区域保留有约 30 ℃ 高温区域的做法,可以在一定程度上缓解层流冷却过程中的边部温降趋势。这种做法在层流改造前实际效果良好,在层流改造后虽然保持了这一做法,但板形缺陷问题仍然批量出现,因此该方法无法消除边部温降过快产生的压应力。

由此可知,精轧出口微中浪轧制和边部高温区的控制对于缓解由于边部冷却过快造成的板形缺陷有一定作用,但无法从根本上解决板形缺陷问题。

2.2 层流冷却系统

层流冷却系统作为轧后冷却的关键设备,决定了带钢的最终组织。由于层流冷却不均引起的内应力决定了带钢的最终应力分布并可能引起开平后板形缺陷。

2.2.1 层流冷却水比

层流冷却水比指的是层流上喷和下喷水流量比。一般情况下,层流上集管的水在冷却时由于受重力加速的作用,在喷达带钢上表面时会产生一定的冲击力,产生较好的热交换效果和冷却效果;而层流下喷冷却时,受到重力减速的作用,与上喷相比对钢带下表面的冲击力减小,冷却效果变差,因此在设定冷却水比时下喷流量要大于上喷流量,才能保证钢带上下表面有均匀的冷却效果^[12]。

在实际生产中,由于安钢公司 1780 热连轧层流上喷结构为 4 根喷嘴组成 1 组,每组共用一个进水管,每根单独对应一个截止阀,而下喷流量固定。因此,当冷却时,上喷的 4 根喷嘴全开时的实际流量要小于部分开启,这样会造成实际水比发生变化,进而影响冷却效果。在定好最优水比为 1 : 1.35 以后,必须把上喷流量的变化考虑到实际控制当中。上喷单根集管流量设定为 110 m³/h,开启两根时上喷流量衰减为约 210 m³/h,4 根全开时,流量衰减为约 390 m³/h。根据此规律,需调整下喷流量以维持水比不变。部分层流冷却模式对应水比如表 2 所示。

2.2.2 侧喷

层流冷却是利用水与钢带之间的热交换,达到对钢带降温的目的。当冷却水与高温钢带接触时,根据钢带温度的不同,热交换过程可以分为 3 个阶段:在高温时(钢带温度 > 500 ℃),发生膜沸腾,即冷却水与钢带上表面之间存在一层高温蒸汽

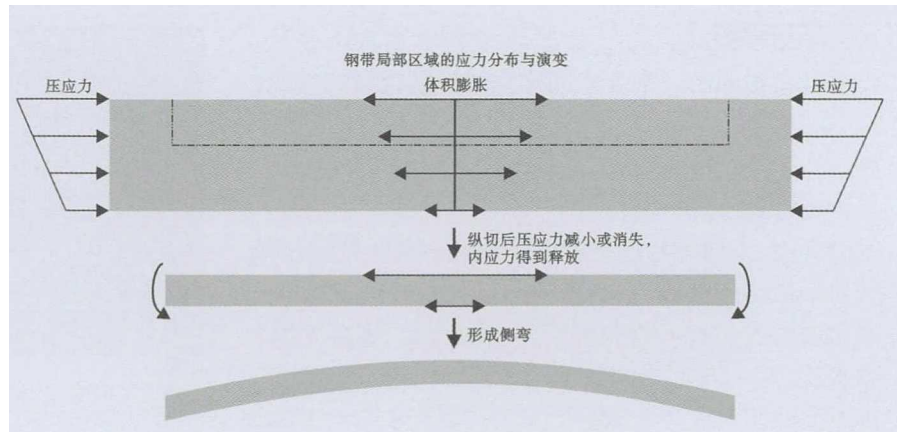


图3 开平后侧弯缺陷分析示意图

Fig. 3 Analysis diagram of defects of lateral bending after uncoiling

表2 开关数量对应的水流比

Table 2 Switch number and appropriate ratio of water flow

层流代码	开关数量	上喷单根流量/ (m ³ · h ⁻¹)	下喷单根流量/ (m ³ · h ⁻¹)	理论水比	实际水比
X	全开时	110	141	1 : 1.28	1.36
Y	每组开启 1/2 时	110	132	1 : 1.20	1.35

