DOI: 10.3969/j.issn.1000-6826.2024.06.0302

热轧带钢为什么会翘曲？——成因分析与控制方法实践

Influence of Warpage of Hot-rolled Strip and Its Improvement Practices

供稿|郭立合[1]，王超[2]，于千[1]，张国海[1] / GUO Lihe[1], WANG Chao[2], YU Qian[1], ZHANG Guohai[1]

内容导读

在热轧带钢生产过程中，即使各类检测仪表显示数据正常，钢带在开卷后仍频繁出现翘曲、皱褶等板形缺陷，尤其在薄规格带钢的头尾部分更为明显。这类问题不仅影响后续冷轧工序的焊接质量，还会导致用户反馈的“横折印”等质量问题。研究表明，带钢在卷取后的冷却阶段，由于宽度方向上温度分布不均，内部会产生显著应力。当该应力超过材料的屈服极限，就会发生塑性变形，并在室温下形成残余应力，最终表现为翘曲。为系统评估该问题，本文引入了“翘曲度”这一指标，通过实验分析不同工艺参数（如喷水比例、板凸度、卷取张力等）对翘曲行为的影响。基于现场数据与力学分析，提出了包括优化层流冷却模式、调整喷水比例、实施微中浪轧制策略等一系列改进措施。实践表明，这些方法可显著降低翘曲度，提升带钢板形质量，为热轧生产中的翘曲控制提供了可靠的理论依据和实际应用方案。

钢铁行业作为国民经济的基础产业，其绿色低碳高质量发展对实现碳达峰及碳中和具有重要意义。尽管我国热轧板带产品基本满足经济建设各领域的需求，但钢板表面质量问题始终困扰着工程技术人员，难以满足高端市场的要求。热轧带钢生产全程处于高温环境，轧制过程中板形的优劣直接影响产品质量，而热轧带钢板凸度为衡量板形质量的重要指标[1-4]。在轧制过程中，金属发生塑性流动，精轧出口的多功能仪表可以反馈平直度及板凸度等指标。在工业化热轧过程中，由于轧制在高温下进行，实际测量时钢板处于常温环境，这种温度差异导致检测结果与过程控制存在偏差[5]。在热轧后的冷却过程中，钢板不同位置的应力状态也不同，进而影响钢板的残余应力分布，最终对钢板板形造成直接影响。本文重点分析开卷后钢板出现翘曲的影响因素，并提出针对性解决措施，为后续工业化生产提供理论依据和技术支持。

翘曲产生原因分析

缺陷状态

产品实际使用过程中发现，2.0~4.0 mm 厚度的

作者单位：1. 鞍钢集团本溪北营钢铁（集团）股份有限公司轧钢厂，辽宁　本溪　117000；2. 辽宁科技大学材料与冶金学院，辽宁　鞍山　114051

钢卷在开卷后的 100 m 内，头部出现严重翘曲现象。经矫平处理后，钢板表面出现严重的皱褶，但随着开卷长度增加，褶皱情况逐渐减轻。此缺陷不仅会影响冷轧工序的焊接过程，还会导致下游用户反馈的横折印问题。为了定量表征不同规格钢板的翘曲程度，引入翘曲度的概念[6]，其表达式为

