

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190069

镀锡板翘曲控制策略研究与应用

唐 伟^{1,2}, 杜凤山¹, 文 杰³, 林海海³

(1. 燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司
冷轧作业部, 河北 唐山 063200; 3. 首钢集团有限公司技术研究院冶金过程研究所, 北京 100041)

摘 要: 针对镀锡板生产中存在的翘曲控制问题, 考虑到镀锡基板与镀锡板翘曲高度和方向在上下游工序的遗传和演变, 研究了一次冷轧镀锡基板和二次冷轧镀锡基板在平整和二次冷轧时翘曲的控制策略, 分析了卷取过程对不同钢种、规格镀锡板翘曲高度的影响, 研究了镀锡线拉矫机的翘曲控制特性。在此基础上, 提出了镀锡板在平整/二次冷轧、拉矫以及卷取过程的翘曲控制策略, 并在某镀锡板生产厂得到应用, 镀锡板产品翘曲高度控制精度得到大幅提升。

关键词: 镀锡板; 翘曲; 双机架平整机; 卷取; 拉矫机
文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)12-0055-07

Research and application of warping control strategy on tinplate

TANG Wei^{1,2}, DU Feng-shan¹, WEN Jie³, LIN Hai-hai³

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 2. Cold Rolling Department, Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 063200, Hebei, China; 3. Metallurgical Process Department, Research Institute of Technology, Shougang Group Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: Aiming at problems of the warping control on tinplate, considering the heredity and evolution of the warping height and the direction on tinplate substrate and tinplate, the warping control strategy of the single cold rolled and double cold rolled tinplate substrate was researched, the influence of the coiling process on the warping height of the tinplate with different steel grades and specifications was analyzed, and the warping control characteristics of tension leveler in electrolytic tinning line was studied. On this basis, the warping control strategy of the tinplate during the temper rolling/double cold rolling, tension leveling and coiling process was put forward. It had been applied in a tinplate manufacturing plant, the accuracy of the warping height control of tinplate products had been greatly improved.

Key words: tinplate; warping; double stands temper mill; coiling; tension leveler

镀锡板是指两面镀有商业纯锡的冷轧低碳薄钢板或钢带, 它将钢的强度和成形性与锡的耐蚀性、易焊性和美观的外表结合于一种材料之中, 结合了薄钢板和锡的优点——薄钢板的可加工性、可焊性、强度及锡使铁光泽和良好的耐蚀性, 所以镀锡板长期作为食品工业的主要包装材料, 并被广泛用于制作其他各种容器和冲压制品^[1]。镀锡板在制作各种容器前, 需对表面进行处理, 如涂白、涂黄、套印等, 一般采用辊涂的方式, 对镀锡板的翘曲控制精度要求较高, 悬垂测量时翘曲高度不能超过 25 mm, 否则将会出现卡机、套色不准等问题, 影响产线的生产效率或产生残次品^[2]。而且, 随着制罐企业的自动化程度越来越高, 对镀锡板翘曲控制精度的要求也越

来越严, 部分高端用户甚至提出悬垂测量时翘曲高度小于 20 mm 的要求。

带钢产生翘曲缺陷的根本原因是在轧制或矫直过程中塑性变形(主要是纵向伸长)沿厚度方向上分布均匀^[3-4]。关于翘曲问题, 国内外学者的研究相对较少, 主要集中在带钢翘曲缺陷生成机理和影响因素等方面。张清东等^[3-6]采用有限元和辛弹性力学等方法研究了带钢翘曲变形行为, 获得了带钢的 L 翘和 C 翘之间的相互转化关系。Toshirou Fujwara^[7]等采用轧制试验的方法分析了辊径差对 L 翘的影响。Wataru Baba 等^[8]研究了单辊传动对带钢翘曲变形的影响。Mucke G 等^[9]针对较为复杂的四角翘展开了深入分析。何建峰^[2]、魏立群

等^[10]对现场可能产生 L 翘和 C 翘的原因进行分析。陈青等^[11]、徐鹏飞等^[12]对镀锡板残余应力分布与翘曲变形之间的关系进行了研究。胡建军等^[13]针对 DR9 镀锡板在二次冷轧和镀锡拉矫过程中的边浪和翘曲问题,通过优化平整机辊形配置和拉矫机设定参数,改善了 DR9 镀锡板的板形质量。顾正秋^[14]、丁荣杰等^[15]对不对称轧制过程带钢翘曲变形的影响因素进行了研究。镀锡板平均厚度小于 0.2 mm,宽厚比一般都在 4 000 以上,翘曲控制难度极大。本文针对双机架平整/二次冷轧、卷取、拉矫等工序的翘曲控制,以给最终用户提供具有稳定、高精度翘曲控制水平的镀锡板为目的,研究镀锡板在上下游工序的翘曲控制策略及相关生产应用。

