

压延铜箔板形控制实用技术研究

赵天胜, 陈 宾, 贺玲慧

(中色奥博特铜铝业有限公司, 山东 临清 252600)

摘 要: 随着生产技术的不断进步以及对产品质量要求越来越高, 用户对压延铜箔的表面质量和板形要求日益严格。针对压延铜箔在 X 型六辊箔轧机轧制过程中出现的严重板形问题, 以宽度 630 mm、厚度 18 μm 的紫铜箔轧制过程为例, 着重分析了加工道次、张力控制以及支撑辊型对双肋浪、双边浪、中间浪等板形问题的影响, 并提出了相应的解决方案。结果表明: ① 在总加工率不变的情况下, 减少加工道次, 可以增加每道次产生的变形热, 有利于残余应力的释放, 进而改善板形; ② 适当的加大张力, 并调节入口张力与出口张力相等, 可以有效地对板形进行调节; ③ 设置支撑辊总凸度值为 0.3 mm 以及磨削支撑辊二级辊型均可有效改善板形。

关键词: 压延铜箔; X 型轧机; 板形; 轧制道次; 张力; 辊型

中图分类号: TG146.1⁺1; TG339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2019)05-0512-05

Research on Shape Control Technology of Rolled Copper Foil

ZHAO Tiansheng, CHEN Bin, HE Linghui

(CNMC Albetter Albronze Co., Ltd., Linqing 252600, China)

Abstract: With the continuous improvement of production technology and higher requirement for product quality, users are increasingly strict about the quality of surface and plate shape of rolled copper foil. In view of the serious plate shape problems of rolled copper foil by X-type rolling mill, taking the rolling process of copper foil with width of 630 mm and thickness of 18 μm as an example, the influences of the rolling passes, the tension control and the backup roll profile on the plate shape problems of the double-rib wave, the middle and double waves are analyzed emphatically, and the corresponding solution is put forward in the paper. The results showed that: ① under the condition of the same total processing rate, the plate shape problems can be effectively improved by reducing rolling passes, which can generate more deformation heat per rolling pass to release residual stress; ② the plate shape can be effectively regulated by appropriately increasing the tension, and adjusting the inlet tension and export tension equal; ③ setting the backup roll crown as 0.3 mm, and grinding secondary roller profile of backup roll can also be beneficial to plate shape.

Key words: rolled copper foil; X-type rolling mill; plate shape; rolling passes; tension; roll profile

1 前 言

随着航空航天、计算机与通信、汽车电子和和高端电子产品等领域的快速发展, 铜箔作为电子互联的基础材料, 需求量也在日益增加。相比电解铜箔, 压延铜箔因其高延展、高挠曲性及超低轮廓而广泛应用于挠性覆铜板(flexible copper clad laminate, FCCL)、印制电路板(printed circuit board, PCB)及锂电池行业^[1-3]。随着生产

技术的不断进步以及对产品质量要求越来越高, 用户对压延铜箔的表面质量和板形要求日益严格, 铜箔板形(即平直度)的好坏已经成为评价铜箔质量的一项重要指标, 不良板形会造成铜箔与基板的结合不良, 导致开裂、褶皱等问题。板形控制是铜箔轧制的核心技术, 国内压延铜箔板形控制研究仍处于开发试制阶段, 板形控制能力较差, 客户投诉板形问题较多, 主要问题是严重的 1/4 浪以及宽幅板形起伏较大。本文从铜箔板形缺陷产生的原因和特点进行分析, 结合 X 型轧机的调控手段, 针对不同类型的板形缺陷提出改善措施。