膜,相当于在水与钢带之间多了一个隔热层,这样严重影响了冷却水与钢带之间的热交换;在低温时(钢带温度在 100 ~ 300 ℃),发生核沸腾,即冷却水与钢带之间不存在气膜,能够直接热交换,冷却效率比较高;在中温阶段(钢带温度在 300 ~ 500 ℃),发生过渡沸腾,此时膜沸腾和核沸腾同时存在于钢带的不同部位,产生了极不均匀的冷却效果,对板形有极其不利的影响^[13]。

层流侧喷水的作用是把钢带上表面的存水吹扫掉,一方面为了去除发生膜沸腾的蒸汽膜,保证后续的上喷水能够直接落到钢带表面;另一方面为了避免钢带存水,防止造成过渡沸腾冷却状态。因此,侧喷对保证层流水对钢带的热交换及冷却效果至关重要。

侧喷的优化是要设置合理的喷射角和喷射压力,保证侧喷对钢带的覆盖面和吹扫效果。在安钢公司 1780 热连轧层流改造的过程中,原先的侧喷存在角度不理想、覆盖面不够、侧喷压力小且堵塞频繁的问题。改造后,采用更大覆盖面的三喷嘴,并调整合理的喷射角度,保证了侧喷水对钢带表面全覆盖且避免侧喷水直喷钢带的边部;通过更换侧喷泵,把压力从原来的 1.2 MPa 左右提高到 2.0 MPa 以上,保证了侧喷的吹扫压力;通过对侧喷水进行定期反洗,去除循环水中的杂质,防止侧喷堵塞。在改进优化后,侧喷对带钢上表面的吹扫作用明显增强,能够把带钢上表面存水完全吹扫掉,效果良好。

2.2.3 冷却模式

冷却模式即层流出水方式,它包括出水顺序和出水量。不同的出水方式同样会对带钢板形产生较大的影响,这是容易被忽略的一点。安钢公司 1780 热连轧生产线的特点是品种类型多,一个轧制单元从烫辊材到主轧材会出现若干个不同品种。不同的厚度规格、不同牌号的钢种由于性能要求的差异,必然要采用不同的冷却模式。在这种条件下,一方面出水量的变化会影响到侧喷的吹扫效果、实际水量和水比;另一方面,出水顺序不合适时,可能造成带钢表面滞留水。

为了解决上述问题,在不影响性能的前提下,一方面把集中冷却调整为稀疏冷却,尽量使侧喷前后喷嘴不出水;另一方面把出水顺序调整为每组从后往前开,即冷却时需要加水时,先加后段水,避免前段水滞留钢带表面影响后段水与带钢的热交换。优化前后的层流冷却模式如表 3 所示。

2.2.4 边部遮蔽

层流边部遮蔽作为减小带钢边部温降的重要措施,被许多中厚板和热连轧生产线应用^[14]。由于考虑到边部遮蔽只能遮挡上表面边部冷却水,可能造成边部上下表面冷却水量不匹配,故一开始并未使用。通过优化水比、侧喷;冷却模式后,虽然 AG700L 钢批量开平板形缺陷有所减少,但是仍然未完全消除,因此决定投入使用。使用边部遮蔽后,可以观察到带钢在

表 3 优化前后部分层流冷却模式

Table 3 Laminar flow cooling mode before and after optimization

层流代码	开关数量	开关顺序
X(优化前)	1-19 组全开	从前到后
Y(优化后)	1-17 组关开开开开开开; 18-19 组关	1-17 组每组从后到前, 整体从前到后

