

提高冷轧硅钢片成材率板形质量和 横向厚度精度的分析

张凤泉, 刘本仁

(武汉钢铁集团公司 技术中心, 湖北 武汉 430083)

摘 要:根据冷轧硅钢片成材率、板形质量和横向厚度精度现状, 分析了这些指标的主要影响因素, 提出了通过减少热轧卷边裂、冷轧高硅产品边裂以改善上述指标的措施。

关键词:冷轧硅钢片; 成材率; 板形质量; 横向厚度精度; 边裂

中图分类号: TF764 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1447(2005)04-0040-05

ANALYSIS ON INCREASING THE ROLLING YIELD, STRIP SHAPE QUALITY AND TRAVERSE THICKNESS ACCURACY OF FINISHED SILICON SHEET

ZHANG Feng-quan, LIU Ben-ren

(Technology Center of Wuhan Iron and Steel Corporation., Wuhan 430083, China)

Synopsis: Based on the present status of the rolling yield, strip shape quality and traverse thickness accuracy of cold silicon sheet, factors to influence the above-mentioned indexes are analyzed in the paper. In order to improve these indexes corresponding measures are put forward, mainly including reduction of edge crack of hot rolled coils and cold rolled high silicon products.

Keywords: cold silicon sheet; rolling yield; quality of strip shape; accuracy of traverse thickness; edge crack

1 武钢冷轧硅钢片产品各工序成材率和外观质量状况

1.1 目前冷轧硅钢片各工序成材率情况

目前冷轧硅钢片各工序成材率情况见表 1。

表 1 冷轧硅钢片各工序成材率情况

	CP 切边	ZR 头尾 及断带	CS 切边	掉队及 其它	冷轧综合 成材率
HiB	90.0	93.0	94.0	90.0	70.81
CQO	933.0	95.0	95.0	96.0	80.58
W07~14(I)	96.0	98.0	96.0	97.5	88.06
W07~14(II)	96.0	95.5	96.0	96.0	84.49
W18~23	96	98	96	98	88.51
W20~30G	96	98	96	98	88.51

注: 上表中不包括热轧卷的退废

由表 1 可见, 各品种成材率均不高, 而且损失

最大的工序均为酸洗切边, 其次是 CS 切边和 Q 材的断带; 掉队卷属生产管理的范围, 在此不再分析。实际生产表明:

(1) 对 Q 材来说, CP 切边量与热轧来料的边裂大小有直接关系, ZR 轧制断带与 CP 未切净边裂有直接关系, 这就是说, 热轧边裂是影响 CP 工序成材率的主要因素;

(2) 而对 W 材, CP 切边量主要是根据热轧卷的拉窄造成宽度变化而确定的, 热轧卷拉窄越严重, CP 切边量也就越大, 成材率也就越低;

(3) CS 切边量大, 对 Q 材来讲, 主要是轧制边裂大, 而对 W 材而言, 主要是轧制边降大, 横向厚度精度差, 切边可以提高钢板的横向厚度精度;

(4) 减小热轧来料的边裂是提高 Q 材成材率的主要环节, 提高 W 材的横向厚度精度和板形质

作者简介: 张凤泉(1964-), 男, 河北衡水人, 教授级高工, 主要从事硅钢新产品开发。

量是当前的主要任务。只有提高了成材率,降低工序成本,才能提高价格的竞争能力。

1.2 冷轧硅钢片的板形及横向厚度现状

1.2.1 横向厚度精度

武钢硅钢厂生产的 50WG800 与日本的 50H1300、宝钢的 50B1300 横向厚度差见表 2。

表 2 50WG800、50H1300 和 50B1300 横向厚度差对照

牌 号	板宽/mm	最小横向 厚度差/ μm	平均横向 厚度差/ μm	最大横向 厚度差/ μm
50WG800	1 020	6	11	17
50H1300	1 200	5	9	12
50B1300	1 200	5	8	11
采用高速冲床的用户要求		5	8	12

由表 2 可知,武钢产品的横向厚度精度与日本产品、宝钢产品相比是最低的,与用户高速冲床的要求也有一定差距。因此,必须提高产品的横向厚度精度,才能提高产品的质量竞争能力。