2 铜箔板形缺陷产生的原因

板形是指板带材的平直度, 即板带材是否产生波形、

收稿日期: 2017-11-15 修回日期: 2018-02-08

第一作者: 赵天胜, 男, 1990 年生, 助理工程师,

Email: ztsyhlh@163.com

通讯作者: 陈 宾, 男, 1972 年生, 高级工程师,

Email: hschenbin@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2019.05.13

翘曲、侧弯,板形的好坏取决于板带沿宽度方向各部分的延伸是否相等。波形是指板带材纵向呈起伏的波浪,有双边波浪、单边波浪、中间波浪等。影响铜箔板形的因素有内因和外因两个方面,内因是指金属本身的物理性能,直接影响了轧制压力的大小;外因是指摩擦条件、轧辊直径、辊形、张力、轧制速度、弯辊力、轧制工艺、磨损、铜箔母材的来料公差与板形等,这些都会影响铜箔最终板形^[4,5]。实际的板形控制非常复杂,需要根据来料的规格选择合适的轧制工艺,根据带材的实际情况预设轧制力、弯辊力及张力。

铜箔越薄,板形越难以控制。板形控制的实质是轧件内部的残余应力分布,当不均匀变形时,轧件内的残余应力也呈不均匀分布,当附加的应力超过一定临界值时,就会形成不同形式的弯曲,形成诸如双边波浪、单边波浪、中间波浪、二肋浪等板形缺陷。在实际生产中由于变形的复杂性,要想从原来就有厚差的母材坯料获得优良铜箔板形,同时保证横向厚差是不可能实现的,或多或少都存在一定的不平度。

铜箔轧制时轧辊横向压下一致是保持板带平整的必要条件。压下横向不一致的结果是:微观地、微小地产生内应力,宏观地、严重地产生板形不平整。假设一段带材由许多细长条并排连接而成,带材的轧制变薄即意味着细长条被拉长。当带材沿宽度方向各部分的延伸不一致时,即意味着细长条的拉长程度是不一致的。由于细长条之间彼此是相互连接的,因此延伸较长的细长条会受到压应力,而延伸较短的细长条会受到拉应力,这些应力构成了整个带材宽度上的内应力分布。当细长条所受的应力达到一定的程度时,会产生弯曲变形,这些变形就构成了整个带材宽度上的“波浪”缺陷。

3 铜箔轧制的特点

铜箔与板带的区分主要是厚度,国内是以 0.05 mm 区分,美、日等国以 0.1 mm 区分。由于铜箔很薄,所以对厚度的不均匀非常敏感,一般来说,在 0.035 mm 以下厚度轧制时使用负辊缝为主体的 AGC 控制方式。在负辊缝状态下,轧辊的变形已是一个非圆轮廓,压下量与轧制压力的大小已无绝对关系,轧制过程已完全由张力和轧制速度的大小来控制。不能通过轧制力的改变去补偿这个变形,故需采用速度和张力来减薄箔材的厚度。根据最小轧制厚度公式^[6]:

$$H_{\min} = 3.58D\mu K/E \quad (1)$$

式中, H_{\min} 为最小可轧厚度; D 为工作辊辊径; μ 为铜箔与

轧辊间的摩擦系数; K 为金属平面变形抗力; E 为弹性模量。

为了轧制出更薄的板带材,必须减小工作辊辊径,并采用高效的工艺润滑剂,减小金属的变形抗力,增加轧辊的弹性模量,有效地减小轧辊的弹性压扁。

4 铜箔实际板形案例分析

目前国内 4 家压延铜箔厂家,3 家使用的箔轧机均为日本 IHI 六辊 X 型轧机,1 家采用米诺六辊 UC 轧机。与传统轧机相比, X 型轧机采用双支撑辊支撑,轧制过程中轧辊不易变形,因此板形控制的稳定性好。X 型轧机的板形测量方式为 16 个转子分段测量,板形测量更精确,控制模式有辊缝控制、速度 AGC、张力 AGC,轧制过程更稳定。X 型轧机基于设备本身的设计,板形的控制最突出特点为分段冷却与分段加热控制。下面以 X 型轧机实际轧制过程中出现的铜箔板形问题为例,探讨具体板形问题的解决方法。