1 镀锡板翘曲控制的关键工序及问题

镀锡板产品包括一次冷轧镀锡板和二次冷轧镀锡板两大类。从材料成分来看,镀锡板为低碳钢,基本不含合金元素,难以通过相变来获得强化,为了获得强度更大的镀锡板,除了通过成分和退火温度的调整来获得固溶强化和细晶强化,就是使带钢产生更大的变形来获得加工硬化,故而有了二次冷轧工艺。从生产工艺流程来看,热轧板经过五机架连轧后,需再经过退火处理获得一定的组织和性能。退火后其中一部分再经过伸长率在 3% 以内的双机架平整,使带钢强度得到小幅提升,并消除屈服平台,即为一次冷轧镀锡基板;其余的经过压下率为 15%~40% 的双机架二次冷轧,使带钢强度得到大幅提升、厚度减薄,即为二次冷轧镀锡基板^[15]。经过平整或二次冷轧的镀锡基板卷取成钢卷后再送往镀锡线,在镀锡前需经过拉矫改善板形,最终的镀锡板成品将以钢卷的形式发给用户。

为了提高镀锡板产品的翘曲控制精度,生产时往往在平整/二次冷轧时就开始对翘曲进行控制,期望能够给镀锡线提供翘曲高度控制稳定的镀锡基板,但实际上却很难做到,尤其是一次冷轧镀锡基板和二次冷轧镀锡基板,其翘曲控制水平差异较大。图 1 所示为某厂镀锡线入口测量的镀锡基板翘曲高度。样板尺寸为 800 mm×带钢宽度,下同;测量方法为悬垂测量,取翘曲高度最大值,正值表示上翘,负值表示下翘。镀锡线的拉矫机是镀锡板产品翘曲控制的最后一道工序,当镀锡基板翘曲控制水平波动较大时,需频繁调节拉矫机设定参数,尽管如此,仍难以保证镀锡板产品翘曲控制水平的稳定可控。图 2 所示为某厂镀锡线出口测量的镀锡板翘曲高

度。用户也经常提出诸如卷与卷之间翘曲高度差异大、同一卷带头和带尾翘曲高度差异大等问题。

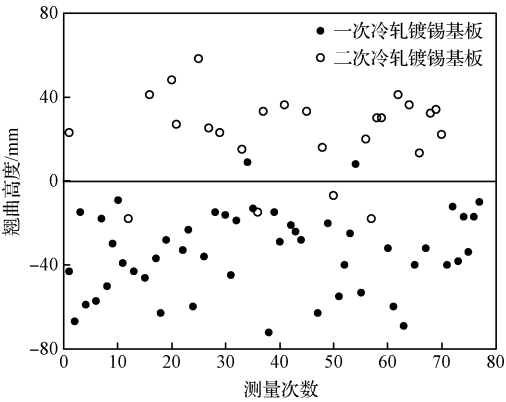


图 1 镀锡基板卷取后翘曲高度测量值

Fig. 1 Measurements of warping height of tinplate substrate after coiling

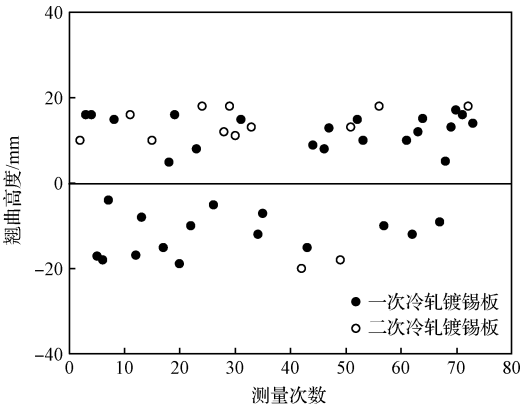


图 2 镀锡板卷取前翘曲高度测量值

Fig. 2 Measurements of warping height of tinplate before coiling

在退火处理后至发送给用户前,镀锡板需经过平整/二次冷轧→卷取→拉矫→卷取等 4 个可能对带钢翘曲产生影响的生产过程。镀锡基板平整/二次冷轧一般采用双机架四辊或六辊轧机,平整后的带钢在卷取后以钢卷的形式送往下道工序。平整/二次冷轧时由于不可避免存在不对称轧制因素,镀锡基板翘曲主要通过上下辊径差配置、防皱辊高度调节等手段进行控制^[10,15],但镀锡基板的翘曲控制稳定性较差,不同规格、不同材质镀锡基板的翘曲高度波动较大。而镀锡基板卷取时一般采用 508 或 420 mm 的内径,卷取时弯曲半径小,在卷取张力和弯曲应力的作用下,带钢的翘曲状态在卷取前后可能会发生改变。镀锡线的拉矫机一般采用两个弯曲辊组+一个多辊矫直辊组的组合形式,如图 3 所示。

