横纹缺陷的成因分析*

王中一[1,2]，赵勇桃[1]，孙婷婷[2]

（1. 内蒙古科技大学材料与冶金学院，内蒙古 包头 014010；
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司稀土钢板材厂，内蒙古 包头 014010）

摘 要： 针对热轧低碳钢卷开卷过程中出现的横纹缺陷，运用弹塑性力学、金属学等知识分析了钢卷在开卷、矫直过程中的弯曲变形、应力分布、屈服平台和形变时效等问题，认为板形问题不是引起横纹缺陷的主要原因，而是由低碳钢普遍存在的屈服平台引起的，从而为解决横纹缺陷提供了依据。

关键词： 横纹；板形；屈服平台；弯曲变形；形变时效；应力分布

中图分类号： TG335 **文献标识码：** B **文章编号：** 1009－5438(2020)01－0047－04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.01.013

Cause Analysis for Cross Crack Defect

Wang Zhong－yi[1,2], *Zhao Yong－tao*[1], *Sun Ting－ting*[2]

(1. *School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Rare Earth Steel Plate Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In the paper, it is introduced such problems as bending deformation, stress distribution, yield point elongation and strain aging of steel coils in the processes of uncoiling and straightening are analyzed with such knowledge as elastic－plastic mechanics and metal science aiming at the cross cracks defect during uncoiling hot rolled low carbon steel coil. It is considered that the main cause for cross cracks defect is not the problem of strip shape, but the yield point elongation common for low carbon steel so that the basis for eliminating the cross cracks defect is provided.

Key words: cross cracks; strip shape; yield point elongation; bending deformation; strain aging; stress distribution

热轧低碳钢卷开卷后出现横纹缺陷是一种常见现象，在国内各家钢企都不同程度地出现横纹缺陷，也有些钢企称其为“腰折”，给下游工序带来许多不便和损失。为了解决这一问题，许多企业都作过研究和尝试，但效果始终不理想，主要是对横纹缺陷产生的机理认识不一致。本文针对研究过程中形成的不同意见，运用弹塑性力学、金属学等知识，分析钢卷在开卷矫直过程中的弯曲变形和应力分布，阐述横纹缺陷产生的内因和外因，认为横纹缺陷不是由板形引起的，而是由低碳钢普遍存在的屈服平台引起的，从而为解决横纹缺陷，提高产品质量提供理论依据。

1 横纹缺陷的宏观特征

通过现场查验和统计分析，发现横纹缺陷在宏观形貌上主要有以下特征（见表1）。

* **收稿日期：** 2019－06－26

作者简介： 王中一（1983－），男，山西省忻州市人，工程师，现从事板材质量管理工作。

表1 横纹缺陷宏观形貌特征

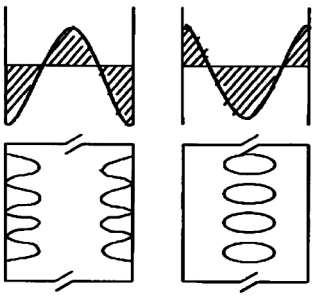
序号	横纹缺陷形貌
1	横纹缺陷呈直线状或条状，而且垂直于轧制方向
2	多数贯穿板面
3	板面有明显的折痕和边界，严重的呈“搓衣板”状
4	开卷时出现的
5	主要发生在低碳钢卷，如Q195，SPHC，Q235等

2 板形与横纹缺陷的应力分析

板形的瓢曲和起浪是由钢板内的残余应力引起的，板形控制的手段很多，如弯辊、串辊、负荷分配等，但无论采用什么控制方式、如何组合，最终反映在残余应力上只有两种形式：拉应力和压应力，只是分布形态不同而已[1]。因此，对弯辊、配辊等板形控制手段的分析最终都将归结为对残余应力的分析，这些残余拉应力和压应力的分布形态与板形的瓢曲、起浪有一一对应的关系，也正因为这种对应关系才使得板形控制成为可能，即通过检测张力来体现板形状况。因此分析横纹缺陷产生的原因，首先应找出造成横纹缺陷的应力分布，以及落实这种应力分布是如何形成的。

常见板形缺陷双边浪和中浪所对应的残余应力分布见图1。由于目前在热轧卷上尚未发现横纹缺陷，说明热轧卷内的残余应力分布尚无产生横纹缺陷的那一种，而是在钢卷开卷过程中的某些工序使钢板内的应力发生了变化，形成了产生横纹缺陷的那一种应力分布，导致出现横纹缺陷。

图2的应力分布比较符合横纹的缺陷特征：贯穿板面、条状、垂直于轧制方向，图2的物理意义为：沿板宽方向有均匀的压应力。这种应力分布在钢板的弯曲过程中可以产生，而且是一面受压应力一面受拉应力，钢卷的开卷和矫直工序正好是这种变形。