4.1 双肋浪

肋浪是铜箔轧制过程中最难解决的板形问题,其形成原因比较复杂,为了消除肋浪,需协调控制轧制道次、道次加工率、前后张力等工艺参数。

4.1.1 轧制道次对双肋浪的影响

针对 X 型轧机实际生产中出现的双肋波浪情况,根据实际情况通过调整轧制道次、张力以及支撑辊辊型,取得了良好的板形。以宽度为 630 mm、厚度为 18 μm 的铜箔轧制为例(母材厚度为 0.15 mm),对比了不同轧制工艺对板形的影响,轧制工艺参数如表 1 所示。

3 种轧制工艺的总加工率相同,分别采取 4 道次、5 道次、6 道次轧制,保持成品的加工率、张力等参数设置一致,观察轧制道次对双肋浪的影响。图 1 为采用不同轧制工艺轧制后的板形情况,可以看出,4 道次轧制后(方案 A)铜箔表面有微小的肋浪;当轧制道次为 5 道次时(方案 B),铜箔表面肋浪数目增加;当轧制道次为 6 道次时(方案 C),铜箔表面的肋浪更加明显且宽大。由此可见,轧制道次越少,铜箔的板形越好,原因主要为首道次及第二道次的加工率大,产生的变形热多,有利于残余应力的释放,减小了变形抗力,有利于板形调节。实践表明,铜箔轧制时,变形抗力越大,铜箔的厚度公差越难以控制,为了保证出口厚度公差,系统会自动增大轧制力,会出现厚度公差为负公差,此时系统又会减小轧制力,既而可能导致厚度公差为正公差,如此循环往复,导致出口铜箔板形随着轧制力的波动发生变化,不利于保持板形稳定性。

表 1 18 μm 厚铜箔的不同轧制方案及其工艺参数

Table 1 Rolling programs and its process parameters for rolled copper foil with thickness of 18 μm

No.	Entry thickness /mm	Exit thickness /mm	Entry tension /N	Exit tension /N	Rolling force /kN	Rolling speed /(m/min)	Coiling temperature /℃
A	0.15	0.06	5670	4600	550	460	86
	0.06	0.036	2760	2950	500	565	73
	0.036	0.024	1500	2000	470	440	54
	0.024	0.018	1000	1500	520	380	40
B	0.15	0.082	5670	6200	440	390	80
	0.082	0.049	3400	3700	460	370	66
	0.049	0.034	2100	2800	450	400	50
	0.034	0.024	1300	1800	480	390	42
	0.024	0.018	1000	1500	520	360	39
C	0.15	0.09	5670	4600	500	360	75
	0.09	0.062	3400	4680	450	365	61
	0.062	0.044	2350	3320	450	410	48
	0.044	0.032	1660	2410	440	350	44
	0.032	0.024	1210	1800	485	370	40
	0.024	0.018	1000	1500	520	370	38

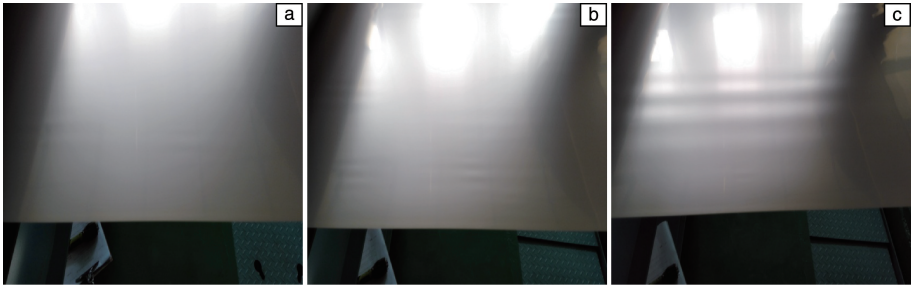


图 1 采用不同总轧制道次轧制后的板形情况：(a)4 道次，(b)5 道次，(c)6 道次

Fig. 1 Plate shapes under different total rolling passes: (a) 4 rolling passes, (b) 5 rolling passes and (c) 6 rolling passes