这种形式的拉矫机,工作辊辊径小,再配以前后大张力,对镀锡板的翘曲控制能力较强^[13],但目前成品镀锡板的翘曲控制质量仍难以保证稳定可靠,时有质量异议发生。如何综合考虑镀锡板生产的上下游工艺流程的翘曲控制特性,充分发挥各个设备的翘曲控制能力,使得不同品种、不同规格镀锡板的翘曲控制精度达到最优,是本文的研究目的。

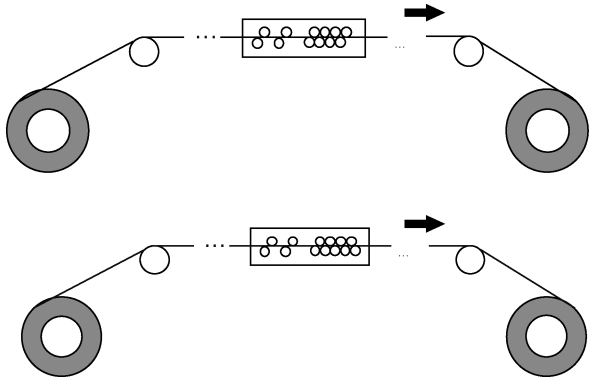


图 3 镀锡线开卷、拉矫与卷取示意图

Fig. 3 Schematic of uncoiling, tension leveling and coiling in electrolytic tinning line

2 双机架平整/二次冷轧过程镀锡基板翘曲控制策略

轧制过程中,带钢在轧制压力和张力的作用下,沿厚度方向减薄并沿长度方向产生延伸,当带钢上下表面伸长率存在差异时,就有可能产生翘曲缺陷。而造成这种带钢上下表面延伸不均的因素有很多,但归结起来,根本原因就是轧制过程瞬时的不对称。这种不对称因素主要包括:(1)上下辊径差、偏心等几何条件不对称;(2)上下辊粗糙度差、润滑条件差异等摩擦条件不对称;(3)上下辊速差等运动学或动力学不对称;(4)带钢力学性能不均匀等^[14]。

这些不对称的因素会造成轧制过程中带钢产生翘曲缺陷,同样利用这些不对称因素,也可以对带钢翘曲进行控制。但在平整机/轧机的这些不对称因素中,能够在轧制过程中实时或者经过短暂停机进行调节且具有较好翘曲控制效果的参数却不多。文献[14]的研究表明,轧辊圆周速度差异和轧辊半径差异这两个因素对轧制过程带钢翘曲影响的重要程度与压下率的大小有关。当压下率较小时,轧辊圆周速度差异影响更大,轧制后带钢向辊径较小的工作辊一侧翘曲;当压下率较大时,轧辊半径差异影响更大,轧制后带钢向辊径较大的工作辊一侧翘曲。文献[15]提出利用合理的上下工作辊偏心量可以有

效控制带钢翘曲高度。文献[17]的仿真和试验研究表明,通过调节平整机的防皱辊和防横断辊高度可以在一定程度上对翘曲进行控制。

镀锡板平整的压下率一般在 3% 以内,二次冷轧压下率则为 15%~40%。而在配辊时,上下工作辊不可避免地会存在一定的辊径差。在轧制过程中,上下工作辊也必然会有一定的偏心量。因此,合理利用这种辊系结构的几何不对称条件,结合防皱辊和防横断辊高度在线调节,能够对镀锡基板平整/二次冷轧过程的翘曲进行有效控制。

3 卷取过程对镀锡板翘曲控制的影响

镀锡板卷的内径有两种,分别为 508 和 420 mm。卷取时,在卷取张应力和弯曲正应力共同作用下,有可能使带钢所受的最大正应力超过其屈服极限,发生塑性变形,进而影响带钢的翘曲状态^[18]。图 4 所示为带钢发生弯曲变形的示意图(图中 σ 为弯曲应力; T 为卷曲张力; θ 为钢卷上一个扇形面角度)。根据胡克定律,带钢发生弯曲变形时最大正应力可以用式(1)表示。

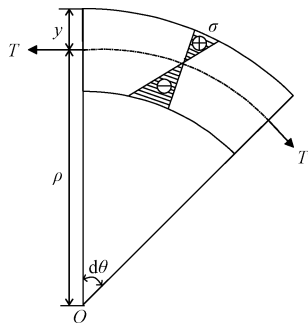


图 4 卷取过程带钢弯曲变形示意图

Fig. 4 Sketch of bending deformation of strip during coiling

$$\sigma_{\text{bend}} = E \cdot \epsilon_{\text{bend}} = E \cdot \frac{y}{\rho} \quad (1)$$

