

铝箔轧机中生成热分配的实验及分析

尹凤福^{1,2)} 李谋渭¹⁾ 张少军¹⁾ 李东明¹⁾

1) 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083 2) 山东理工大学轻工学院, 淄博 255012

摘要 系统分析了铝箔轧机轧制过程中热量转移及热量平衡的过程, 提出了一种热量转移的观点. 实际测量了三种不同喷嘴开放状态下分段冷却的轧件表面温度, 采用理论分析与实验相结合的方法, 求出了对应工况下轧件和工作辊所吸收热量的热功率, 得到了生成热在轧件与轧辊间的分配系数, 轧件分配系数大致为 0.11~0.33, 轧辊分配系数为 0.67~0.89. 随冷却能力的增强, 轧辊分配系数增大, 轧件分配系数减少.

关键词 分段冷却; 热量转移; 轧辊; 温度

分类号 TG 335; TK 124

板形和板厚是衡量带材产品质量的两个主要指标, 板厚自动控制技术已基本成熟, 而对于板形自动控制技术, 由于外界影响因素复杂且检测和控制技术不尽完善, 成了当前的一个技术难题. 板形自动控制的主要手段包括倾辊、弯辊、轧辊横移和局部分段冷却控制, 其中最复杂的是局部分段冷却控制, 这是因为局部冷却控制系统具有非线性、滞后性、强耦合等特点, 很难建立精确的热量生成及分配的数学模型, 也就无法获得精确的分段冷却控制模型. 因此, 有必要对板带轧机中热量的生成及分配进行实验研究, 以便为建立一个可以应用于实际控制过程的分段冷却控制模型奠定基础^[1-3]. 鉴于此, 笔者对铝带箔轧机中的分段冷却作了实际的测试分析.

1 轧制过程热量转移的系统分析

当轧机由非轧制状态变为轧制状态时, 电机驱动工作辊旋转并开始轧制带材, 轧制过程中生成的热量源于电机的功率, 大致消耗在三个方面: ①使轧制的带材产生弹塑性变形而产生的变形热; ②轧制过程中的轧件与工作辊之间的摩擦热; ③支撑工作辊轴承处的摩擦生热. 这三部分构成了总的生成热(由于本文讨论的是冷轧机, 故可不考虑轧件入口时带入的热量). 在大多数

工作辊温度场的计算中, 轴承处的边界条件是作绝热处理的^[4,5], 这里, 也忽略轴承处的摩擦热. 因此, 下文提到的生成热主要指前两项, 即变形热和轧件与工作辊之间的摩擦热.

假设在轧制过程中, 没有冷却液喷射到工作辊表面, 那么随着轧制过程的进行, 工作辊和轧件的温度都将不断升高, 这是一个动态升温的过程, 但最终会达到一个平衡状态. 在此平衡状态下, 流入的热量包括轧制过程中产生的变形热和轧件与工作辊之间的摩擦热, 而流出的热量有: ①由于升温后的轧件不停地流出而带走的热量(轧件吸收的热量); ②生成热传导给工作辊、支撑辊、机架等而流出的热量(传导出的热量); ③工作辊和轧件与周围的空气发生对流而带走的热量(空气对流换热); ④工作辊和轧件热辐射而带走的热量(辐射换热). 根据流入的热量与流出的热量相等原则, 轧制过程中总的生成热(N_T)就是由以上四部分组成的. 这个假设的平衡状态只是为了分析问题的需要, 并不是所希望的, 因为温度过高, 在工作辊和轧件之间会发生严重的粘着磨损(胶合), 这是一个非正常的工作状态.

假设在上面的动态升温过程中, 冷却液不断地喷射到工作辊表面, 这时, 变形热和摩擦热仍在不断地流入, 而流出的热量除了上面四部分外, 还要再加上冷却液与工作辊和轧件对流换热

而带走的热量(冷却液对流换热),随着轧制过程的进行,工作辊和轧件的温度也不断上升,冷却液带走的热量也越来越多,最终也达到一个平衡状态.此平衡状态下的温度比没有喷射冷却液状态下的温度要低,主要原因在于轧制过程中产生热量的大部分被冷却液带走了.同样,根据流入的热量与流出的热量相等原则,总的生成热(N_T)除了上面的①、②、③和④外,还包括:⑤冷却液带走的热量.