$$\psi = \frac{\delta^2}{BH} \tag{1}$$

式中，ψ为翘曲度，δ、B、H分别为带钢在宽度方向的弯曲挠度、带钢宽度及带钢厚度。钢板翘曲示意及实物缺陷示意图分别如图 1~2 所示。

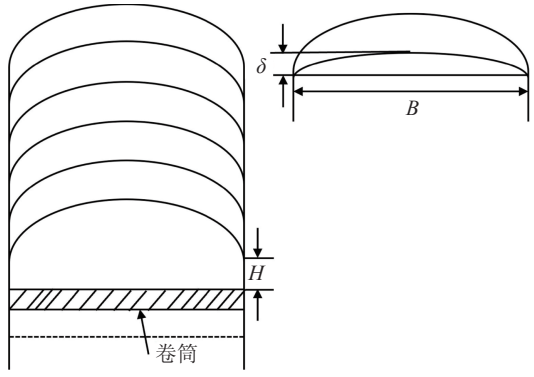


图 1　钢带累加及翘曲程度示意

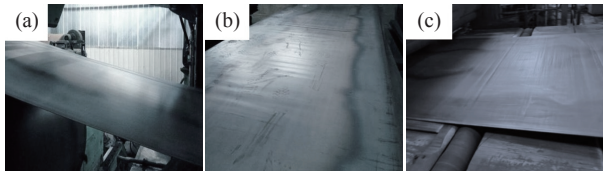


图 2　钢板开卷后缺陷：(a) 翘曲状态；(b) 剪切后横折印；(c) 矫直后横折印

以北营轧钢厂 1780 产线层流冷却及卷取工艺布置为例，研究钢板的翘曲过程。冷却工艺参数及现场布置示意分别见表 1 和图 3。

表 1　冷却工艺参数

上下集管/组	侧喷水/组	上部总水量/(m^3/h)	下部总水量/(m^3/h)	水压/(N/cm^2)	水温/℃
21	23	5980	7195	0.415	≤35

钢卷打开后，带钢表面压力释放导致横向弹性回复。根据相关理论，在弹性回复过程中钢板的卸载力矩等于弹复力矩，由此可以得到钢板弹性回复后的曲率。由基本力学原理可知，在钢板开卷过程中，$y_m(x)$为单元条在 x 方向（水平方向）截面的弯曲变形区域内任意纤维面到中性层的距离，如图 4(a) 所示。由材料力学公式可以计算出钢卷开卷前第 m 层带钢在开卷后的弯曲挠度[7–9]，如图 4(b) 所示。根据弹性理论，纤维面的卸载应力($\sigma_{s,m}(x)$) 可表示为

$$\sigma_{s,m}(x) = \frac{E}{1-\nu^2} y_m(x)[K_m(x) - K_m^n(x)] \tag{2}$$

式中，E 为带钢的弹性模量，ν 为带钢的泊松比，$K_m(x)$为第 m 层带钢开卷前的横向曲率，$K_m^n(x)$为钢板弹性回复后的曲率。

$y_m(x)$处的卸载力矩为

$$M_m^n(x) = 2\int_0^{\frac{H}{2}} \sigma_{s,m}(x) y_m(x) \mathrm{d}y_m(x) \tag{3}$$

曲率表达式为

$$K_m^n(x) = K_m(x) + \frac{4\sigma_s^3}{E^3 H^3 K_m(x)^2} - \frac{3\sigma_s}{EH} \tag{4}$$