1.2.2 板形

板形缺陷的比较,尚没有具体的数据,但从实际生产和用户反馈意见来看,板形已成为硅钢产品的大问题,因此,解决板形问题至关重要。

2 分析与措施

2.1 减少热轧卷的裂边,降低 CP 切边量,增加板幅宽度,提高成材率

2.1.1 热轧卷裂边的分析

热轧卷的边裂主要有三方面的影响因素:其一是轧件;其二是加热工艺;其三是轧制工艺。对轧件来讲,连铸坯有三个结晶带,从铸坯表面向内几个毫米为外壳层,由细小的等轴初生晶粒组成;其后为柱状带,由柱状的初生晶粒组成;最后为轴心部位的粗大等轴晶带。由于二炼钢采用了电磁搅拌等措施,柱状晶区已相当窄,因此已基本满足要求。在板坯加热温度高时,外壳层中细小的等轴初生晶粒迅速长大,高温加热还会造成晶界熔化,将导致边部裂纹。而事实上,严格控制好加热工艺,这个问题是可以解决的。最关键的因素——我们平时容易忽略的——轧制工艺与轧件的因素。在轧制过程中轧件不同部位温降的不均匀,造成硬度的不均匀和变形的不均匀而导致边裂。为此,现将板坯边部的温降进行计算分析和说明。为了简便起见,采用条元法计算各条元的温降。取板坯的一段,根据对称性,在板坯厚度方

向上划分为 40 个条元,在板厚方向上以同样的尺度截取条元,采用单独计算的方法来说明温降的不均匀性。我们知道,轧件在轧制过程中的温度变化,是由辐射、传导、对流和变形热的综合结果,由于各条元的变形相差很小,在此不考虑变形温升,因对流的影响也不大,在此忽略。各条元的辐射、传导温降分别采用式(1)、(2)计算。

辐射温降

$$\Delta T_f = \frac{C_s \epsilon_r F t}{3600 C_0 G} \left[\frac{T}{100} \right]^4 \quad (1)$$

式中 C_s ——绝对黑体的辐射常数

ϵ_r ——轧件表面的相对黑度

F ——轧件的散热表面积

C_0 ——钢材的比热

G ——条元的重量

t ——冷却时间

T ——轧件的温度

对流引起的温降

$$\Delta T_z = \frac{\lambda F_z t_z}{1.8 C_0 G h_c} (T - T_i) \quad (2)$$

式中 λ ——钢材导热系数

F_z ——条元间的接触面积

t_z ——传导时间

h_c ——条元的厚度

T_i ——条元间的温差

假设钢坯的出炉温度均匀,那么条元 I 和 II、III、IV 的温差只是表面积上的差别,即条元 I 的表面积近似为条元 II、III、IV 的 2 倍,也就是说辐射温降是条元 II、III、IV 的 2 倍;由于温差的出现,传导便开始进行,从而形成了条元 I 温度最低,其次为条元 II、III、IV。对于硅含量高的无取向高牌号和取向钢来说,传导系数远低于无取向低牌号硅钢和普板,见表 3 所示。

表 3 不同硅含量硅钢的热导率

$w(\text{Si})/\%$	热导率/ $(\text{J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
0	0.544
0.6	0.461
1.5	0.322
3.0	0.230
4.2	0.167

