

学术争鸣

热轧板横折缺陷的成因分析

王丹¹, 左军¹, 黄徐晶¹, 康明², 骆中云², 陈继林²

(1. 攀枝花钢铁研究院, 四川 攀枝花 617000; 2. 攀钢热轧板厂, 四川 攀枝花 617062)

摘要:针对热轧低碳钢卷开卷过程中出现的横折缺陷,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,认为横折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,从而为解决横折缺陷提供了依据。

关键词:横折;板形;屈服平台;弯曲变形;形变时效;应力分布

中图分类号: TG333.7+1

文献标识码: A

文章编号: 1004-7638(2000)01-0029-07

ANALYSIS OF CAUSES FOR CROSS BREAKS DEFECT FORMATION DURING HOT STRIP UNCOILING AND LEVELLING

WANG Dan¹, ZUO Jun¹, HUANG Xu-jin¹, KANG Ming², LUO Zhong-yun², Chen Ji-lin²

(1. Panzhihua Iron & Steel Research Institute, Sichuan, Panzhihua 617000, China 2. Hot Strip Mill Of PZH Steel, Sichuan, Panzhihua 617062, China)

Abstract: Based on cross breaks defect formation during uncoiling of hot strip of low carbon steel, the bending deformation, stress distribution, yield point elongation and strain aging of the hot strip during uncoiling and levelling were analyzed by use of the knowledge, such as elastic-plastic mechanics and metal science etc. It is believed that the bad flatness of the hot strip is not responsible for the cross breaks formation. The defect results from yield point elongation of the low carbon steel, thus providing a basis for solution of the cross breaks defect.

Key Words: cross breaks; profile; yield point elongation; bending deformation; strain aging; stress distribution

热轧低碳钢卷开卷后出现横折缺陷是一种常见现象,无论是国内产品还是进口产品都不同程度地出现横折缺陷,给用户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,主要是对横折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,阐述横折缺陷产生的内因和外因,认为横折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

横折缺陷,提高产品质量提供理论依据。

1 横折缺陷与板形缺陷的宏观特征

通过市场调查和统计分析,发现横折缺陷与板形缺陷在宏观形貌上主要有以下特征(表1)。

以上对比不难看出:板形缺陷与横折缺陷的宏观特征是不同的,而且有明显的差别。仅贯通板面、垂直轧向这一条,就可以从理论上确认横折缺陷不是板形缺陷。同时横折缺陷有明显的条状折痕,说明该处存在局部变形过大,因此横折缺陷有不均匀

表1 横折缺陷与板形缺陷宏观形貌对比

	板形缺陷	横折缺陷
1	板形缺陷呈椭圆形或抛物线形的瓢曲和起浪	横折缺陷呈直线状或条状,而且垂直于轧制方向
2	板形的瓢曲和起浪不会贯穿板面,只发生在局部,如边部或中部	多数横折贯穿板面
3	板形的瓢曲和起浪是连续的,没有明显的边界	板面有明显的折痕和边界,严重者呈“搓衣板”状
4	板形缺陷存在于钢卷中	钢卷中无横折缺陷,开卷时出现的
5	板形缺陷是由变形不均匀引起的,与钢种无关	主要发生在低碳钢卷,如Q195、Q215、Q235、stw22等

变形的问题是客观存在的。

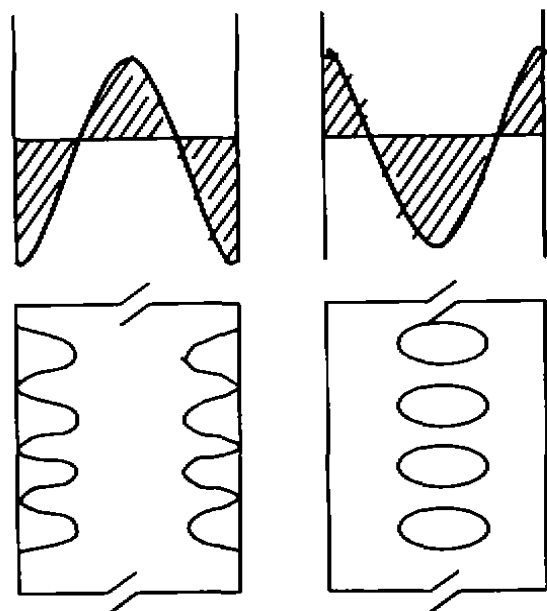
2 板形与横折缺陷的应力分析

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、配辊、负荷分配……,可以说有 n 种方式,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,只不过分布形态不同而已^[1-3]。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,即通过检测张力来控制板形。因此分析横折缺陷产生的原因,首先应找出产生横折所需的应力分布,以及这种应力分布是如何形成的。