式中，σ_s 为带钢的屈服强度。

弯曲挠度表达式为

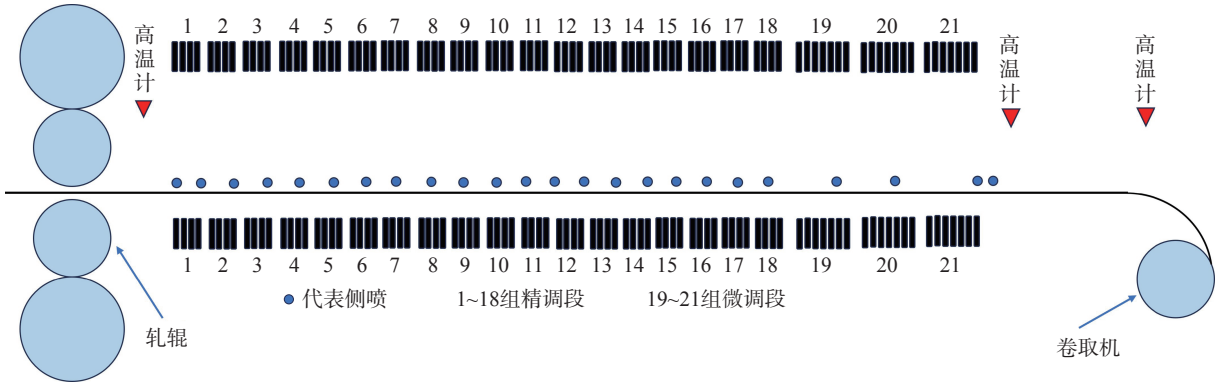


图 3　冷却工艺布置

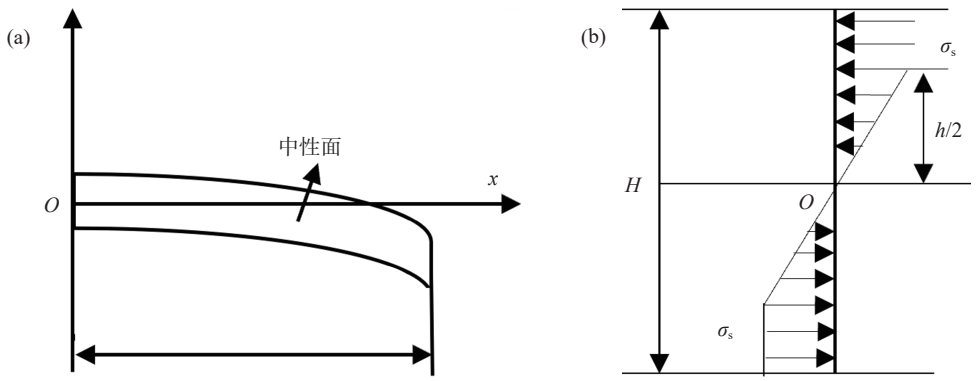


图 4　钢板微区变形及受力情况：(a) 钢板塑性变形；(b) 钢板截面塑性变形应力分布

$$\delta_m = \alpha \int_0^{\frac{h}{2}} K_m^{\mathrm{n}}(x)\left(\frac{B}{2}-x\right)\mathrm{d}x \qquad (5)$$

式中，h 为材料内部切向纯弹性变形层与中性层的最大距离，α 为修正系数。

层流冷却分析

钢板轧制后存在边部减薄的现象，在冷却过程中，由于中部与边部的冷却能力不同，边部温度低于中部，使得边部强度略高，从而导致钢板沿宽度方向冷却不均匀。这种温差效应在钢板内部形成温度梯度，进而产生应力。在实际冷却过程中，钢板的板形受温度、相变及应力的多重交互影响[10]。当相变及温度效应产生的应力达到钢板屈服极限时，会产生塑性变形，最终产生残余应力。因此，冷却能力直接影响钢板残余应力的分布情况，从而决定热轧钢板的板形。为了探究喷水比例对板凸度和翘曲度的影响，以 Q235B 钢为例，分别测试喷水比例为 0.4 与 0.6 时实验钢的板凸度情况，如表 2 所示。

表 2　典型钢种不同喷水比例的翘曲度

序号	钢种	厚度/mm	宽度/mm	喷水比例	板凸度/μm	翘曲度/μm
1	Q235B	2.75	1523	0.4	35	57
2	Q235B	2.75	1524	0.4	34	65
3	Q235B	2.75	1524	0.6	35	12
4	Q235B	2.75	1524	0.6	35	15

钢板经过轧制冷却后，其室温组织主要为多边形铁素体+珠光体，其中铁素体晶粒多为不规则多边形态，且含量较高，珠光体含量较低。对喷水比例为 0.6 的带钢组织进行金相分析可知，由于带钢边部的相变速度比中部快，上表面的冷却速度比下表面快，导致边部的珠光体含量高于中部，上表面的珠光体含量高于下表面。不同部位金相组织对比如图 5 所示。