因此条元 I 的温降就更大,由此带来的后果是,生产硅含量高的热轧板卷边裂大,轧辊在板材

边部磨损严重,形成一个磨损峰值。当然生产普板这一问题也存在,只是稍轻而已。这样就很容易解释热轧轧辊的磨损曲线,如图 1 所示。由计算可以得知,对于 210 mm 厚的板坯边部 5 mm 为大温降区,其硬度将高于板面硬度 HV 5~8,此边部的 5 mm 相当于精轧前的 30~35 mm。由于每架立辊的压下,使轧制每道次后的大温降区缩小并形成较均匀硬边部区,随着精轧过程的继续,轧件硬边部区随轧件变薄也就逐渐变宽。由于轧件硬度局部增大,延伸率减小(再加上轧件边部横向流动大),在精轧过程中形成边裂,也使轧辊磨损出现峰值。硅含量越高,热传导系数越小,裂边也就越严重;由于轧件边部横向流动性好,即宽展,板材最边部的单位轧制力小,因此,轧辊的磨损峰值出现在距边部 50~260 mm 之内。轧件的硅含量越高,轧辊磨损峰值就越大,而且离边部越近。钢带表面硬度与轧辊磨损的不均匀相对应,磨损峰值越高,板面的硬度就越高(最边部除外,这是因为热轧带的边降,使得最边部的单位轧制压力减小,带钢硬度虽高,但磨损并非最严重)。即使 CP 每侧切边 60 mm,切除了热轧卷的边裂,但因钢带硬度的不均匀,切边后的钢带边部依然属最高硬度区,因此冷轧边裂是很难避免的。



图 1 热轧轧辊的磨损曲线

2.1.2 减少边裂的办法

根据以上分析,要解决边裂关键在于使热轧轧件边部温度均匀化,由上述分析可知,减少条元 I 的表面积是最有效的方法之一,就是将条元 I 的直角表面积改为弧面表面积,如图 2 所示。因为在相同面积下,最短周长的图形是圆。为了实现这一点,热轧厂应对 VSB 大立辊破鳞机和 E2、E3、E4 立辊轧机采用圆弧孔型轧制。圆弧的半径越大,辐射温降的表面积也就越小,由于中间坯边部的厚度中心也属温降较大的区域,建议采用如图 3 所示的立辊孔型,其它如 E2、E3、E4 立辊轧机也采用相似的孔型,这样做还有一个好处,即降低了轧件边部对轧辊的磨损峰值,提高轧辊的使用周期。

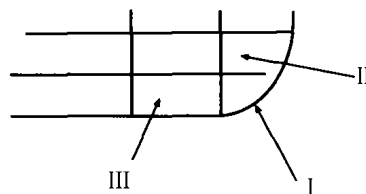


图 2 中间坯的角部形状

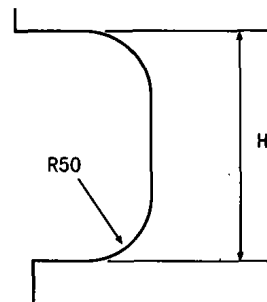


图 3 VSB 立辊孔型示意图

为了减少断带及轧制边裂,对于硅含量高的轧材,尤其在开坯阶段宜采用辊系负凸度轧制,这样可以加大两向压应力的应力状态,提高轧材的塑性,减少边裂和引起的断带;我们知道,冷轧断带可由两种状态形式,一是边部延伸变形不足造成拉裂,二是边部硬度高、脆性大形成轧裂,因此,断带不仅与轧件板形有关,还与轧辊凸度、轧件的边部状态、化学成分和机械性能有关。这就要求 ZR 轧机轧辊的凸度设置充分结合轧件板形、边部状态、化学成分和机械性能。

如将 ZR 轧机设置为负凸度或零凸度,必将导致横向厚差大、轧裂(Q 材)、边浪(W 材)机会增加(目前 ZR 轧机辊系接近于零凸度,在轧辊的有害接触区内形成微边浪轧制),而若将 ZR 轧机设置为正凸度,将会造成中间浪和拉裂机会增加。根据这一分析,建议热轧厂采用零凸度或小凸度轧制硅钢,将有助于 ZR 轧机的辊型调整,提高冷轧硅钢片的板形质量和横向厚度精度。当然,ZR 轧机的辊型不合理也不可能轧出板形好、横向厚度精度高的产品。