（a）双边浪 （b）中浪

图1 板形对应残余应力分布图

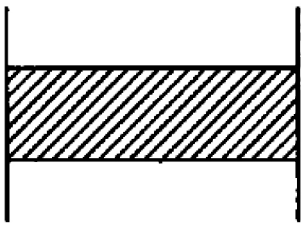
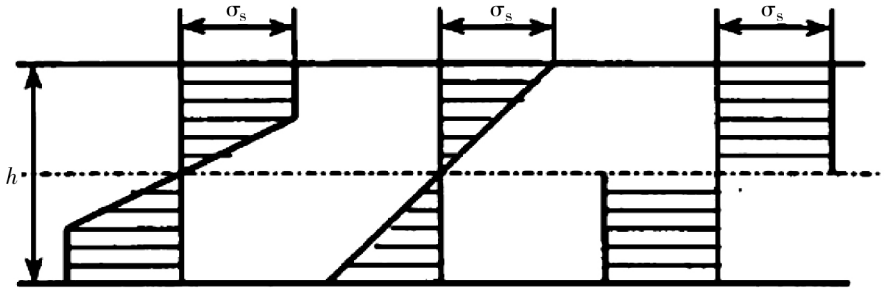


图2 均匀压应力分布

因此可以认为横纹缺陷不是带钢成卷过程造成的，而是由开卷和矫直过程中的外部弯曲力矩加上去的。

3 带钢弯曲变形与屈服效应

带钢的弯曲变形有三种情况（见图3）：弹塑性弯曲、纯弹性弯曲和纯塑性弯曲。带钢的开卷和矫直属于弹塑性弯曲变形，即利用弯曲力矩将钢卷固有的圆弧和波浪矫直。



（a）弹塑性弯曲 （b）纯弹性弯曲 （c）纯塑性弯曲

图3 纯弯曲变形的应力分布

矫直工序如图 4 所示，带钢经过矫直机时，经历连续的弹塑性弯曲变形，在每一个矫直辊上带钢都受弯曲力矩的作用，对于其中的某一个单元而言，带钢在厚度方向上一半受拉一半受压，使带钢发生了弹塑性弯曲变形，这种变形的横向应力分布与图 2 是一样的，变形的宏观特征与横纹缺陷也十分接近：贯穿板面、垂直轧制方向、条状。

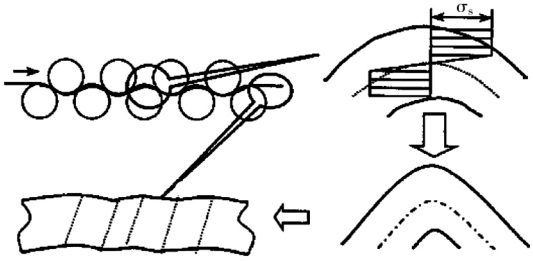


图 4　矫直工序及缺陷产生示意图

弯曲力矩的大小受矫直辊辊缝的控制，当辊缝较大时弯曲力矩较小，带钢只发生弹性变形；随着辊缝的减小，弯曲力矩加大，带钢的曲率半径减小，上下表面的应力达到屈服点，开始发生塑性变形，由于变形区较薄，还不足以使整体发生塑性变形，依然处于弹性变形状态；曲率半径的进一步减小，变形区逐步向内部纤维渗透，塑性变形区逐步增大，弹性变形区逐步减小，导致整体逐步由弹性变形过渡到塑性变形，由于材料存在固有的屈服平台，便发生屈服变形效应，在同样的弯曲应力的作用下，上表面延伸突增，下表面突然压缩，使均匀的弯曲变成不均匀的变形，在变形量较大处产生折印，这些折印在后续的反复矫直过程中又被碾平，如此周而复始便在板面上留下了横纹缺陷，见图 4。

根据材料力学中有关梁的弹性弯曲的分析方法，可以推得薄板由弹性弯曲进入塑性弯曲的条件是[2]：

$$R \leqslant Et/3\sigma_s$$

式中：R—— 弯曲曲率半径，mm；

E—— 钢板的弹性模量，210 000 MPa；

σ_s—— 钢板的屈服点，MPa；

t—— 钢板厚度，mm。

由上式可看出，钢板的塑性弯曲不仅与厚度有关，而且与钢板的屈服强度有关。对于 3.0 mm 的 Q195，Q235，SPHC 低碳板而言，临界曲率半径分别为：

Q195：σ_s = 255 ~ 375 MPa，R≤823 ~ 560 mm；

Q235：σ_s = 320 ~ 430 MPa，R≤656 ~ 488 mm；

SPHC：σ_s = 260 ~ 360 MPa，R≤808 ~ 583 mm。

对于卷径较小、强度较低的钢卷开卷过程中满足上述条件，会发生弹塑性弯曲变形，容易产生横纹；而对于卷径较大、强度较高的卷则不满足上述条件，开卷时以弹性变形为主，不易产生横纹（见图 5）。但随着卷径的减小，尤其在开卷的末期，横纹缺陷可能会出现或加重。在实际开卷过程中发现横纹时有时无和开卷末期横纹严重的现象证实了这一点。