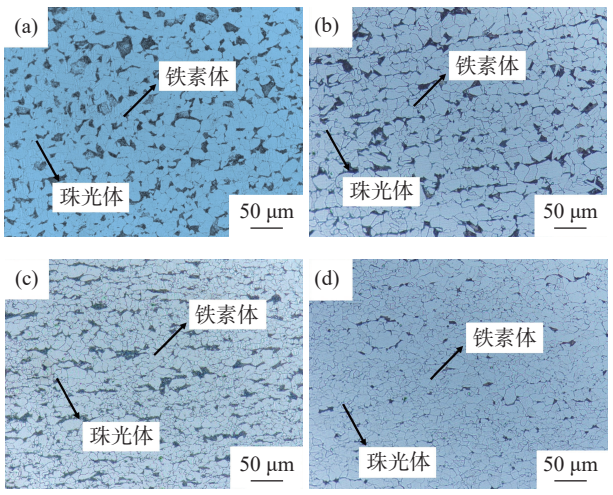


图 5　钢板金相组织：(a) 边部上表面；(b) 边部下表面；(c) 中部上表面；(d) 中部下表面

板凸度分析

带钢翘曲度是带钢逐层累积的结果，影响热轧成品板凸度的因素包括：轧辊热凸度和磨损、轧辊辊形配置、精轧负荷分配、弯辊力和轧制计划编排。对不同凸度的钢卷最外层翘曲度进行测量可

知，板凸度越大，累积到卷尾后的翘曲越明显（见表 3）；对于同一钢种，在厚度、宽度相同的前提下，随着卷径的增加，板凸度及翘曲度都呈现增大趋势；在带钢厚度、板凸度以及钢卷卷径相同的情况下，随着带钢宽度的增加，钢卷开卷后带钢的翘曲度反而减小[11-13]。

表 3　不同规格带钢的凸度与翘曲度

钢种	厚度/mm	宽度/mm	卷径/mm	板凸度/μm	翘曲度/μm
Q235B	2.75	1524	1955	31	18.9
Q235B	2.75	1524	2018	50	24.4
Q235B	2.75	1543	1955	31	18.7
Q235B	4.50	1524	1898	30	11.6
Q235B	4.50	1272	1826	35	21.5
Q235B	5.00	1524	1926	30	11.2
DQ1J	2.75	1524	2053	61	59.6
DQ1J	4.50	1524	1925	35	22.4
DQ1J	4.50	1268	1889	34	12.6

带钢在卷取后，受各卷层间径向压力和摩擦力的作用，断面始终存在周向应力，直至达到室温进行开卷时，断面所受张力才被释放。此外，由于带钢存在凸度，随着卷取过程的推进，卷取张力沿带钢宽度方向的分布将发生变化。对于钢卷中不同位置的带钢层，其周向应力的分布形式存在差异，越接近钢卷外部，带钢中部的张力越大，边部的张力越小。为探究卷取张力对翘曲度的影响，选取 2 卷钢进行实验，分别设定卷取张力的上限和下限。结果显示，设定张力下限的钢卷出现错层，张力偏小，但 2 卷钢板的翘曲度测量结果相近，证明卷取张力对翘曲度的影响较小。

改进措施

钢板在厚度及轧制方向上的冷却均匀性，是保证板形良好的必要条件。首先，在轧制过程中，轧制力的变化导致轧辊辊缝改变，从而影响板凸度；钢板表面温度、轧辊辊身直径、机架间的张力、倾斜值及弯辊力等，也会对轧制力造成影响，最终影响板凸度。根据凸度计算公式调整轧制力对凸度的比例系数，将凸度控制重点集中于前部轧制力偏大的机架，后部机架主要用来控制平直度曲线，保证有载辊缝处于理想状态。随着卷取长度的增加，卷径增大，累积的卷取翘曲度随之上升。为了避免发生这种情况，在卷取过程中进行 2 次凸度设定调整，实现整卷钢的阶梯凸度控制。但调整幅度需严格把控，总降幅应控制在初始目标凸度的 40% 以内，防止因调整幅度过大导致平直度不良。