在这个热量转移并最后达到平衡的过程中,可以认为轧制过程中的生成热首先通过热传导方式传给工作辊和轧件,然后工作辊和轧件再与冷却液对流换热,生成热和冷却液之间是通过中间体(工作辊和轧件)间接传递热量的.在流出的热量中,通常可以忽略空气对流换热和热辐射带走的热量,因为这两部分热量占的比例较小.如前所述,以热传导方式传给工作辊和轧件的热量又是以对流换热的形式传给了冷却液,所以,总的生成热(N_T)就可以近似认为是由轧件吸收的热量和冷却液带走的热量这两部分组成的.由此,只要测量出轧件的进出口速度和温度、冷却液的流入和流出温度,再加上其他条件,就可以计算出这两部分热量.

2 测试方案及测试结果

实验是在某轻合金厂的1350铝箔轧机上进行的,该轧机喷嘴布置及开放状态如图1及表1所示.图中A排喷嘴用作支撑辊的冷却和润滑,对板形有一定的影响,但非常小,故忽略其影响,在实验中始终处于开放状态;B排喷嘴起冷却润

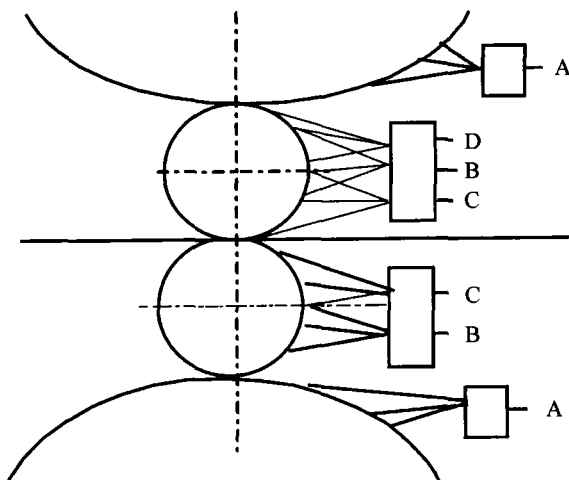


图1 轧辊和喷嘴的位置图

Fig.1 Position of the nuzzles and rolls

表1 喷嘴开放状态表

Table 1 Status of the nuzzles

喷嘴	A			B			C			D		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1												
2	*	*	*		*	*	*	*	*			*
3	*	*	*		*	*	*	*	*			*
4	*	*	*		*	*	*	*	*			*
5	*	*	*		*	*	*	*	*			*
6	*	*	*		*	*	*	*	*			*
7	*	*	*		*	*	*	*	*			*
8	*	*	*		*	*	*	*	*			*
9	*	*	*		*	*	*	*	*			*
10	*	*	*		*	*	*	*	*			*
11	*	*	*		*	*	*	*	*			
12	*	*	*		*	*	*	*	*			
13	*	*	*		*	*	*	*	*			
14	*	*	*		*	*	*	*	*			
15	*	*	*		*	*	*	*	*			*
16	*	*	*		*	*	*	*	*			*
17	*	*	*		*	*	*	*	*			*
18	*	*	*		*	*	*	*	*			*
19	*	*	*		*	*	*	*	*			*
20	*	*	*		*	*	*	*	*			*
21	*	*	*		*	*	*	*	*			*
22	*	*	*		*	*	*	*	*			*
23												

注: *表示对应位置的喷嘴处于开放状态

控板形作用;C排喷嘴起轧制润滑和冷却双重作用,为基本冷却喷嘴,实验中也始终处于开放状态;D排喷嘴起强化冷却调控板形作用^[6,7].实验中,冷却液喷嘴的开放分I,II,III三种状态,每种状态轧2卷铝,实验中用的轧材为3A21(对应的老牌号为LF21)^[8].测试记录和轧件表面温度值为稳定的轧制状态下的测量值,轧件上温度测点分布及与喷嘴位置对应关系如图2所示.出口轧件表面温度测量采用远红外遥感测温仪,测试是在轧机运行状态下进行的,测试结果见表2.