式中: σ_{bend} 为带钢最大弯曲正应力; E 为带钢弹性模量; ϵ_{bend} 为带钢弯曲时最大正应变; y 为带钢弯曲时厚度方向上最大弯曲半径与中性层弯曲半径之差; ρ 为带钢弯曲时中性层处的弯曲半径。

在卷取过程中,带钢表面一般都会涂油,所以可以忽略带钢层与层之间的摩擦力。因此,卷取时带钢所受的最大正应力可以用式(2)表示。

$$\sigma_{\text{max}} = \sigma_{\text{bend}} + \sigma_T \quad (2)$$

式中: σ_{max} 为带钢所受最大正应力; σ_T 为卷取张应力。

图 5~图 7 所示分别为卷取半径 ρ 、卷取张应力

σ_T 、带钢厚度 h 对卷取过程带钢所受最大正应力 $\sigma_{\max}$ 的影响。可以看出,随着卷取半径的减小,带钢所受最大正应力显著增大;随着卷取张应力的增大,带钢所受最大正应力略有增加;带钢厚度越大,卷取时带钢所受最大正应力越大。

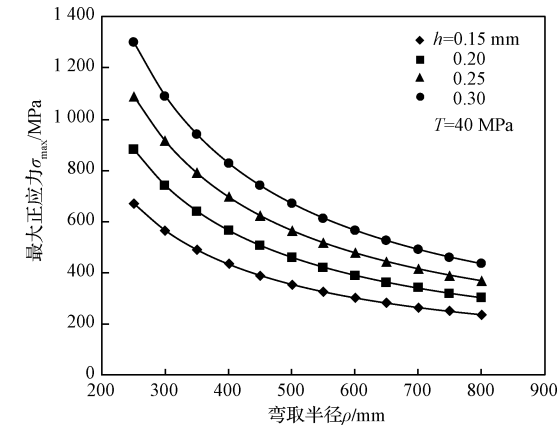


图 5 弯取半径对最大正应力的影响

Fig. 5 Influence of coiling radius on maximum normal stress

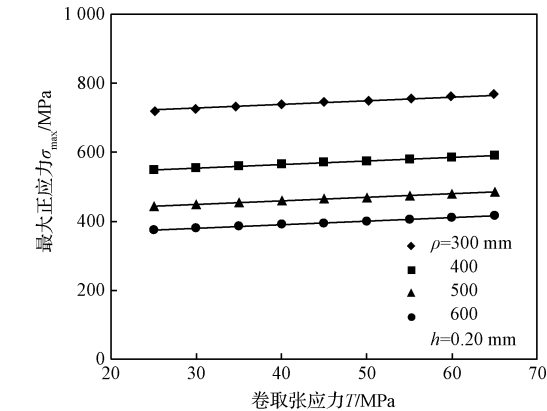


图 6 卷取张应力对最大正应力的影响

Fig. 6 Influence of coiling tension stress on maximum normal stress

主要镀锡板产品的屈服强度见表 1。一次冷轧镀锡板产品屈服强度为 200~420 MPa;二次冷轧镀锡板产品屈服强度为 460~620 MPa。一般而言,一次冷轧镀锡板厚度较大,平均厚度为 0.2 mm 以上;二次冷轧镀锡板厚度较小,平均厚度为 0.2 mm 以下。显然,一次冷轧镀锡产品在卷取过程中所受到的最大正应力已经超过其屈服强度,部分厚度较大的二次冷轧产品在卷取半径较小时所受到的最大正应力也超过了其屈服强度。卷取过程对镀锡板翘曲的影响不能被忽视,若在镀锡板卷取时对钢卷内外圈带钢翘曲高度进行一定补偿,如带头、尾设定不同的拉矫机参

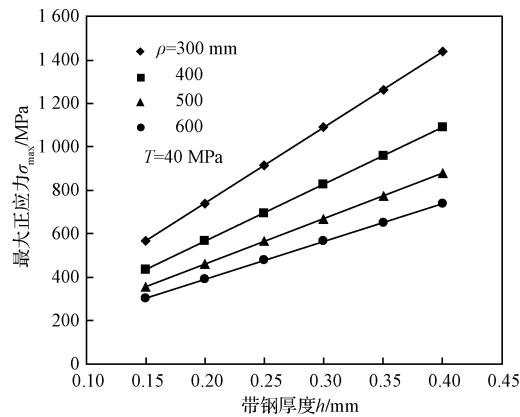


图 7 带钢厚度对最大正应力的影响

Fig. 7 Influence of strip thickness on maximum normal stress

数,将有助于提高整卷镀锡板翘曲高度的稳定性。

表 1 主要镀锡板产品的屈服强度

Table 1 Yield strength of main tinplate products		
产品分类	钢种号	屈服强度 /MPa
一次冷轧镀锡板	T-1 BA	200
	T-2 BA	225
	T-3 BA	250
	T-4 BA	300
	T-3 CA	320
	T-4 CA	380
二次冷轧镀锡板	T-5 CA	420
	DR-7	460
	DR-8	520
	DR-9	620