其次，可以通过调整喷水比例改善板凸度。在实际生产中，不同厚度的钢板需匹配不同的冷却水量与上下水比，否则薄规格钢板会因温度梯度激变造成翘曲度增大。针对 Q235B 不同厚度规格的钢板，总结出的喷水比例如表 4 所示。

表 4　喷水方式及喷水比例的优化设计

钢种	厚度/mm	喷水方式	喷水比例
Q235B	2.0	前段主冷	0.4
Q235B	2.3	稀疏冷却	0.6
Q235B	3.5	稀疏冷却	0.5

最后，可以通过设定微中浪、微调上述喷水比例来改善板凸度，如图 6 所示。在轧制设定中，调整钢板的轧后目标平直度，使带钢具有微中浪趋势，能够有效抑制冷却不均的影响。带钢在轧后虽然存在一定的中浪，但冷却至室温时可恢复平直状态，微中浪轧制策略在实际生产中已经得到广泛应用。以厚度 3 mm 以下的 Q235B 薄带钢为例，不同厚度规格对应不同的微中浪设定值（平直度目标值）：1.8~2.0 mm 设定为 200 μm；2.0~2.5 mm 设定为 150 μm；2.5~2.75 mm 设定为 120 μm；2.76~3.0 mm 设定为 60 μm。通过设定微中浪及喷水比例的微调，

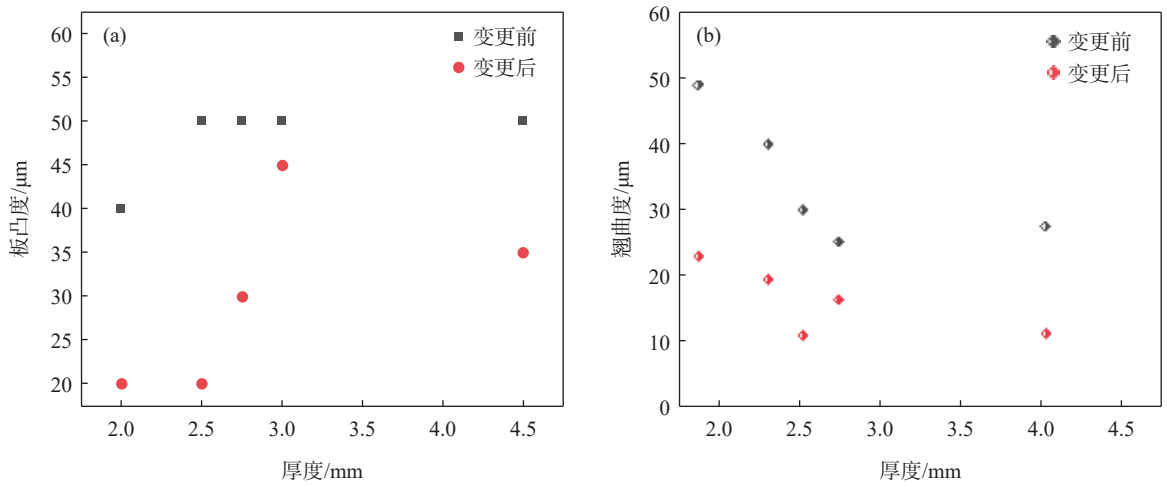


图 6　不同规格带钢调整前后板凸度 (a) 和翘曲度 (b) 的变化

不同厚度规格的板凸度及翘曲度得到显著改善，目前在实际控制中效果较好。

通过对比发现，带钢的板凸度、平直度目标及喷水比例调整后，翘曲度明显降低，如表 5 所示。

表 5　不同规格板凸度的翘曲度

钢种	厚度/mm	平直度目标值/μm		板凸度/μm		喷水比例		翘曲度/μm	
		调整前	调整后*	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后
Q235B	2.0	0	−200	40	20	0.5	0.4	46.5	16.2
Q235B	2.50	0	−150	50	20	0.5	0.6	36.3	12.1
Q235B	2.75	0	−120	50	30	0.5	0.6	24.4	2.6
Q235B	3.00	0	−60	50	45	0.5	0.6	18.8	8.6
Q235B	4.50	0	0	50	35	0.5	0.5	21.5	3.0