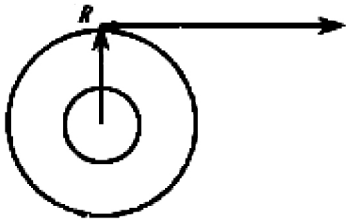


图 5　开卷示意图

开卷过程的曲率半径不可控，但矫直机的弯曲半径是可控的，矫直机的矫直辊径虽小，但弯曲曲率半径取决于上下矫直辊的重合量（见图 6）。由上述分析可知，弹塑性弯曲变形有很大一个范围，即由图 3（b）过渡到图 3（c）的整个过程都属于弹塑性变形区，根据材料力学的推导，只有当塑性变形区大于 1/3 时，其塑性变形才有可能大于弹性恢复。因此可以认为，只有超过这一阶段才会出现明显的屈服效应，钢板上见到的横纹时隐时现、时轻时重的现象，跟矫直过程塑性变形区的大小有直接关系。因此，矫直机辊缝位置、钢板厚度、钢卷半径和屈服强度都会直接影响横纹的产生。在保证矫直质量的前提下，根据钢板厚度和屈服强度，合理的设置矫直辊的位置与分布，减轻横纹缺陷是有可能的。

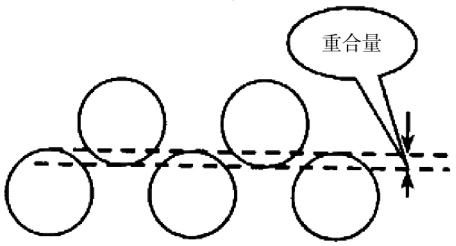


图 6　矫直辊辊缝示意图

由此初步推断，材料存在屈服平台特征是产生

横纹缺陷的内因，钢板的弯曲变形是外因。钢板在矫直过程中所受的弯矩是均匀的，如果没有屈服平台，不会产生局部变形量过大；如果没有弯曲变形或者弯曲变形量达不到临界值，钢板也不会产生横纹，二者缺一不可。因此控制横纹缺陷主要应从内因和外因两方面考虑，消除屈服平台和控制弯曲变形量。

4 屈服平台与形变时效

根据柯氏(Cottrell)理论，低碳钢的屈服效应是由于间隙原子C、N与位错交互作用的结果。间隙原子聚集在刃型位错的周围处，形成所谓的“柯氏气团”把位错锁住，变形时必须将应力增大到某一定值后，才能使位错摆脱气团，开始滑移运动。此时在拉伸曲线上出现明显的上屈服点，当位错一旦摆脱气团的束缚，应力不增加也能继续运动，因而在曲线上存在下屈服点。低碳钢在室温变形时，出现屈服效应是因为间隙原子C、N容易扩散到位错周围而形成柯氏气团的缘故[3-4]。

间隙原子的这种扩散作用会使钢材产生形变时效，它是屈服效应的重要特征。低碳钢高温变形后，在空冷或水冷过程中会得到C、N过饱和α铁。金属学指出，低碳钢在591 ℃时，N在α铁中的溶解度最大，约为0.1%，处于相对稳定的平衡态。随着温度的降低，N在α铁中的溶解度急剧降低，过饱和的N原子很不稳定，会逐步向能量较高的刃型位错扩散，形成柯氏气团，改变钢材的性能——形变时效。时效的时间取决于C、N间隙原子的过饱和量和位错的密度，一般为数天或数十天不等。因此低碳钢在591 ℃没有屈服平台，空冷数天后才会出现明显的屈服效应。

屈服效应与变形速度有关，这一点可以从常规拉伸实验中得到证实，快速拉伸与慢速拉伸其应力曲线是不一样的，变形速度越慢其屈服延伸率越大，变形速度越快其屈服延伸率越小。因此，加快钢卷的开卷和矫直速度有利于减少横纹的产生，乃至消除。

5 结论

(1) 无论从宏观还是从微观分析，横纹都不是由板形引起的缺陷，它是热轧低碳钢卷在开卷、矫直过程中产生的一种特有缺陷。产生横纹的内因是低碳钢普遍存在屈服平台，外因是钢板的弯曲变形。经过时效的热轧低碳钢卷在开卷矫直时可能会发生横纹现象。

(2) 横纹缺陷与开卷矫直的弯曲变形量有直接关系，当低碳钢塑性弯曲超过临界值时可能会出现屈服效应——横纹现象。影响屈服效应的因素有：钢卷直径、钢板厚度、屈服强度、矫直辊辊缝和变形速度等。根据钢板厚度、屈服强度合理设置矫直辊辊缝，提高开卷、矫直速度，能改善矫直质量。

(3) 随着卷径的减小，开卷出现横纹的可能性增大，开卷机区域是横纹缺陷的高发区，为了避免或减轻开卷过程产生横纹，可采取加快开卷速度的办法。

(4) 根据屈服平台形成的机理，形变时效、钢种特征和局部变形是屈服效应的重要特征，而这三个特征在横纹缺陷中都具备，从而证实了屈服平台在横纹缺陷中的关键性作用。

参 考 文 献

[1] 宋维锡. 金属学 [M]. 北京：冶金工业出版社，1989.

[2] 王先进. 金属薄板成形技术 [M]. 北京：兵器工业出版社，1990.

[3] 王占学. 控制轧制与控制冷却 [M]. 北京：冶金工业出版社，1988.

[4] William C Leslie. THE PHYSICAL METALLURGY OF STEEL [M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation，1988.