板面的瓢曲和起浪是由残余压应力造成的,而残余拉应力只会把板面绷直或拉裂,不会瓢曲^[4,5]。常见板形缺陷两边浪和中间浪所对应的残余应力分布见图1。从理论上说还有无限种分布形态,但由于目前在热轧卷上尚未发现横折缺陷,说明热轧卷内的残余应力分布尚无产生横折缺陷的那一种,而是在钢卷开平过程中的某些工序使钢板内的应力发生了变化,形成了产生横折缺陷的那一种应力分布,导致了横折缺陷。

经分析,图2的应力分布比较符合横折的缺陷特征:贯穿板面、条状、垂直轧向,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,而且是一面受压一面受拉,钢卷的开卷和矫直工序正好是这种变形。

因此可以认为横折缺陷不是钢卷内固有的,而是由开卷和矫直过程中的外部弯曲力矩加上去的。



(a)两边浪

(b)中间浪

图1 残余应力与板形的对应关系

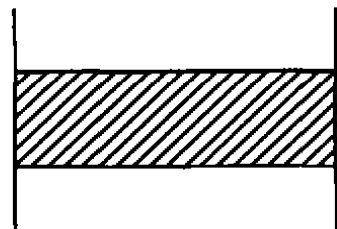


图2 均匀压应力分布

3 带钢弯曲变形与屈服效应

带钢的弯曲变形有三种情况(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。

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,此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折缺陷也十分接近:贯穿板面、垂直轧向、条状。

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折缺陷,见图 4。

根据材料力学中有关梁的弹性弯曲的分析方法,

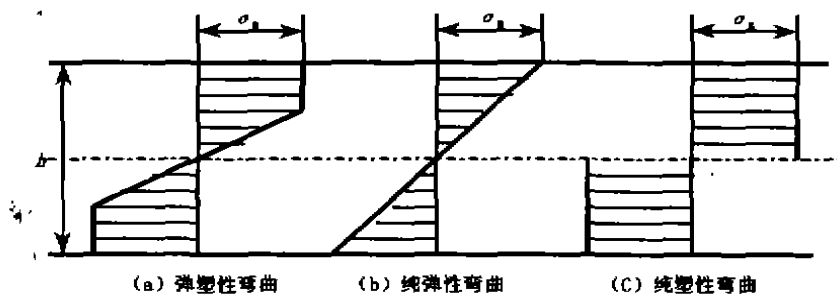


图 3 纯弯曲变形的应力分布

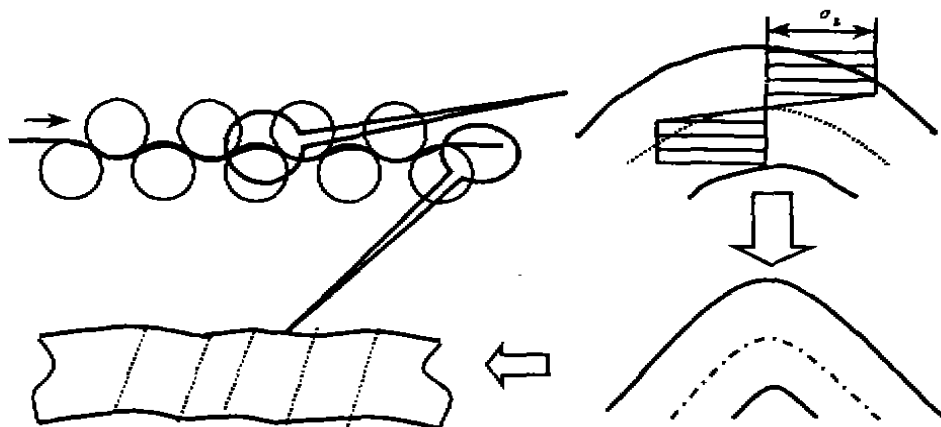


图 4 矫直工序及缺陷产生示意图

可以推得薄板由弹性弯曲进入塑性弯曲的条件是^[6]:

$$R \leq Et/3\sigma_s$$

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, stw22 低碳板而言,临界曲率半径分别为:

$$\text{Q195 } \sigma_s = 255 \sim 375 \text{ MPa } R \leq 823 \sim 560 \text{ mm};$$

$$\text{Q235 } \sigma_s = 320 \sim 430 \text{ MPa } R \leq 656 \sim 488 \text{ mm};$$

$$\text{stw22 } \sigma_s = 200 \sim 340 \text{ MPa } R \leq 1050 \sim 617 \text{ mm}。$$

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,容易产生横折;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,不易产生横折(图 5)。但随着卷径的减小,尤其在开卷的末期,横折缺陷可能会出现或加重。在实际开卷过程中发现横折时有时无和开卷末期横折严重的现象证实了这一点。

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

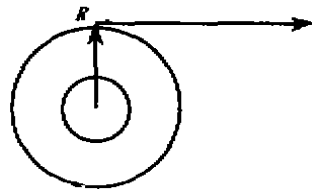


图 5 开卷示意图

半径取决于上下矫直辊的重合量(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,钢板上见到的横折时隐时现、时轻时重的现象,跟矫直过程塑性变形区的大小直接关系。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折的产生。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,减轻横折缺陷是有可能的。

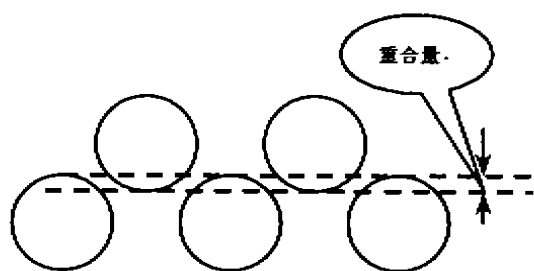


图6 矫直辊辊缝示意图

由此初步推断,材料存在屈服平台特征是产生横折缺陷的内因,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,钢板也不会产生横折,二者缺一不可。因此控制横折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 板形与横折的关系

上述对弹塑性弯曲变形的分析,是在假设钢板是平直的、没有曲率的条件下进行的。实际生产中钢卷不仅有圆弧,而且还有瓢曲、波浪等缺陷,带有这些缺陷的钢卷开卷或进入矫直机时,会产生附加的弯曲力矩,导致弯曲应力的变化,影响弹塑性变形。

以矫直圆弧为例,说明弯曲应力的变化对弹塑性区的影响。图7分别为矫直平板、正弯圆弧、负弯圆弧三种情况的应力分布图。矫直机第一个单元为负弯,当平板进入第一单元时,其应力分布如图7(a)所示;当带有正弯的带钢进入矫直机的第一单元时,由于带钢的正弯与矫直机负弯方向相反,为了克服带钢的正弯,会产生一个附加力矩,使总弯曲力矩