4 镀锡拉矫过程对镀锡板翘曲控制的影响

目前主流的镀锡线都配置有拉矫机,在电镀锡前改善镀锡基板的板形质量,其整体结构为“两弯一矫”形式,其中“一矫”采用“上 4 下 5”形式的多辊矫直辊组,弯曲辊组由上下各一个辊组成,弯曲辊与矫直辊前后共有 4 个压辊。所有辊组的上辊系固定,通过下辊系上插来实现插入深度的调整^[13]。

为了研究拉矫过程对镀锡板翘曲控制的影响,采用有限元软件建立了镀锡拉矫机的仿真模型,如图 8 所示。拉矫机弯曲辊、矫直辊和压辊均为刚体,带钢采用厚壳单元,没有初始的翘曲缺陷。根据带钢翘曲产生的机理^[9],可以通过拉矫前后带钢上下表面塑性伸长差的改变量来衡量带钢翘曲高度的改变量,进而分析拉矫过程对镀锡板翘曲控制的影响。

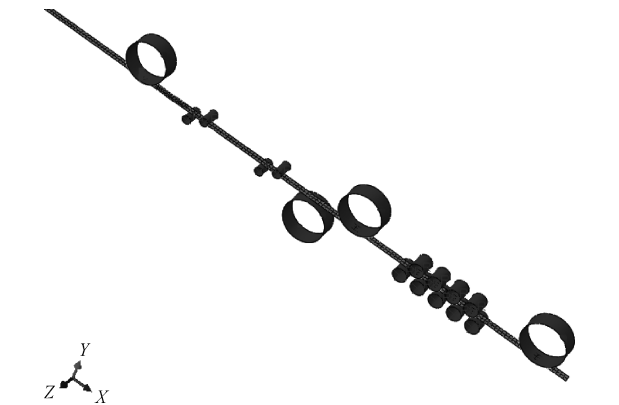


图 8 镀锡线拉矫机仿真模型

Fig. 8 Simulation model of tension leveler in electrolytic tinning line

镀锡线拉矫机用于翘曲控制的参数有 5 个,即 1 号弯曲辊插入深度、2 号弯曲辊插入深度、矫直辊入口插入深度、矫直辊出口插入深度和拉矫机伸长率。采用正交试验设计方法中 L16(4⁵)正交表(5 因素 4 水平)确定仿真工况^[19]。这 5 个控制参数的调节范围和根据正交试验设计方法确定的因素水平分别见表 2 和表 3。仿真计算结果见表 4 和图 9,其中工况编号为根据 L16(4⁵)正交表所确定的 16 个工况,计算结果为带钢上下表面伸长差的改变量,即带

钢经过拉矫机后上下表面所产生的塑性变形差,可以用来衡量拉矫后带钢翘曲的变化情况。上下表面伸长率改变量为正,表明经过拉矫后带钢产生了向下的翘曲;上下表面伸长率改变量为负,表明经过拉矫后带钢产生了向上的翘曲。

表 2 拉矫机控制参数调节范围
Table 2 Adjustment ranges of tension leveler control parameters

控制参数	编码	调节范围
1 号弯曲辊插入深度/mm	A	2~8
2 号弯曲辊插入深度/mm	B	2~8
矫直辊入口插入深度/mm	C	2~6
矫直辊出口插入深度/mm	D	0.1~6.0
拉矫机伸长率/%	E	0.15~0.45

表 3 正交试验因素水平
Table 3 Level of factors in orthogonal test

项目	因素				
	A/mm	B/mm	C/mm	D/mm	E/%
水平	1	2	2	2.0	0.10
	2	4	4	3.3	0.27
	3	6	6	4.7	0.43
	4	8	8	6.0	0.45

表 4 仿真计算结果
Table 4 Results of simulation

项目	数据															
工况编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
伸长差改变量/%	-0.017	0.020	-0.058	0.031	0.038	-0.003	-0.071	-0.011	-0.050	-0.015	-0.010	-0.005	-0.041	-0.001	0.048	-0.019

