

文章编号:1000-582x(2001)01-0063-04

# 铝箔轧制速度和张力影响的分析及模型建立

刘雪峰,汪凌云

(重庆大学材料科学与工程学院,重庆 400044)

**摘要:**速度效应和张力效应是铝箔生产过程中进行厚度控制的关键,但目前尚不能完全从理论上对其建立一种普遍适用的数学模型。在对某厂铝箔轧制过程进行研究的基础上,根据所获得的生产试验数据,拟合分析了某1850铝箔轧机的速度效应和张力效应,建立了铝箔出口厚度与速度变化及张力变化的数学模型,并应用所建立的模型,对1850铝箔轧机的轧制工艺进行了优化。

**关键词:**速度效应;张力效应;铝箔轧制

**中图分类号:** TG 335.5<sup>+</sup>8

**文献标识码:** A

厚度控制是铝箔生产中质量控制的一个技术关键。因为铝箔轧制属极限压延,故在实践中常使用无辊缝为主体的AGC控制方式<sup>[1]</sup>,且采用速度效应和张力效应来进行厚度控制<sup>[2-4]</sup>。由于对铝箔变形过程缺乏系统的认识,目前尚不能完全从理论上建立一种普遍适用的速度效应和张力效应数学模型,而只能根据轧机的具体条件,建立具有针对性的统计模型。

笔者在对某厂铝箔轧制过程进行研究的基础上,根据所获得的生产试验数据,拟合分析了某1850铝箔轧机的速度效应和张力效应,并建立了铝箔出口厚度与速度变化及张力变化的数学模型。这些模型能较好地描述铝箔轧制过程中的速度效应和张力效应。

## 1 铝箔轧制速度效应研究及模型建立

### 1.1 速度效应实验及结果分析

对某厂最具有代表性且产量最大的0.007 mm纯

铝箔的轧制过程进行了研究,其轧制工艺是由6道次组成,其中前3道次为粗轧,4及5道次为中轧,第6道次为双合精轧。一般前4道次在1<sup>#</sup>轧机(粗轧机)上进行,后2道次在2<sup>#</sup>轧机(精轧机)上进行。0.007 mm铝箔轧制工艺如表1所示。

在1<sup>#</sup>及2<sup>#</sup>轧机上分别进行测试,当1<sup>#</sup>轧机第4道次从厚度为0.055 mm轧至0.027 mm时,测量了91组数据;2<sup>#</sup>轧机从0.027 mm轧至0.014 mm及双合轧制时,分别测量了84组和62组数据,从中随机抽取几组数据列表如下,表中 $v$ 代表轧制速度, $B$ 代表轧件宽度。表2为 $\varphi 254/\varphi 670 \times 1700$ 四重不可逆铝箔粗轧机上第4道次轧制时的几组测量数据,表3为 $\varphi 254/\varphi 670 \times 1700$ 四重不可逆铝箔精轧机上第5道次轧制时的几组测量数据,表4为双合轧制时的几组测量数据。

表1 某厂0.007 mm铝箔轧制工艺

道次	$H/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$\Delta h/\text{mm}$	$\Sigma h/\%$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\sigma_1/\text{MPa}$
1	0.5	0.22	0.28	56	8~14	15~25
2	0.22	0.11	0.11	50	15~27	20~30
3	0.11	0.055	0.055	50	35~50	30~40
4	0.055	0.027	0.028	51	50~70	30~40
5	0.027	0.014	0.013	48	50~60	30~40
6	$0.014 \times 2$	$0.007 < 2$	0.007	50	40~55	30~40

注: $H$ —轧件进口厚度; $h$ —轧件出口厚度; $\Delta h$ —压下量; $\Sigma h$ —压下率; $\sigma_b$ —后张应力; $\sigma_1$ —前张应力。

• 收稿日期:2000-04-15

作者简介:刘雪峰(1970-),男,重庆人,重庆大学博士生。从事材料制备过程的数值模拟与优化研究。

表2 第4道次轧制时的几组测量数据

$v/m \cdot min^{-1}$	0	105	154	194	242	282	346	402	450	506	562	627	682	739	787	814	867
$h/\mu m$	55	44.3	42.3	41.0	39.5	38.0	36.34	35.8	34.1	33.0	32.5	31.3	30.7	29.2	28.7	28.3	27.28