2.2 横向厚度精度和板形

2.2.1 板形和横向厚差的分析

(1)热轧来料的横向厚度分布(随机抽取)见表 4。

(2)冷轧产品的横向厚度分布,见表 5。

(3)按相似形理论进行分析。

按相似表原理,热轧来料厚度/产品厚度 = 热轧来料凸度/产品凸度,但由于 ZR 轧机特有的辊

形调节方式和金属的横向流动原理,导致热轧来料厚度/产品厚度与热轧来料凸度/产品凸度有很大的差异,如图 4 所示。

由此可见,成品与原料断面并非属于完全的相似形,这说明热轧原料的横向厚度分布只是影响产品横向厚度精度的主要因素之一。

表 4 热轧来料的横向厚度分布表

12511 号热轧原料横向厚度分布/mm									
2.218	2.138	2.142	2.145	2.146	2.148	2.149	2.150	2.151	2.151
2.154	2.154	2.154	2.156	2.156	2.156	2.155	2.155	2.155	2.154
2.155	2.154	2.158	2.157	2.156	2.154	2.154	2.154	2.152	2.151
2.151	2.150	2.149	2.147	2.145	2.145	2.143	2.142	2.138	2.128
12548 号热轧原料横向厚度分布/mm									
2.207	2.217	2.221	2.224	2.226	2.227	2.228	2.232	2.234	2.235
2.237	2.239	2.239	2.239	2.239	2.240	2.240	2.243	2.242	2.242
2.240	2.242	2.242	2.243	2.424	2.239	2.238	2.239	2.237	2.237
2.238	2.238	2.238	2.238	2.237	2.238	2.236	2.231	2.215	2.207

表 5 冷轧产品的横向厚度分布

卷号 B(6-14)12531(两边切除 20 mm)/mm									
0.492	0.493	0.501	0.498	0.499	0.499	0.500	0.501	0.498	0.499
0.499	0.497	0.496	0.495	0.497	0.500	0.499	0.500	0.499	0.500
0.501	0.501	0.503	0.503	0.501	0.501	0.498	0.494	0.495	0.495
0.497	0.500	0.496	0.494	0.495	0.493	0.492	0.495	0.495	0.494
0.494	0.493	最大厚差 11 μm							
卷号 B(6-14)12548(未切边)/mm									
0.491	0.494	0.493	0.494	0.495	0.497	0.500	0.498	0.498	0.498
0.498	0.500	0.499	0.502	0.499	0.500	0.500	0.504	0.500	0.501
0.502	0.501	0.501	0.503	0.502	0.500	0.502	0.497	0.496	0.494
0.499	0.499	0.492	0.503	0.499	0.493	0.493	0.491	0.497	0.485
最大厚差 11 μm									

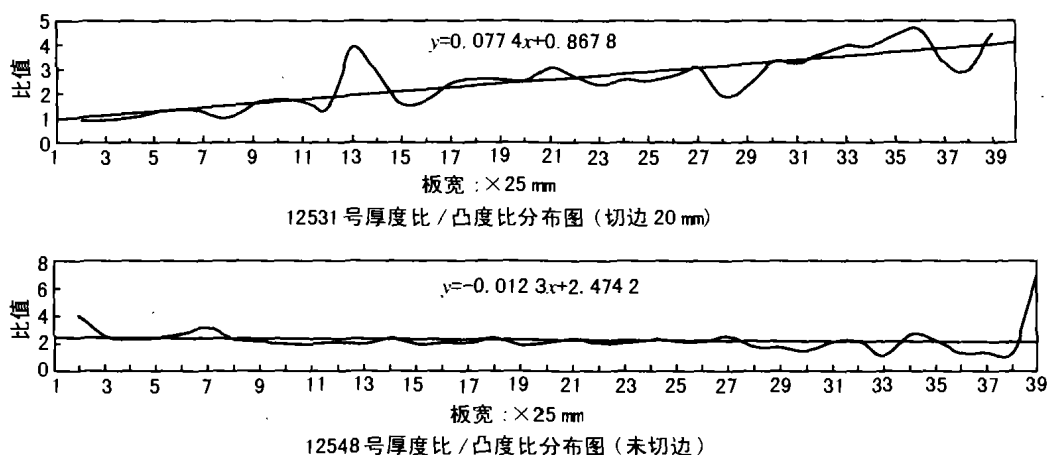


图 4 热轧来料厚度/产品厚度与热轧来料凸度/产品凸度曲线

(4)影响冷轧钢板横向厚度精度的主要因素
根据轧制原理可知,影响冷轧钢板厚度精度的因素有很多,但主要因素为①原料的横向厚度分布;②轧机的横向刚度;③变形区的接触弧长;