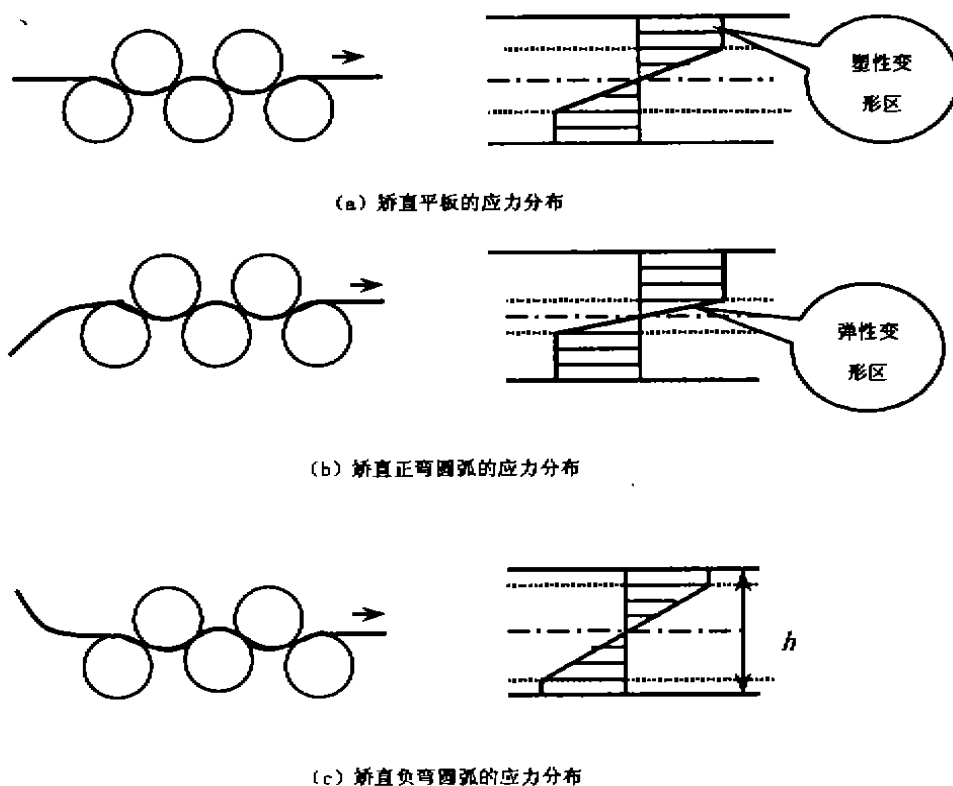


图7 三种原料矫直的应力分布

增大,导致应力分布中的塑性变形区增大,弹性变形区减小(图 7(b));当带有负弯的带钢进入矫直机时,带钢的负弯与矫直机的负弯方向相同,总弯曲力矩会减小,使应力分布中的塑性区减小,弹性区增大(图 7(c))。因此,矫直机能根据来料的状况,自动地调整带钢厚度方向上弹塑性区的分布,使原有的弧度被矫直。

带钢瓢曲和波浪的某一个局部(某一个波浪)均可视为一种正弯或负弯原料,在矫直时与上述机理是一样的,只不过这种正弯、负弯在不断的变化、交替,而且它不是贯通板面的,仅限于带钢的中间或两

边。根据这一原理,图 8 显示了板形两边浪和中间浪两种情况矫直时,钢板断面上弹塑性区的变化情况。两边浪时,带钢的中部是平直的,弹塑性区的分界线比较稳定,带钢的两边有波浪,相当于正弯与负弯原料交替变化,因此,弹塑性分界线也随之变化,时高时低,在厚度方向上形成了一个变化区。中间浪的区别仅在于这一变化区发生在带钢的中部,其余是一样的。按此推理,各种板形缺陷都会产生相应的变化规律。