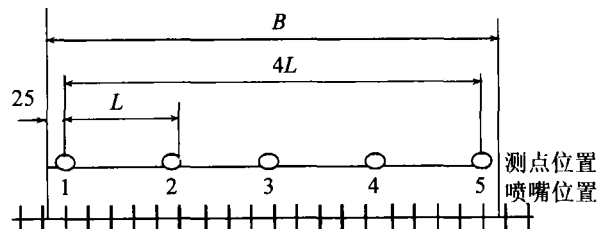


图2 轧件横断面温度测点分布及与喷嘴位置对应关系

Fig.2 Position where the temperature was measured and the corresponding position of nuzzles

表2 轧件表面温度测试结果

Table 2 Results of measured temperature on the surface of milled strip

喷嘴开放状态	卷号	$V_0/(m \cdot s^{-1})$	$V_1/(m \cdot s^{-1})$	P_r/MN	轧件表面(出口)各测点温度 $T_i/^\circ C$				
					1	2	3	4	5
I	1	5.743	6.120	1290	85	86	87	86	86
	2	5.040	5.348	1300	82	83	83	83	83
II	1	5.858	6.252	1280	69	70	70	69	69
	2	5.038	5.340	1280	65	66	67	66	65
III	1	5.988	6.400	1300	62	61	71	71	63
	2	5.053	5.354	1290	61	62	69	62	61

注: V_0 表示轧件的入口速度, V_1 表示轧件的出口速度, P_r 表示轧制力, 其他对应的实验条件是轧制材料3A21, 宽度 $B=1010\text{ mm}$, 材料的入口厚度 $H_0=0.085\text{ mm}$, 出口厚度 $H_1=0.045\text{ mm}$, 冷却液初始温度 38°C , 流回后的温度 42°C .

3 分析与讨论

3.1 传给轧件的热功率

为了分析轧件表面温度与轧件吸收热量的关系, 根据实际情况, 需对模型进行两点简化: ①对于 I, II 喷射状态, 认为轧件在横向上温度分布是均分的, 以平均值代替, 由测试数据可以看出, 这样的假设是合理的; 对于 III 喷射状态, 认为在不同喷射区温度沿横向分布是均匀的, 这将在喷射状态交接处引起一定的误差. ②认为轧件在厚度方向上没有温度梯度, 即将轧件视为“薄壁体”(根据实际情况的计算结果也表明, 轧件符合薄壁体的条件, 可完全把轧件看作是薄壁体^[9,10]). 根据假设条件, 可知轧件出口温度(即轧件出口表面温度)与轧件所吸收热量的功率之间的关系是:

$$N_s = B_i \cdot H_i \cdot V_1 \cdot \rho \cdot c \cdot (T_1 - T_0) \quad (1)$$

式中, N_s 为轧件吸收热量的功率, W; B_i 为仅对喷嘴开放 III 状态, 分为中央喷嘴区和两边喷嘴区, I, II 状态时为 B ; T_1 为出口轧件表面温度, $^\circ\text{C}$, 取测试值的平均值; T_0 为入口轧件表面温度, $^\circ\text{C}$, 取测量时的室温; ρ 为铝箔密度, $\rho=2700\text{ kg/m}^3$; c 为铝比热容, $c=893\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$.

对于喷嘴开放状态 III, 可分为两个区进行计算, 即中央喷嘴区(宽度 $B_1=0.253\text{ m}$), 两边喷嘴区(宽度总合为 $B_2=0.757\text{ m}$). 计算过程中, 轧件表面温度, 取相应点的平均值. 针对表 2 测试结果的计算结果见表 3.

3.2 传给工作辊的热功率

轧制过程中的生成热在首先传导给轧件和工作辊后, 绝大部分又以间接的对流方式传给冷却液. 如前所述, 在认为生成热和冷却液之间无直接热量传递以及忽略空气对流换热和热辐射

的情况下, 由能量守恒原理可知, 冷却液对流换热所带走的热量就是传给工作辊的热功率(用 N_c 表示, 当然 N_c 中也有一部分是冷却液从轧件中吸收的, 也就是生成热传导给轧件, 轧件再与冷却液对流换热, 但鉴于本文所涉及的是冷轧以及所讨论问题的复杂性, 把冷却液与轧件之间对流换热的这一部分热量区分出去几乎是不可能的). 这样简化之后, 传给工作辊的热功率这部分热量可用下式计算^[8,11], 计算结果见表 3.

$$N_c = n \cdot \rho_c \cdot q \cdot \Delta T \cdot c_c \quad (2)$$

式中, N_c 为冷却液传递部分热量的功率, W; n 为开放喷嘴的个数; ρ_c 为冷却液密度, $\rho_c=800\text{ kg/m}^3$; q 为单个喷嘴中冷却液的流量; ΔT 为流入冷却液和流出冷却液的温度差, $^\circ\text{C}$; c_c 为冷却液比热容, $c_c=2200\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$.