参考文献

- [1] 苏艳萍,杨 莹,何安瑞,等. ASPI700 热轧层流冷却过程中影响板形变化的热应力求解[J]. 钢铁,2008,43(5):55-60.
- [2] 张 艺,李洪波,余志龙. 热轧层流冷却对带钢板形的影响仿真分析[J]. 冶金设备,2015,36(5):27-31.
- [3] 余 伟,王乙法,李明辉,等. 热轧带钢层流冷却的离散化边部遮蔽策略研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(11):147-153.
- [4] 白丽杨,夏小勇,孙照阳,等. 边部加热器对低碳软钢产品性能的影响[J]. 安徽冶金科技职业学院学报,2018,28(4):30-32.
- [5] 严 政,程树森. 层流冷却过程中带钢温度场及其影响因素的研究: Baosteel BAC 2013 论文集[C]. 上海:中国宝钢集团,2013.
- [6] 李双宏,王 聪,秦 强,等. 热轧带钢层流冷却控制方法[J]. 计算机工程与应用,2015,51(23):236-238.
- [7] 卞 皓,邵 健,夏小明,等. 基于有限元和试验的热轧带钢残余应力减量化的[J]. 钢铁,2016,51(11):49-54.
- [8] 叶玉娟,周旭东,李 俊,等. 连续退火炉内带钢的张力分布及瓢曲分析[J]. 锻压技术,2010,35(3):131-134.
- [9] 陈银莉,余 伟,苏 岚,等. 热轧带钢层流冷却过程中残余应力

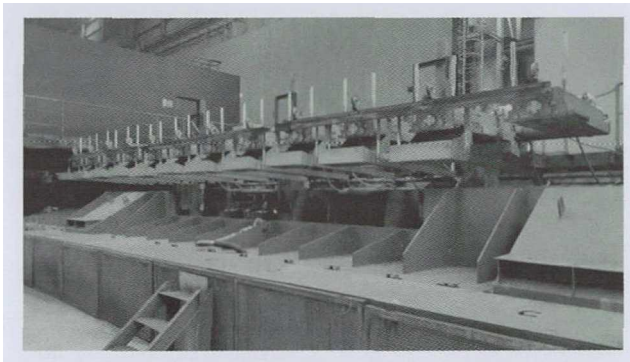


图 4 层流冷却边部遮蔽设备示意图

Fig. 4 Sketch of laminar flow cooling edge masking equipment

层流冷却过程中边部 150 mm 区域内出现明显发红发亮的情况。通过测量层流出口带钢温度分布,边部实际温度高于中心区域约 15 ℃。通过跟踪后续带钢的开平后情况,板形缺陷问题基本消除。

图 4 为层流冷却边部遮蔽设备示意图。

3 结论

(1)造成高强汽车钢 AG700L 开平后边浪和纵切后侧弯的共同原因是钢带经过层流冷却时边部温降过快,不均匀相变造成边部压应力过大,在开平后应力得到释放所引起。

(2)通过优化精轧出口带钢的微中浪和温度分布(边部高温),可以缓解板形问题,但无法从根本上消除开平后板形缺陷。

(3)层流冷却对钢带板形至关重要,通过优化水比使之稳定在 1:1.35、提高侧喷压力至 2.0 MPa 以及优化冷却模式,能够提高层流冷却的均匀性,减少开平后板形缺陷。

(4)通过边部遮蔽的使用,可以有效减缓带钢边部温降,并与其它优化措施相结合后,基本上消除开平后的板形缺陷。

分析[J]. 材料热处理学报,2010,31(6):155-160.

- [10] 白锦函,孔德南,李 娜,等. 安钢低碳贝氏体钢生产的板形控制[J]. 四川冶金,2011,33(5):29-31.
- [11] 滕洪宝,王晓东,程 洋,等. 热轧高强钢冷却板形控制技术的研究[J]. 锻压技术,2017,42(8):50-53.
- [12] 单修迎,郭连济,郭立平,等. 济钢 1700 层流冷却关键参数优化[J]. 山东冶金,2013,35(4):25-28.
- [13] 王国栋. 均匀化冷却技术与板带材板形控制[J]. 上海金属,2007,29(6):1-5.
- [14] 邓 鑫. 带钢层流冷却过程中边部遮挡技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.

曹树卫(1976-),男,博士(2011年北京科技大学),教授级高级工程师,1999年武汉科技大学(本科)毕业,连铸连轧工艺研究和组织控制。E-mail:caoshuwei2007@163.com

收稿日期:2019-12-25