矫直机这种作用是有益的,它能根据来料的状况自动的调节钢板中弹塑性变形区的分布,塑性变

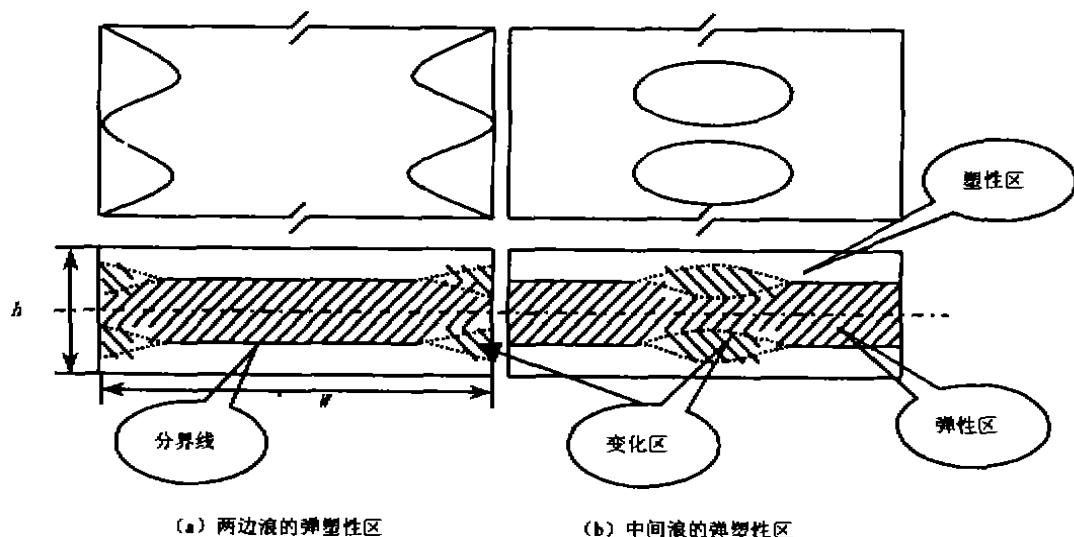


图 8 两种板形缺陷矫直时的弹塑性区变化情况

形量该大则大该小则小,达到消除或减小波浪的目的。否则,将起不到矫直的作用。

板形的波浪、瓢曲越大,矫直机对弹塑性区的自动调节作用也越大。它与波浪的位置无关,只与波浪的大小有关,无论是中间浪还是两边浪,只要遇到波浪方向与矫直方向相反都会加大塑性变形区,遇到波浪方向与矫直方向相同都会减小塑性变形区,矫直机的这种矫直机理可能会对屈服效应形成干扰,要减少这种干扰应尽量控制好板形,避免产生大的波浪,最理想的钢板是平直无浪的钢板,在矫直时其弹塑性变形区比较稳定,便于设定矫直工艺参数、稳定矫直质量。

钢卷中最严重的波浪是钢卷自身的圆弧,而且开卷时它属于正弯型的,轧机控制不良所产生的波浪、瓢曲,其曲率半径要比钢卷半径大得多,矫直机

所要克服的主要问题是钢卷的圆弧,因此开卷机区域是横折缺陷的易发处。据调查,横折缺陷 80% 以上发生在该处。为了避免或减轻开卷过程产生横折,可采取加快开卷速度的办法。

5 屈服平台与形变时效

根据科氏(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“科氏气团”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

成科氏气团的缘故^[7-11]。

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,形成科氏气团,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℃范围没有屈服平台,空冷数天后才会出现明显的屈服效应。

据文献[9]介绍,低碳钢在不同温度下的拉伸应变曲线如图9所示。

热轧低碳钢的卷取温度一般在650~680℃,卸

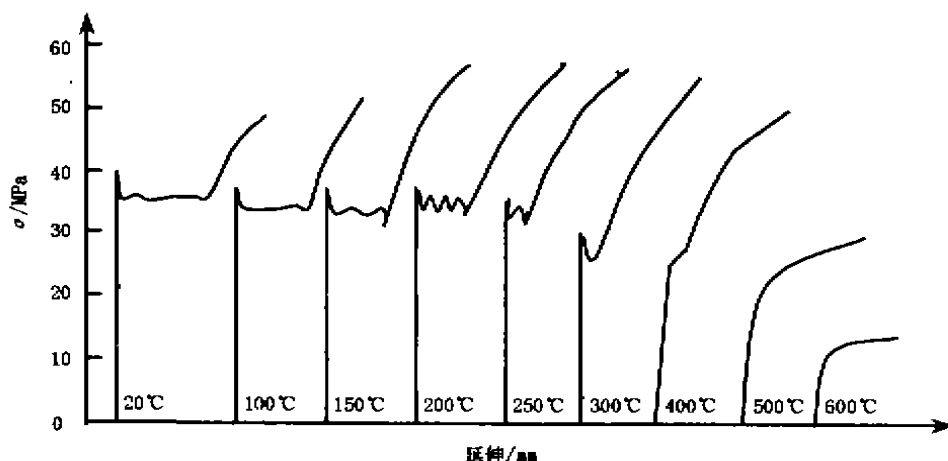


图9 低碳钢在不同温度下的拉伸应变曲线

卷后用吊车将钢卷吊至检查线开卷检查,此时的钢卷温度正好在591℃的范围。据调查,在每炉钢的开卷取样过程中从未发现横折现象,钢卷运至钢卷库冷却数天后,在剪切线开卷时便出现了横折缺陷,用户开卷或冷轧开卷时也发现了横折缺陷。因此,理论分析与实际情况是相符的,横折缺陷这种时效特征证实了它是由屈服效应引起的推断。