注:  $B = 1\ 000\ mm, \sigma_f = 35.7\ MPa, \sigma_b = 57\ MPa$

表3 第5道次轧制时的几组测量数据

$v/m \cdot min^{-1}$	0	77	123	84	167	232	271	322	418	468	520	560	597	648	700	751	810	820
$h/\mu m$	28.1	23	21.4	22	19.6	18.6	18.3	17.3	17.0	16.5	15.7	15.6	15.3	15.2	14.9	14.7	14.22	14.10

注:  $B = 1\ 000\ mm, \sigma_f = 35\ MPa, \sigma_b = 53\ MPa$

表4 双合轧制时的几组测量数据

$v/m \cdot min^{-1}$	0	72	85	142	193	155	200	251	342	420	500	533	600	635
$h/\mu m$	28.2	21.2	18.8	18.7	17.45	17.4	17	16.4	14.94	14.6	14.1	13.9	13.5	13.42

注:  $B = 1\ 000\ mm, \sigma_f = 32.3\ MPa, \sigma_b = 51.3\ MPa$

从以上这些表中可以看出,在铝箔轧机上进行的测试研究表明:在轧制过程中,当前、后张应力保持不变时,箔材厚度随轧制速度升高而减小。生产实践证明,可以采用该铝箔速度效应来进行厚度控制。

1.2 速度效应模型建立

速度效应可用下列函数形式描述:

$h = f(v)$  (1)

目前无法从理论上得知  $f$  的具体形式,只能根据现场实验数据进行统计分析。对表2中从55  $\mu m$  轧至27  $\mu m$  的实测全部91组数据进行回归,结果如下:

$h = 47.708\ 28 - 2.707\ 113 \times 10^{-2} v$  (2)

同时,对回归结论进行相应的分析,得到相关系数  $R = 0.873$ ,残差平方和  $Q = 1\ 270.4$ ,回归平方和  $u = 4\ 055.8$ ,剩余标准差  $S = 1.7$ 。对整个回归进行显著性检验,得  $F = 284.2$ 。

对包含表3、表4在内的全部146组数据进行回归分析,结论如下:

表5 0.007 mm 铝箔轧制时不同的速度效应敏感区及其  $k$  值

$H/\mu m$	$h/\mu m$	$v_s/m \cdot min^{-1}$							
		100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 400	400 ~ 500	500 ~ 600	600 ~ 700	700 ~ 800	
400	285	6 ~ 8	6 ~ 8	6 ~ 8	-	-	-	-	
200	118	7 ~ 9	7 ~ 9	4 ~ 6	4 ~ 6	~ 5	-	-	
100	50	5 ~ 8	5 ~ 8	5 ~ 8	5 ~ 8	~ 4	~ 4	~ 4	
58	27	~ 4	~ 3	~ 2	~ 2	~ 2	~ 2	~ 2	
27	14	~ 3	~ 2	~ 1	~ 0.5	-	-	-	
14 x 2	7 x 2	~ 3	~ 2	~ 1	~ 1	-	-	-	

从表5中所列出的不同出口厚度及不同速度区域对应的  $k$  值可以看出,随着铝箔出口厚度的降低,  $k$  值的趋势是逐渐减小的。  $k$  值越大,表明箔材出口厚度受轧制速度影响较大,因此  $k$  值反映了铝箔轧制过程中

$h = 23\ 231\ 46 - 1.245\ 359 \times 10^{-2} v$  (3)

同样,得出  $u = 894.64$ ,  $S = 2.71$ ,  $Q = 622.4$ ,  $R = 0.775$ ,  $F = 117.9$ 。

从(2)式及(3)式可以看出,把  $h$  和  $v$  作线性关系回归,结果不太理想,(2)式的相关系数才0.873,(3)式更低,为0.775,说明  $h$  和  $v$  的线性关系不强,有待从更高次方回归。

对此,从另一角度进行分析:

设  $k = \frac{dh}{dv} \approx \frac{\Delta h}{\Delta v}$  (4)

则  $k$  值的大小便反映了速度效应的大小。一般将  $k$  值较大的速度区域称为速度敏感区域,用  $v_s$  表示。在这个区域内改变速度  $\Delta v$ ,可得到较大的箔材出口厚度改变值  $\Delta h$ 。利用上述  $k$  的近似计算式,得出了0.007 mm 铝箔轧制时不同的速度效应敏感区及其  $k$  值大小,如表5所示。