④乳化液类型;⑤轧件的变形抗力;⑥前后张力的
大小等。

(5)理论分析

在来料和轧后的横断面上,分别取出 ΔY 宽

度进行分析,如图5所示。

如图5中, $b(Y)$ 为钢板的横向流动函数, $d[b(Y)]/dY = b'(Y)$ 为金属横向流动函数的一阶导数。

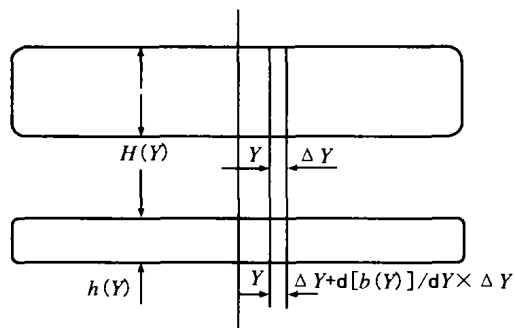


图5 轧前轧后横断面分析图

根据体积不变定律:

$$H(Y)L(Y)\Delta Y = h(Y)l(Y)(\Delta Y + b'(Y)\Delta Y) \quad (3)$$

$$\text{即 } H(Y)L(Y) = h(Y)l(Y)[1 + b'(Y)] \quad (4)$$

(4)式两边取增量得:

$$\begin{aligned} H(Y)\Delta L(Y) + L(Y)\Delta H(Y) = \\ [h(Y)\Delta l(Y) + l(Y)\Delta h(Y)] \\ [1 + b'(Y)] + h(Y)l(Y)\Delta b'(Y) \end{aligned} \quad (5)$$

(5)/(4)得:

$$\begin{aligned} \Delta L(Y)/L(Y) + \Delta H(Y)/H(Y) = \\ \Delta l(Y)/l(Y) + \Delta h(Y)/h(Y) + \\ \Delta b'(Y)[1 + b'(Y)](Y) \end{aligned} \quad (6)$$

在轧制工艺条件及来料状态不变时, $b(Y)$ 可认为符合二次曲线分布, 因此, $\Delta b'(Y) = b''(Y) \times \Delta Y = C \times \Delta Y$ C 可视为常量, 又 $b'(Y)$ 很小, $1 + b'(Y) \approx 1$ 则(6)可简化为:

$$\begin{aligned} \Delta L(Y)/L(Y) + \Delta H(Y)/H(Y) = \\ \Delta l(Y)/l(Y) + \Delta h(Y)/h(Y) + \\ C \times \Delta Y \end{aligned} \quad (7)$$

常数 C 可由实验统计结果确定。

如果来料板形很好, 可以认为 $\Delta L(Y)/L(Y) = 0$

因此(7)式可简化为:

$$\begin{aligned} \Delta h(Y)/h(Y) = \Delta H(Y)/H(Y) - \\ \Delta l(Y)/l(Y) - C \times \Delta Y \end{aligned} \quad (8)$$

要使 $\Delta h(Y)$ 为最小值, 可认为 $\Delta h(Y) = 0$, (6)式应满足下列公式:

$$\Delta H(Y)/H(Y) = \Delta l(Y)/l(Y) + C \times \Delta Y \quad (9)$$

(9)式中 $\Delta H(Y)/H(Y)$ 为热轧来料横向厚度分布函数, $\Delta l(Y)/l(Y)$ 为板形函数, C 可近似为

常量。事实上, 轧制工艺条件的变化和热轧来料横向厚度差的变化使 C 值发生变化。由(9)式可以看出, 要使冷轧钢板横向厚度差最小 ($= 0$), 必须使(9)式成立。如果 $\Delta H(Y)/H(Y)$ 大, 而 $C \times \Delta Y$ 是一个很小的量, 就有 $\Delta l(Y)/l(Y) = \Delta H(Y)/H(Y) - C \times \Delta Y > 0$; 从而必须以牺牲板形为代价才能获得高的横向厚度精度。因此, 热轧来料的横向厚度分布是决定产品横向厚度精度的主要因素。