表3 实测工况下的的分配系数

Table 3 Partition coefficients of working status

喷嘴状态	卷号	N_c/W		N_c/W	η_c	η_s
		中央	边部			
III	1	5 095	10 775	99 968	0.137	0.863
	2	3 968	8 575			
I	1	29 508		59 136	0.332	0.668
	2	23 911				
II	1	18 772		88 704	0.174	0.826
	2	13 927				

3.3 生成热在轧件及工作辊间的分配系数

生成热在轧件和工作辊间的分配受很多因素影响, 如轧件的热物理特性和接触表面状态、工作辊的热物理特性和接触表面状态、轧件和工作辊的表面温度、轧制力参数、轧制冷却条件等, 都对之产生一定影响. 综合以上分析计算的结果, 可作如下的分析.

生成热轧件分配系数为:

$$\eta_s = \frac{N_s}{N_s + N_c} \quad (3)$$

生成热工作辊分配系数为:

$$\eta_c = \frac{N_c}{N_s + N_c}; \text{ 即 } \eta_c = 1 - \eta_s \quad (4)$$

各种实验工况下的计算值见表3。从表中可以看出,随着喷嘴开放数目的增加,也就是随着冷却能力的增强,冷却液传递热量的功率也在增大,工作辊分配系数 η_c 也增大,从0.668增大到了0.889,轧件所占的生成热分配比例在减少,从0.332减小到了0.111,这是符合实际情况的。

4 结论

(1)从理论上,系统详细地分析了轧制过程中热量转移及热量平衡的过程,提出了一种热量转移观点。

(2)实际测量了分段冷却中三种不同喷嘴开放状态下的轧件表面温度,求出了三种工况下轧件和工作辊所吸收热量的热功率,它可以换算成热传导计算中的重要边界条件。

(3)采用理论分析与实验相结合的方法,得到了生成热在轧件与轧辊间的分配系数,轧件分配系数大致为0.11~0.33,轧辊分配系数为0.67~0.89。随冷却能力的增强,轧辊分配系数增大,轧件分配系数减少。

参 考 文 献

- 1 乔俊飞,郭戈,柴天佑. 轧辊局部冷却控制系统的建模[J]. 钢铁研究学报, 1998, 10(6): 25
- 2 Ginzburg V B. Selection of optimum strip profile and flatness technology for rolling mills [J]. Iron Steel Eng, 1997 (7): 30
- 3 Myers R. Gauge, shape and profile control using a shape meter [J]. Steel Times Int, 1996(3): 30
- 4 金兹伯格著. 高精度板带轧制理论与实践[M]. 姜明东,王国栋译. 北京:冶金工业出版社,2000
- 5 Nappez C. Control of strip flatness in cold rolling :A global approach [J]. Iron Steel Eng, 1997(4): 42
- 6 王邦文,张正秀,李谋渭,等. 1350 铝箔轧机轧制压力的数学模型[J]. 北京科技大学学报, 1997, 19(3): 302
- 7 刘圣明,李谋渭,童朝南,等. 铝箔高速高精轧制控制技术[J]. 北京科技大学学报, 1997, 19(增刊): 52
- 8 王祝堂,田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙:中南大学出版社,2000
- 9 周筠清. 传热学[M]. 北京:冶金工业出版社,1999
- 10 俞昌铭. 热传导及数值分析[M]. 北京:清华大学出版社,1981
- 11 Goodwin G C, Carney B M. Analysis of thermal camber control in rolling mills [A]. Unkind Vetaled 11th World Congress "Automatic Control in the Service of Mankind" [C]. Tallinn, Estonia, 1990

Distribution of Heat Production in Aluminum Foil Mills

YIN Fengfu^{1,2)}, LI Mouwei¹⁾, ZHANG Shaojun¹⁾, LI Dongming¹⁾

1) Mechanical Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) College of Light Industry, Shandong University of Technology, Zibo 255012, China

ABSTRACT The transfer and balance of heat during the cold milling of aluminum foil were analyzed. A viewpoint about them was proposed. The surface temperature of aluminum foil was measured in three ways with different open nozzles. With the combination of theory analysis and experiment, the power of heat absorption of the aluminum foil and the working roll was acquired respectively, and the partition coefficient between the aluminum foil and the working roll was also calculated for the first time. The results show that the partition coefficient of the aluminum foil varies from 0.11 to 0.33, while that of the working roll from 0.67 to 0.89. The partition coefficient of the working roll increases with the cooling ability intensifies.

KEY WORDS cooling in stages; heat transfer; roll; temperature