轧制速度的变化对箔材出口厚度变化的影响。在轧制的最初道次,由于出口厚度目标值较大,因此  $\Delta h/h$  较小,并且在最初道次中,实际出口厚度与目标出口厚度即使有较大差别也不会影响成品厚度;在成品道次,则

必须严格控制  $\Delta h$  的大小,然而此时,  $k$  值的大小却不能反映相对厚差  $\Delta h/h$ ,但这时的  $\Delta h/h$  恰恰是最重要的,因为这将直接影响到成品的厚度尺寸质量。为此,引入一新的量:

$$M = \frac{k}{h} = \frac{dh}{dv} = \frac{dh}{dv} \approx \frac{\Delta h}{\Delta v} \quad (5)$$

表6 0.007 mm 铝箔轧制时不同速度效应敏感区的  $M$  值

$H/\mu\text{m}$	$h/\mu\text{m}$	$v_s/\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$						
		100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 400	400 ~ 500	500 ~ 600	600 ~ 700	700 ~ 800
400	285	0.02 ~ 0.03	0.02 ~ 0.03	0.02 ~ 0.03	-	-	-	-
200	118	0.06 ~ 0.08	0.06 ~ 0.08	0.03 ~ 0.05	0.03 ~ 0.05	~ 0.04	-	-
100	50	0.10 ~ 0.16	0.10 ~ 0.16	0.1 ~ 0.168	0.10 ~ 0.16	~ 0.08	~ 0.08	~ 0.08
58	27	~ 0.15	~ 0.11	~ 0.07	~ 0.07	~ 0.07	~ 0.07	~ 0.07
27	14	~ 0.21	~ 0.07	~ 0.04	-	-	-	-
14.2	7.2	~ 0.43	~ 0.14	~ 0.14	-	-	-	-

从表6中可以看出,随着出口厚度的减小,  $M$  值是逐渐增加的,其中第1道次的  $M$  值和最后道次的  $M$  值相差达10倍左右。因此,对厚差的控制,最后几道次比最初道次难度要大得多。要想获得目标出口厚度,则最后道次对轧制过程的控制要求要高得多。

## 2 铝箔轧制张力效应研究及模型建立

### 2.1 张力效应实验及结果分析

在某厂1#铝箔轧机( $\varphi 254/\varphi 670 \times 1700$ )上进行了铝箔轧制张力效应的实验。

实验过程:在稳定轧制时使轧制速度保持750 m/min;在某一入口厚度下,确定某一轧制后张应力,同时记录相应的铝箔出口厚度;改变轧制后张应力,待轧制稳定后再记录铝箔出口厚度;重复上述步骤,直到数据满足要求;改变入口厚度,重复上述实验并记录相应数据。轧制材料为1005纯铝,轧件宽度为  $B = 1000$  mm。实验结果如表7所示。

表7 铝箔轧制张力效应实验的部分测量数据

$\sigma_b/\text{MPa}$	50	60	70	80	90	100
$h/\mu\text{m}$	38	34	31	28	27	25.6

根据表7中所示的铝箔轧制时后张应力与轧件出口厚度的关系,可以看出,在其它工艺条件不变的情况下,轧件出口厚度随后张应力的增大而减小。轧制实践证明,可以采用该铝箔张力效应来进行厚度控制。

### 2.2 张力效应模型建立

铝箔轧制中的一个难点在于,即使在相同规格的

这时,  $M$  的值就反映了铝箔出口厚度变化的相对值与轧制速度改变值  $\Delta v$  的关系。 $M$  值越小,则表明轧制速度对相对厚差影响较小,越容易控制铝箔轧出厚度与出口目标厚度一致; $M$  值越大,则表明轧制速度对相对厚差影响较大,出口厚度越不易控制。计算得出了0.007 mm铝箔轧制时不同速度效应敏感区域的  $M$  值,如表6所示。

轧机上,工艺条件也不完全相同;即使工艺条件相同,效果也不一样。因此,张力效应模型也只能建立在统计模型之上,而且仅适用于被测量的轧机。根据统计数据,对前张应力、后张应力与轧制速度之间的关系,建立了如下模型:  $k_{\sigma_b} = v/\sigma_b, k_{\sigma_t} = v/\sigma_t$  (6) 式中:  $k_{\sigma_b}, k_{\sigma_t}$  为比例系数。