2.2.2 横向厚度精度

表2已将武钢无取向硅钢片横向厚度精度与宝钢、新日铁进行了对比, 但就硅钢厂 ZR 轧机而言, 其板形和横向厚度精度的控制水平比 CVC、HC 轧机的能力强, 首先是其辊系刚度大和支撑轴承的分段凸度调整系统, 可以随意调整辊系凸度 (ASU); 其次是一中间辊的轴向移动, 这两个功能可以使辊系实现横刚度无穷大轧制, 即最小横向厚差轧制。如果热轧来料板形良好, 则(8)式: $\Delta h(Y)/h(Y) = \Delta H(Y)/H(Y) - \Delta l(Y)/l(Y) - C \times \Delta Y$, 即冷轧产品的相对厚差 = 热轧产品的相对厚差 - 冷轧产品的板形函数的增量 - 金属的横向流动函数的增量。在轧件的边部, 金属横向流动的阻力较小, $\Delta l(Y)/l(Y)$ 较小, $\Delta h(Y)/h(Y)$ 也较大, 从而造成边部减薄。如保证板形良好, 即 $\Delta l(Y)/l(Y) = 0$, 则有 $\Delta h(Y)/h(Y) = \Delta H(Y)/H(Y) - C \times \Delta Y$, 也就是 $\Delta h = [h(Y)/H(Y)]\Delta H - C \times h(Y)\Delta Y$, $[h(Y)/H(Y)]$ 就是厚差遗传系数, $C \times h(Y)\Delta Y$ 是轧制参数和轧件因素而改变的厚差。如图6所示的最大凸度和边部凸起, 尤其是边部凸起部位 $\Delta H(Y)$ 很大, 因此相应位置的冷轧带的横向厚差也就很大, 即 Δh 加大了。减少 Δh 的措施从上式的两项入手, 减小热轧来料的厚差 $\Delta H(Y)$ 和调整 ZR 轧机的辊型减小 C 值。由此可见, 零凸度或负凸度热轧卷有利于提高冷轧产品的横向厚度精度。

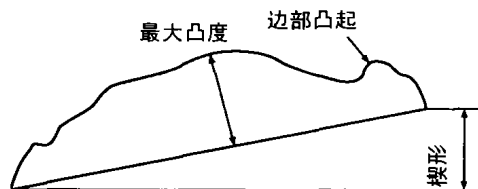


图6 热轧来料的凸度曲线

(下转第58页)

系统、民用燃气轮机等工业制造耐热部件的重要材料。从世界高温合金的发展史来看^[15],自 20 世纪 50 年代末开始,高温合金性能的提高,主要不是靠成分的调整,而是靠工艺的不断改进。先是常压熔炼,而后是真空感应,真空感应与自耗双联、真空精铸、定向结晶、单晶、粉末冶金等等。目前用传统方法生产的镍基高温合金,其使用温度已接近极限温度,由于受到合金熔点温度的限制,必然转向研究新的高温材料。第二,铌基合金的优良特性使其成为航空、航天与核工业中高温结构件的重要候选材料之一,可用来制造火箭发动机、天地往返飞船以及核反应堆的关键材料^[16]。 γ -TiAl 合金由于其低密度、优异的强度和良好的抗氧化性等特性而备受瞩目。近期发展起来的高铌钛铝合金在高温强度及抗氧化性方面已取得了很大进展,如果能解决相关技术问题,将其应用于涡轮盘,将带来巨大的效益。

[参考文献]