4. 1. 2 张力对双肋浪的影响

使用 4. 1. 1 节第一套轧制工艺，改变张力(具体方案列于表 2)，探讨张力对板形的影响。实际板形对比发现，张力大且入口张力等于出口张力时板形最好，如图 2 所示，其中红色圆圈标记处为产生浪形。在箔轧机上是以改变入口张力来进行厚度控制。如图 2d 所示，当来料厚度 H 有一个正偏差 ΔH 时，轧后带材厚度 h 将产生正偏差 Δh 。在辊缝不变的情况下，通过加大入口张力，使塑性曲线的斜率减小，由“曲线 B(小张力)”变为“曲线 B(大张力)”，曲线 A 与“曲线 B(大张力)”交点的横坐标为 h ，从而消除厚度偏差 Δh 使轧后带材的厚度 h 保持不变。对比图 2 板形可看出，张力对板形影响是明显的，随着前张力的增加，板凸度呈下降趋势，即板形趋于良好；当前张力不变，后张力增加时，板形改善更加

表 2 张力控制方案

Table 2 Tension control plan

No.	Entry thickness /mm	Exit thickness /mm	Entry tension /N	Exit tension /N	Rolling force /kN	Rolling speed /(m/min)
1	0.024	0.018	1000	1500	520	380
2	0.024	0.018	1000	1000	520	450
3	0.024	0.018	1500	1500	520	320

明显。可见无论增大前张力还是后张力对板形改善都是有益的，这是因为张力增加会使轧辊挠度变小，板凸度也随之变小。另外张力的增加可减小金属的变形抗力，有利于金属流动，使箔材沿着板形改善的方向发展，这种现象也被称之为前张力对板形的均化作用。而前张力

与后张力相等时板形最好，是因为无论前张力大于后张力还是后张力大于前张力，轧辊都会因箔材前后张力不同的作用产生向前或向后的变形，而轧辊凸度的变化即会引起板凸度的不良变化，导致板形变差。

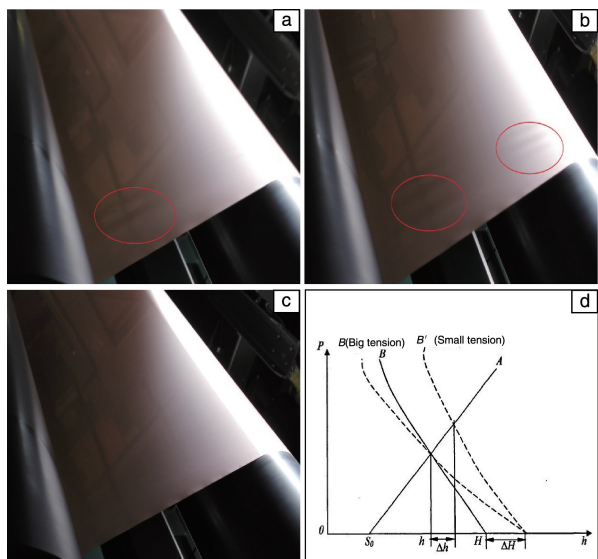


图2 不同张力下轧制后板形：(a)方案1，(b)方案2，(c)方案3。张力调节 P - H 图(d)

Fig. 2 Plate shapes after rolling with different tensions: (a) No. 1 program, (b) No. 2 program, (c) No. 3 program. P - H diagram for tension regulation (d)