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折的产生,乃至消除。

从理论上说,用工艺的方法消除或缓解低碳钢的屈服效应是有办法的。如无间隙原子钢(IF钢)就是用冶炼与轧钢工艺相结合的办法生产出来的,它代表目前冷轧产品的最高水平。在间隙原子的作用中,N原子对屈服效应起到主要作用,钢中加入少量与N亲和力较强的Ti,V,Nb,Al等元素,再配以适当的热轧工艺,就能与N形成氮化物,以第二相的形式析出,避免或减少钢中的固溶N。因此横折现象主要出现在热轧态或退火态的低碳钢中,合金

化的钢种中是很少见的。如热轧生产的汽车大梁板等产品就从未发现过横折缺陷,这与V或Ti的微处理作用关系很大。由于采用工艺涉及面较广,成本较高,因此目前消除低碳普板的屈服效应,国际上仍采用传统的机械办法——平整,它是消除低碳钢屈服平台最经济、最有效的手段。

6 结语

(1)无论从宏观还是从微观分析,横折都不是板形缺陷,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。产生横折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折现象。

(2)横折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——横折现象。影响屈服效应的因素有:钢卷直径、钢板厚度、屈服强度、矫直辊缝和变形速度等。根据钢板厚度、屈服强度合理设置矫直辊缝,提高开卷矫直速度,能改善矫直质量,但消除横折最有效的办法仍是平整。

(3)矫直机能根据钢卷圆弧、波浪或瓢曲等缺

陷,自动调整弯曲变形的弹塑性应力分布,调整塑性区和弹性区的比例,达到矫直的目的。矫直机这种作用可能会干扰屈服效应,这种干扰与波浪的大小有关,与波浪的位置无关,干扰最大的是钢卷自身的圆弧。随着卷径的减小,开卷出现横折的可能性增大,开卷机区域是横折缺陷的高发区,为了避免或减

轻开卷过程产生横折,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,而这三个特征在横折缺陷中都具备,从而证实了屈服平台在横折缺陷中的关键性作用。

参考文献:

- [1] 赵志业.金属塑性变形与轧制理论[M].北京:冶金工业出版社,1980.9.
- [2] 孙训芳.材料力学[M].北京:机械工业出版社,1978.5
- [3] 宋维锡.金属学[M].北京:冶金工业出版社,1989.5.
- [4] 熊及兹.压力加工设备[M].北京:冶金工业出版社,1995.5.
- [5] 罗伯茨 W L.冷轧带钢生产[M].北京:冶金工业出版社,1991.11.
- [6] 王先进.金属薄板成形技术[M].北京:兵器工业出版社,1990.3.
- [7] 连家创.板厚板形控制[M].北京:兵器工业出版社,1996.4.
- [8] 王占学.控制轧制与控制冷却[M].北京:冶金工业出版社,1988.11
- [9] William C Leslie. THE PHYSICAL METALLURGY OF STEEL. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988. 3
- [10] 王先进.薄板成形性能[M].北京:北京钢铁学院,1985.4
- [11] 西德钢铁工程师协会.冷轧带钢生产[M].北京:机械工业出版社,1983.10.
- [12] 日本钢铁协会.日本冷轧带钢技术[M].北京:冶金工业出版社,1985.10.

编辑 杨冬梅

收稿日期:1999-10-10

俄新利别茨克钢铁公司 No.5 焦炉投产

俄罗斯新利别茨克钢铁公司 No.5 炼焦炉在经过 5 年的技术改造后于去年投产。该焦炉为 77 孔,设计年产量为 80 万 t,是新利别茨克钢铁公司生产能力最大的焦炉,也是现今俄罗斯和独联体国家中最为现代化的焦炉,采用了生产工艺流程自动控制系统,实现了无烟装煤和无粉尘出焦。炼焦粉尘经布袋除尘器除尘后,有害物质向大气中的排放量减少了一半以上,而诸如氮氧化物、苯、苯芘等的排放量则减少了 75%~85%,该公司预计,改造炼焦炉的投资可在 5 年内收回。

(杜厚益 供稿)