- [1] 刘绍蕻. 国外铌的应用状况[J]. 稀有金属与硬质合金, 1988, (1): 35 ~ 38.
- [2] R. L. Kennedy, et al. Developments in Wrought Nb Containing Superalloys(718 + 100 °C)[A]. Young - Won Kim, et al. Niobium for High Temperature Applications[C]. TMS, 2004. 11 ~ 21.
- [3] Xishan Xie, The Research and Development of Nb - Containing Superalloy in China [A]. Young - Won Kim, et al. Niobium for High Temperature Applications[C]. TMS, 2004. 35 ~ 49.
- [4] R. Tanaka, et al. Newly Developed Niobium - Based Superalloys for Elevated Temperature Application [A]. Young - Won Kim, et al. Niobium for High Temperature Applications[C]. TMS, 2004, 89 ~ 98.
- [5] 王 镐. 高温铌合金[J]. 稀有金属快报, 1999, (6): 9 ~ 12.
- [6] 东 华. 能耐受高温应力的铌合金[J]. 材料工程, 1992, (5): 18 ~ 20.
- [7] 张小明. 日本 Nb 基超合金和复合材料研究新进展[J]. 稀有金属快报, 2005, (2): 3 ~ 7.
- [8] 赵 群, 于永泗. 铌基合金的抗高温氧化性研究[J]. 材料导报, 2003, (2): 29 ~ 31.
- [9] 吴 欢. γ -TiAl 薄板的现状及成形技术[J]. 稀有金属快报, 2005, (4): 39 ~ 41.
- [10] 缪家士. 高铌钛铝基金板材的高温包套轧制[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, (4): 436.
- [11] Young - Won Kim, Role of niobium in the progress of gamma alloy development [A]. Young - Won Kim, et al. Niobium for High Temperature Applications[C]. TMS, 2004. 125.
- [12] 张和善. 国外航空结构材料发展概况—高性能金属材料[J]. 航空制造工程, 1997, (11): 3 ~ 6.
- [13] Guoliang chen, et al. Development of High Nb Containing High Temperature TiAl Alloys [A]. Young - Won Kim, et al. Niobium for High Temperature Applications[C]. TMS, 2004. 153.
- [14] 苏继龙. γ -TiAl 基金机械性能的研究进展[J]. 稀有金属快报, 2005, 24(4): 1 ~ 5.
- [15] 师昌绪. 中国高温合金 40 年[J]. 金属学报, 1997, (1): 1 ~ 8.
- [16] 殷 磊. 铌及铌合金高温抗氧化研究进展[J]. 材料保护, 2003, 6(8): 4 ~ 8.

(收稿日期: 2005 - 07 - 14)

(上接第 44 页)

2.2.3 板形

对无取向硅钢来讲,板形类废品和让步品都属不良品中的最大量,因此,减少板形类缺陷是硅钢厂降废的主要环节。板形和横向厚差是矛盾的,但它们统一在式(8)中,即: $\Delta I(Y)/I(Y) = \Delta H(Y)/H(Y) - \Delta h(Y)/h(Y) - C \times \Delta Y$, 即板形问题从 ZR 轧机的辊型设置中可以得到解决。热轧来料的横向厚差越小,冷轧产品的横向厚差也越小,板形也就越好。事实正是如此,板形类缺陷大部分产生在有边部凸起的热轧来料卷上,对于如图 6 所示的热轧来料的凸度曲线。最易产生浪形的位置在边部凸起处,即 $\Delta H(Y)/H(Y)$ 最大,也就是凸度变化最大的位置,与这个位置相对应的正是热轧机轧辊磨损的峰值处。但在最大凸度位置虽然可能不产生浪形,而横向厚差不可避免。

因此,要做到板形良好,首先削去轧辊磨损峰值,避免带钢边部凸起的形成,使凸度曲线光滑无拐点,其次是减小最大凸度值。削去轧辊磨损峰值的办法可通过改进交插轧制法、利用 HCW 轧机的自由规程轧制法和提高轧辊的高温耐磨性。

3 结 论

(1) 采用圆弧过渡的立辊孔型可以改善钢卷的边部温降,减少 Q 材钢卷的裂边,提高成材率,缓解了轧辊的磨损峰值。

(2) 采用零凸度或小凸度热轧原料有利于 ZR 轧机的辊型调整,改善 W 材的成品板形,提高钢板的横向厚度精度。

(3) 提高 Q 材热轧卷的宽度,有利于提高成品宽度,而对于切边量较大的钢卷,同样提高了钢板的横向厚度精度。

(收稿日期: 2004 - 12 - 10)