4.1.3 支撑辊辊型对双肋浪的影响

为更好地解决双肋浪问题，我们在实际生产中采取了二级辊型方式，通过模拟米诺六辊 UC 轧机的中间辊锥辊抽辊调节方式，有效地解决了肋浪问题。

4.2 双边波浪和中间波浪

生产初期支撑辊凸度为微凸，总凸度值 0.1 mm，轧制过程中出现严重双边浪，边部压折严重，如图 3a 所示；增大总凸度至 0.3 mm 时，板形趋于良好，如图 3b 所示；继续增大支撑辊总凸度至 0.4 mm，铜箔出现了严重的中间浪，如图 3c 所示。分析主要原因为，支撑辊凸度过小，推上缸活塞作用于支撑辊两端，当轧制力增大时，轧辊两端变形程度大于中间的变形程度，导致箔材边部的受力大，中部受力小，最终使得箔材边部延伸较中部延伸大，产生不均匀变形，形成“双边浪”。调整支撑辊总凸度为 0.3 mm 后，双边浪消失，板形趋于良好，主要是因为增大凸度后，补偿了轧辊两端的变形，使得箔材横向受力更加均匀，进而获得良好的板形。然而，当继续增大支撑辊凸度时，轧制过程中，轧辊两端变形程度不足以补偿凸度值，造成箔材中间受力较边部受力大，使得其变形不均匀，最终形成中间浪。由此可见，支撑辊总凸度值大小是控制铜箔板形的重要参数，合理控制轧制过程中的总凸度值有利于铜箔板形的改善。

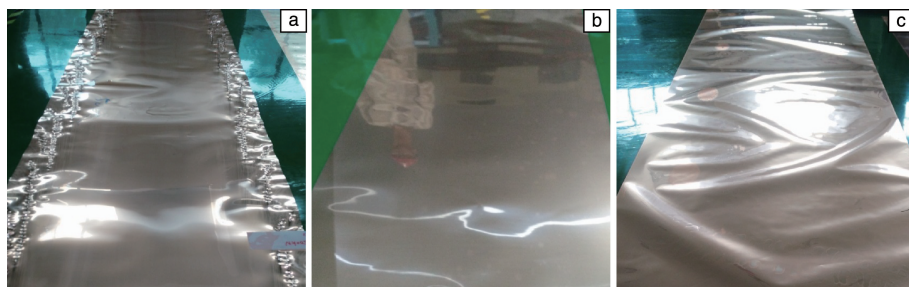


图3 不同支撑辊凸度值下板形情况：(a)0.1 mm，(b)0.3 mm，(c)0.4 mm

Fig. 3 Plate shape under different crown value of back-up roll: (a)0.1 mm, (b)0.3 mm, (c)0.4 mm

4.3 单边浪

图4是典型的单边浪板形照片。出现单边浪的主要原因有以下几个：一是铜箔母材存在较严重单边浪，经正常轧制后无法完全消除；二是轧件对中存在偏差，板形调整时出现一边压力过大；三是轧辊偏心或是锥度过大。消除单边浪可通过调整偏调、保证轧件对中与轧辊精度改善。

5 结论

(1)减少加工道次、磨削二级支撑辊辊型以及设置张力参数为出口张力等于入口张力，可以有效改善 18 μm 厚铜箔板形；



图4 单边浪板形

Fig. 4 Plate shape of single waves

(2) 支撑辊总凸度值为 0.3 mm 时, 可以有效消除双边浪及中间浪;

(3) 良好的母材板形、保证轧辊磨削精度可以获得良好的铜箔板形。

参考文献 References

- [1] Dong Youjian(董有建). *Advanced Materials Industry*(新材料产业)[J], 2012(1): 11-15.
- [2] Zhang Zhuanli(张专利). *Nonferrous Metals Engineering & Research*(有色冶金设计与研究)[J], 2015, 36(4): 36-39.
- [3] Liu Jianguang(刘建广). *Printed Circuit Information*(印刷电路信息)[J], 2015, 23(2): 13-20.
- [4] Chen Hanwen(陈汉文). *Nonferrous Metals Processing*(有色金属加工)[J], 2011, 40(4): 20-24.
- [5] Ji Haiyan(姬海燕). *Nonferrous Metals Processing*(有色金属加工)[J], 2014(6): 53-57.
- [6] Zhong Weijia(钟卫佳). *Copper Processing Technology Practical Handbook*(铜加工技术实用手册)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 845-846.

(编辑 惠 琼)