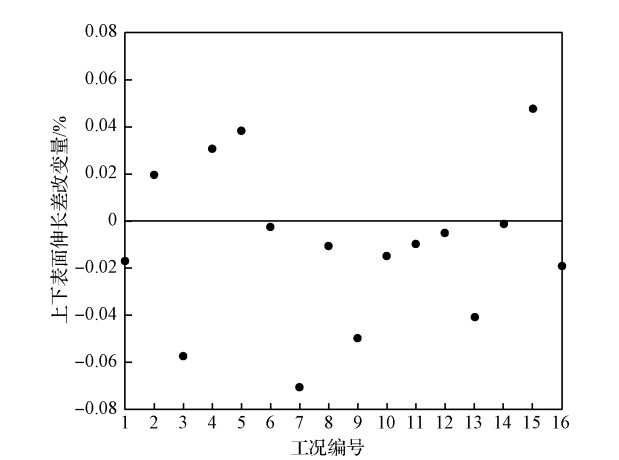


图 9 镀锡线拉矫机翘曲控制能力

Fig. 9 Warping control capability of tension leveler in electrolytic tinning line

从计算结果可以看到,16 个工况中仅有 4 个工况中带钢产生了向下的翘曲(带钢上表面延伸大于下表面),绝大部分的拉矫机控制参数的组合下,带钢都是产生了上翘。可见,镀锡线拉矫机更适用于对原料存在下翘缺陷的镀锡基板进行翘曲控制,当原料存在上翘缺陷时,镀锡线拉矫机对翘曲的改善能力较弱。这也与图 1 和图 2 中镀锡板拉矫前后的翘曲变化情况有较强的对应性,由于镀锡线拉矫机对上翘的改善能力较差,上翘较大的二次冷轧镀锡基板经过拉矫后仍存在一定程度的上翘,大部分钢卷的翘曲高度难以控制在+20 mm 以下。而存在下翘缺陷的一次冷轧镀锡板,经过拉矫后大部分钢卷的翘曲高度都能控制在±20 mm 以内。若能使拉矫前镀锡基板翘曲方向均朝下,或上翘较小,则镀锡线拉矫过程的翘曲控制难度将大幅减小。

5 镀锡板翘曲控制策略及应用

结合上述研究,由于镀锡线拉矫机对下翘的控制能力更强,镀锡基板经过双机架平整机/二次冷轧、卷取后,在镀锡线入口的翘曲方向以下翘为佳;而考虑到卷取对翘曲的影响,在镀锡线进行翘曲控制时需将一次冷轧镀锡板和二次冷轧镀锡板区别对待,同时也应考虑到钢卷内圈和外圈翘曲高度的一致性。因此,以镀锡板最终成品的翘曲质量稳定为目的,综合考虑镀锡板在双机架平整/二次冷轧、卷取、拉矫等生产过程的翘曲控制特点,并提出如下的控制策略。

(1)双机架平整/二次冷轧翘曲控制策略:1)对于一次冷轧镀锡基板,由于卷取过程对翘曲的影响较大,平整时其翘曲控制目标为上翘+40 mm 以内,可以对卷取过程产生的下翘进行一定的补偿,避免下翘过大。因此,双机架平整时,工作辊按照上辊小、下辊大的方式进行配辊,同时设定较小的防皱辊和防横断辊高度。2)对于二次冷轧镀锡基板,由于卷取过程对其翘曲的影响较小,二次冷轧时其翘曲控制目标为下翘-40 mm 以内,有利于镀锡线拉矫机的翘曲控制。故在二次冷轧时,工作辊按照上辊大、下辊小的方式进行配辊,同时设定较大的防皱辊和防横断辊高度。

(2)镀锡线拉矫机翘曲控制策略:1)对于一次冷轧镀锡板,由于卷取的影响较大,拉矫前带钢基本均为下翘,可通过调整拉矫机弯曲辊、矫直辊插入深度等参数,使带头(镀锡板卷内圈)上翘控制在+20 mm 以内,带尾(镀锡板卷外圈)下翘控制在-20 mm 以内。2)对于二次冷轧镀锡板,由于卷取影响较小,镀锡拉矫时通过调整参数,使带头的上翘高度尽量控制在±10 mm 以内,带尾下翘高度控制在-20 mm 以内。这样,经过卷取后,整卷镀锡板在发送给用户时,可以保证整卷带钢均为下翘,且翘曲高度相对稳定。

上述镀锡板翘曲控制策略在某厂镀锡板生产线得到了应用,一次冷轧镀锡板和二次冷轧镀锡板的翘曲控制精度和稳定性得到大幅提高。图 10 所示为在镀锡线入口取样测量的镀锡基板翘曲高度,采用本文提出的镀锡板翘曲控制策略后,镀锡基板翘曲控制精度得到大幅提高,其中一次冷轧镀锡基板翘曲高度控制区间由[-89 mm,9 mm]减小至[-51 mm,15 mm],二次冷轧镀锡基板翘曲高度控制区间由[-43 mm,58 mm]减小至[-47 mm,