从对实验数据及所建立模型进行的分析可以看出,随着铝箔出口厚度的减小,张应力对箔材出口速度的影响呈增加的趋势。试验研究结果表明,前张应力对箔材出口速度影响的程度比后张应力的高出1~1.5倍,而且,在轧制14  $\mu\text{m}$  厚的箔材时,前张应力影响的程度比轧制50  $\mu\text{m}$  厚的箔材时要高出2~2.5倍。

## 3 结语

通过对0.007 mm纯铝箔轧制过程中速度效应的研究知道,应把轧制工艺的稳态轧制速度建立在  $k$  值较小的区域,以避免速度敏感区,减小轧制速度的波动对出口厚度的影响,而将穿带后的升速区放在速度敏感区。故应用所建立的模型,我们得出了1850铝箔轧机各道次优化轧制速度为:第1道次:300~400 m/min;第2道次:300~500 m/min;第3道次:500~800 m/min;第4道次:600~800 m/min;第5道次:300~600 m/min;第6道次:300~500 m/min。

又由分析研究得出,张应力大小一般为被轧铝材屈服点的25%~55%。为了防止铝箔轧制过程中断片以及张应力过大掩盖箔材板形的缺陷,同时也使得有足够的张应力以确保铝箔的平直度,在张应力确定

中应该取下限为好。故在生产实践中,结合所建立的模型,我们得出轧制铝箔时取张应力为其屈服点的 25%~35% 为最佳。

总之,速度和张力在铝箔轧制过程中是不可分割的,在生产实践中,只有充分掌握设备性能和工艺因素,协调配合速度效应和张应力效应,采用速度—张力综合调节系统,才能很好地进行铝箔厚度控制,轧制出厚度精度好的铝箔产品。

#### 参考文献:

- [1] 长倉弘 ウアルムのニシ冷延・箔延技術[J]. 塑性の加工, 1995, 36(417): 1 101-1 106
- [2] 余同希, 王大钧. 塑性力学和地球动力学文集[C]. 北京: 北京大学出版社, 1990. 155-160.
- [3] 上妻正大. 箔材轧制及其相关的理论和计算[J]. 轻金属, 1983, 4: 60-64.
- [4] 多田裕志. 铝箔用途的开发及 21 世纪的展望[J]. アルトピア, 1990, 11: 101-105.

## Analysis of the Effects of Speed and Tension in Aluminum Foil Rolling and Their Modeling

LIU Xue-feng, WANG Ling-yun

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Though speed-effect and tension-effect are keys to controlling thickness in producing aluminum foil, sort of their mathematical models, which will be widely used, can't be obtained theoretically at present. Based on the study of aluminum foil rolling in some factory, speed-effect and tension-effect of some 1850 aluminum foil mill are analyzed, and mathematical models which are about the relation between the exit thickness of aluminum foil and the speed change and the tension change, are developed according to the attained trial data. Those models are used to optimize the process of this mill.

**Key words:** speed-effect; tension-effect; aluminum foil rolling

(责任编辑 李胜春)

### ·下期论文摘要预告·

## CIMS 在建筑企业质量管理中的应用

王建兵, 陈进

(重庆大学(B区)机电学院, 重庆 400045)

**摘要:** 计算机集成制造系统(CIMS)及相关技术的应用领域十分广泛,制造业已很普遍,但在建筑业尚未引起足够的重视。笔者以建筑工程产品质量的管理和控制作为突破口,论述了 CIMS 的技术对提高建筑企业综合竞争能力和施工质量所起的重要作用。在深入分析 CIMS 在建筑企业应用的可行性和必要性的基础上,结合建筑业的实际情况,提出把 CIMS 在制造业的成熟理论推广到建筑业。在充分利用现有条件的基础上,结合 CIMS 信息集成和功能集成的思想,建立适合我国实际情况的建筑工程计算机辅助质量系统。论文为建筑企业实施 CIMS 提供了总体方案和技术路线,必将促进 CIMS 技术思想早日在建筑企业广泛应用,产生良好的社会效益和经济效益。

**关键词:** 建筑工程; 数据库; 计算机辅助; 质量控制; 信息采集