注：*中正负值代表带金属钢弯曲方向

结束语

（1）在钢板规格及卷径相同的情况下，钢卷开卷后带钢翘曲度随着钢板凸度的增加而增大；在带钢厚度、板凸度以及钢卷卷径相同的情况下，随着带钢宽度的增加，钢卷开卷后带钢的翘曲度减小；此外，卷取张力对带钢翘曲度影响较小。

（2）钢板在轧后层流冷却过程中的传热机制较为复杂，在满足卷取温度工艺要求的前提下，根据不同厚度规格的钢板，选用不同的冷却模式及喷水比例，对改善带钢的翘曲度具有重要作用。

（3）精轧出口板形测量的理想数据无法满足最终用户的使用标准，虽然横断面的指标数据在卷取冷却过程中保持不变，但带钢边部的相变过程比中部稍快，导致边部珠光体含量高于中部。通过微中浪轧制策略，能有效抑制带钢在轧后冷却中产生的边部压应力，避免冷却后单边及双边浪的出现，从而显著改善钢板翘曲度。

参考文献

[1] 路素娟. 冷却和堆垛对钢板翘曲的影响. 宽厚板，2003(6)：34
[2] 余伟，王乙法. 热轧带钢的冷却参数与翘曲关系. 工程科学学报，2016，38(12)：1734
[3] 王敬忠. 板带轧制头部翘曲的研究现状. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版)，2011，43(2)：294
[4] 蔡正，王国栋，刘相华，等. 热轧带钢在冷却过程中的内应力解析. 钢铁，2000(6)：33
[5] 陈银莉，余伟，苏岚，等. 热轧带钢层流冷却过程中残余应力分析. 材料热处理学报，2010，31(6)：155
[6] 白振华，李龙华，李铭泽，等. 热轧带钢卷取后翘曲计算模型研究. 燕山大学学报，2013，37(3)：228

[7] 王宏东，程政，缪成亮，等. 耐候钢层冷边浪缺陷原因分析与控制. 轧钢，2020，37(5)：75
[8] 陈银莉，余伟，白冰. 低残余应力热轧带钢层流冷却工艺的数值模拟. 北京工业大学学报，2012，38(10)：1576
[9] 常铁柱，张清东，黄世清. 薄宽带钢倾斜浪屈曲变形的解析研究. 力学与实践，2010，32(1)：54
[10] 武卫阳，田鹏，王坤，等. 3500 mm 产线薄宽规格桥梁板边浪原因分析与控制. 轧钢，2021，38(1)：89
[11] 周兵营，邵健，何安瑞，等. 热轧高强带钢纵切后侧弯缺陷及其内应力重分布. 机械工程学报，2020，56(18)：43
[12] 张清东，卢兴福，张晓峰. 表观平直带钢裁切加工后翘曲变形行为研究. 工程力学，2014，31(S1)：217
[13] 孙力，刘天武，安会龙，等. 汽车热轧大梁钢分条后出现侧弯的原因分析. 中国冶金，2018，28(1)：49

基金项目：辽宁省钢铁产业产学研创新联盟资助项目（BG–BYGT–TE23–000020–0）。

作者简介：郭立合（1978—），男，辽宁省锦州市人，高级工程师，本科。主要研究方向：热轧产线工艺管理及品种开发。通信地址：辽宁省本溪市平山区本钢北营公司轧钢厂；E-mail：neu_guolihe211@163.com。

通信作者：王超（1985—），男，博士，副教授，《金属世界》第一届青年编委。主要研究方向：材料加工新工艺新技术。通信地址：辽宁省鞍山市辽宁科技大学材料与冶金学院；E-mail：wcustl@126.com。