25 mm]。图 11 所示为在镀锡线出口卷取前取样测量的镀锡板翘曲高度,采用本文提出的镀锡板翘曲控制策略后,镀锡板翘曲控制精度也得到大幅提高,其中一次冷轧镀锡板翘曲高度控制区间由[-19 mm,35 mm]减小至[-10 mm,23 mm],二次冷轧镀锡板翘曲高度控制区间由[-20 mm,36 mm]减小至[-20 mm,5 mm]。

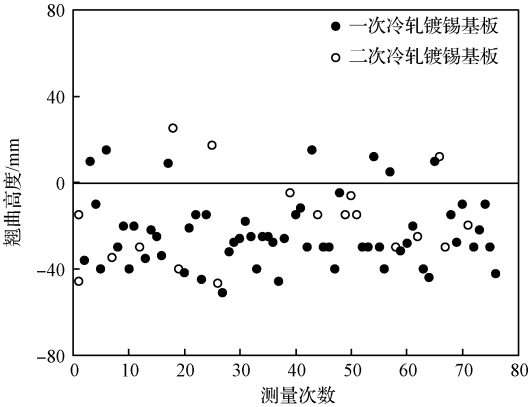


图 10 攻关后镀锡基板卷取后翘曲高度测量值
Fig. 10 Measurements of warping height of tinplate substrate after coiling

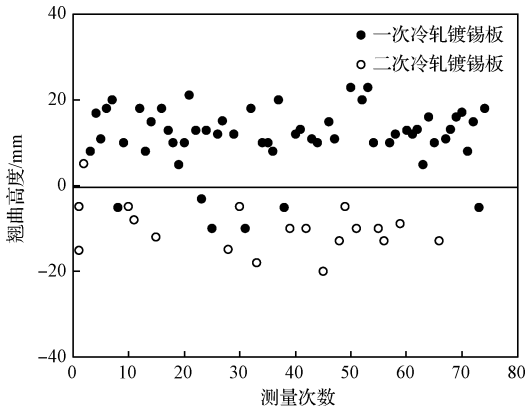


图 11 攻关后镀锡板卷取前翘曲高度测量值
Fig. 11 Measurements of warping height of tinplate before coiling

6 结论

(1)镀锡板生产流程中,带钢翘曲主要通过双机架平整/二次冷轧、拉矫等工序进行控制,而卷取过程对翘曲的影响也不能忽视。想要实现镀锡板产品翘曲高度的高精度、稳定控制,必须综合考虑上下游工序的影响,制定合理的控制策略。

(2)根据一次冷轧镀锡基板和二次冷轧镀锡基板压下率的不同,并考虑卷取过程的影响,可以通过

配置特定的工作辊辊径差,设定合理的防皱辊和防横断辊等参数,可以在平整/二次冷轧时对一次冷轧镀锡基板和二次冷轧镀锡基板翘曲高度分别进行有效控制。

(3)卷取过程对镀锡板产品的翘曲影响显著。对于厚度较大、强度偏低的一次冷轧镀锡板,卷取过程会使其下翘增大;而二次冷轧产品由于厚度小、强度高,卷取过程对其翘曲的影响较小。

(4)镀锡线的拉矫机对下翘的控制能力更强,镀锡线入口原料翘曲高度控制成下翘有利于发挥拉矫机对翘曲的控制能力。考虑到卷取过程对翘曲的影响,在钢卷带头、尾设定不同的拉矫机参数,是提高整卷带钢翘曲高度稳定性的有效措施。

(5)本文根据镀锡板产品的特点及生产线的翘曲控制特性,提出了镀锡板翘曲控制策略,并在某厂镀锡板生产线得到应用,镀锡板翘曲控制精度得到大幅提高。

参考文献:

- [1] 王晓东,黄久贵,李建中,等. 国内外镀锡板生产发展状况[J]. 上海金属,2008,30(4):45. (WANG Xiao-dong, HUANG Jiugui, LI Jian-zhong, et al. International and domestic development situation of tinplate steel[J]. Shanghai Metals, 2008, 30(4):45.)
- [2] 何建锋. 宝钢镀锡板翘曲原因分析与对策[J]. 宝钢技术, 2004(1):36. (HE Jian-feng. Cause analysis of tinplate warp and our countermeasures [J]. Baosteel Technology, 2004(1):36.)
- [3] 张清东,戴杰涛. 带钢板形翘曲变形行为的仿真[J]. 北京科技大学学报,2011,33(8):1006. (ZHANG Qing-dong, DAI Jie-tao. Simulation of warping deformation in thin steel strips[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011,33(8):1006.)
- [4] 李靖,万军,任新意,等. 高强集装箱板平整轧制研究与实践[J]. 轧钢,2018,35(6):74. (LI Jing, WAN Jun, REN Xin-yi, et al. Research and practice of skin pass rolling for high strength handling container plate[J]. Steel Rolling, 2018, 35(6):74.)
- [5] 张勃洋,卢兴福,张立元,等. 冷轧极薄带钢复杂板形翘曲变形行为研究[J]. 机械工程学报,2018,54(12):185. (ZHANG Bo-yang, LU Xing-fu, ZHANG Li-yuan, et al. Analysis of complex warping deformation for cold-rolled strip[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12):185.)
- [6] 张清东,卢兴福,戴杰涛,等. 冷轧带钢板形翘曲变形过程及规律的解析[J]. 北京科技大学学报,2014,36(3):378. (ZHANG Qing-dong, LU Xing-fu, DAI Jie-tao, et al. Analysis of warping deformation for cold-rolled strips[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(3):378.)
- [7] Toshiro Fujwara, Tetsu Matoba, Yasuhiro Itazuri, et al. Improvement of high-strength steel sheet mechanical properties by rolling with small-diameter rolls[J]. Journal of the JSTP, 1997, 38(440):819.
- [8] Wataru Baba, Masaru Miyake, Jun Yanagimoto. Warping behavior of thin strip with single-drive rolling[J]. Key Engineering Materials, 2017, 725:537.
- [9] Mucke G, Karhausen F, Putz P D. Methods of describing and assessing shape deviation in strips[J]. Metallurgical Plant and Technology International, 2002, 25(3):58.
- [10] 魏立群,柳谋渊,张杏耀,等. 平整轧平整轧制中轧件 L 弯成因分析及对策[J]. 轧钢,2003,20(2):20. (WEI Li-qun, LIU Mou-yuan, ZHANG Xing-yao, et al. Analysis of the causes of L camber of strip in skin passing and its countermeasures[J]. Steel Rolling, 2003, 20(2):20.)
- [11] 陈青,王彪,徐凌云,等. 镀锡钢板分条翘曲的残余应力分析[J]. 理化检验(物理分册),2016,52:92. (CHEN Qing, WANG Biao, XU Ling-yun, et al. Residual stress analysis on warping deformation tinplates after strip cutting[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2016, 52:92.)
- [12] 徐鹏飞,江宏斌,李文涛,等. 退火温度对翘曲镀锡薄板残余应力的影响[J]. 金属热处理,2018,43(11):160. (XU Peng-fei, WANG Hong-bin, LI Wen-tao, et al. Effect of annealing temperature on residual stresses in warped tin sheet[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(11):160.)
- [13] 胡建军,文杰,于孟,等. DR9 镀锡板板形控制技术研究与应用[J]. 中国冶金,2018,28(6):37. (HU Jian-jun, WEN Jie, YU Meng, et al. Research and application of flatness control on DR9 tinplate[J]. China Metallurgy, 2018, 28(6):37.)
- [14] 顾正秋. 不对称轧制时轧件弯曲的研究[J]. 鞍山钢铁学院学报,1985(1):74. (GU Zheng-qiu. Study on curvature of rolled stock in unsymmetrical rolling[J]. Journal of Anshan Institute of Iron and Steel Technology, 1985(1):74.)
- [15] 丁荣杰,柯可力,郑涛,等. 冷轧过程板形翘曲行为的控制[J]. 金属世界,2013(3):52. (DING Rong-jie, KE Ke-li, ZHANG Tao, et al. Control of strip warping in cold rolling[J]. Metal World, 2013(3):52.)
- [16] 方圆,莫志英,孙超凡,等. 二次冷轧压下率对镀锡板组织和性能的影响[J]. 钢铁,2019,54(2):48. (FANG Yuan, MO Zhi-ying, SUN Chao-fan, et al. Effect of secondary cold rolling reduction rate on microstructure and properties of tinplate[J]. Iron and Steel, 2019, 54(2):48.)
- [17] 杜国强,袁文振,张宝平,等. 连续退火机组带钢板形翘曲控制[J]. 中国冶金,2016,26(12):44. (DU Guo-qiang, YUAN Wen-zhen, ZHANG Bao-ping, et al. Buckling control for strip steel in continuous annealing line[J]. China Metallurgy, 2016, 26(12):44.)
- [18] 林海海,常安,于孟,等. 冷轧镀锌汽车板卷取工艺对翘曲的影响研究[J]. 轧钢,2016,33(3):25. (LIN Hai-hai, CHANG An, YU Meng, et al. Research on influence of coiling process on cold rolled galvanized automobile sheet's warping[J]. Steel Rolling, 2016, 33(3):25.)
- [19] 方开泰,马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京:科学出版社,2001. (FANG Kai-tai, MA Chang-xing. Orthogonal and Uniform Experimental Design [M]. Beijing: Science Press, 2001.)