

铝冷轧过程中线速度测量精度对产品质量的影响研究

焦志强 祖程博 吕 华

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘 要: 本文旨在系统性地探讨线速度测量精度对铝冷轧产品质量的多维度影响机制。首先,文章阐述了铝冷轧的基本原理及其对高精度控制的核心诉求;其次,深入剖析了当前主流的线速度测量技术,特别是非接触式测速仪的工作机理、性能指标及潜在误差来源;在此基础上,重点论述了线速度测量精度如何通过“秒流量恒定”原则影响厚度控制、通过张力闭环系统影响板形与表面质量、通过前滑率计算影响轧制力模型校准,以及在生产管理与质量追溯中的基础性作用。最后,本文从设备选型、安装规范、环境适应性及维护策略等层面,提出了提升线速度测量精度的综合性对策。研究表明,将线速度测量精度视为整个冷轧自动化控制系统的基石,并对其进行精细化管理,是实现铝材产品高端化、稳定化生产的关键路径。

关键词: 铝冷轧;线速度;测量精度;产品质量;秒流量恒定;厚度控制

引言

铝及铝合金因轻质、高强等优异性能,在航空航天、交通等领域不可或缺。随着下游需求升级,铝加工向高精度、智能化发展。冷轧作为核心工序,通过室温轧制实现厚度、板形等精确控制,其过程高度耦合复杂。在众多参数中,线速度不仅关乎生产效率,更是厚度自动控制(AGC)、恒张力调节和连轧稳定的基础数据。然而,实际工况中,高速动态响应、表面油污、振动及电磁干扰等因素常导致线速度测量存在不确定性误差。一旦误差超限,将波及整个控制系统,最终在成品板形、厚度和表面质量上留下不可消除的缺陷。因此,深入研究线速度测量精度对铝冷轧产品质量的影响,具有重要的理论价值和迫切的现实指导意义。

1 铝冷轧工艺概述与线速度的核心地位

铝冷轧通常在可逆式单机架或多机架连轧机组上进行。其核心目标是通过精确控制压下量、张力、速度和润滑等参数,将热轧或铸轧后的铝带坯加工成符合用户要求的成品带材。冷轧过程区别于热轧的最大特点在于,金属在再结晶温度以下变形,这使得加工硬化现象显著,同时能获得更高的尺寸精度和更好的表面光洁度。在整个冷轧工艺链中,线速度扮演着多重角色:①生产节奏的标尺:直接决定单位时间内的产量。②工艺控制的纽带:连接着各个独立的控制子系统,使之成为一个有机整体。③质量追溯的依据:为产品的长度计量、缺陷定位和批次管理提供数据基础。尤其在现代化的多机架冷连轧生产线中,“秒流量恒定”原则是维持轧制过程稳定的生命线。该原则指出,在稳态轧制条件下,流经任意相邻两个机架间的金属体积流量必须相

等,即 $h_n \cdot v_n = h_{n+1} \cdot v_{n+1}$,其中 h 为带材厚度, v 为带材线速度。这一等式的成立,是防止带材在机架间被过度拉伸(导致断带)或堆积起皱(导致废品)的根本保证。由此可见,线速度 v 与厚度 h 处于同等重要的地位,二者缺一不可。任何一方的测量失准,都将直接破坏这一平衡,引发连锁性的质量事故^[1]。因此,线速度的测量精度,从工艺本质上看,是与厚度测量精度同等重要的核心要素。

2 线速度测量技术及其误差来源分析

为了满足冷轧生产的严苛要求,传统的接触式测速方法(如编码辊)因其易打滑、磨损带材表面、响应滞后等固有缺陷,已逐渐被非接触式测速技术所取代。目前,工业界广泛应用的非接触式测速仪主要包括基于激光多普勒效应(Laser Doppler Velocimetry, LDV)和空间滤波原理(Spatial Filtering)的两类。

2.1 主流非接触式测速技术

①激光多普勒测速仪(LDV):其工作原理基于物理学中的多普勒效应。仪器向运动的带材表面发射两束相交的激光,形成明暗相间的干涉条纹。当带材表面微粒穿过这些条纹时,会散射出频率发生变化的光信号。通过检测散射光与参考光之间的频率差(即多普勒频移),即可精确计算出带材的线速度。LDV技术具有极高的动态响应速度(可达数十千赫兹)、卓越的测量精度(通常优于 $\pm 0.05\%$)以及真正的非接触特性,特别适用于高速、超薄、表面敏感的铝箔生产。②空间滤波测速仪:该技术利用高亮度LED光源照射带材表面,通过光学系统将带材表面的自然纹理或人工标记成像到一个特殊的光栅(空间滤波器)上。当带材移动时,成像

的纹理也随之移动,在光栅后方的光电探测器上会产生一个与速度成正比的交流电信号。通过分析该信号的频率,即可解算出线速度。空间滤波技术对带材表面状态的依赖性相对较低,抗干扰能力强,同样具备高精度和高响应速度的优点。

2.2 测量误差的主要来源

尽管非接触式测速技术先进,但其测量结果依然不可避免地存在误差。这些误差主要来源于以下几个方面:①仪器系统误差:由测速仪自身的设计、制造和元器件老化等因素引起。例如,激光器波长漂移、光学元件装配偏差、信号处理电路的非线性等,都会导致固定的或有规律的偏差。②安装与对准误差:测速仪的安装角度、距离以及光斑在带材上的位置若未严格按照规范执行,会引入几何学上的余弦误差。此外,带材的横向跑偏也会使测量点偏离最佳位置,影响精度。③被测物特性影响:带材表面的粗糙度、反光率、油膜厚度、振动幅度以及是否存在水汽、粉尘等污染物,都会改变光的散射或反射特性,从而干扰信号的提取,产生随机或系统性的测量波动^[2]。④环境干扰:生产线周围的强电磁场可能干扰测速仪的电子信号;剧烈的机械振动会影响光学系统的稳定性;环境温度的大幅变化可能导致仪器内部结构发生微小形变,进而影响测量基准。这些误差源共同作用,决定了线速度测量的总不确定度。理解并量化这些误差,是后续分析其对产品质量影响的前提。

3 线速度测量精度对产品质量的多维度影响机制

3.1 对厚度精度的直接影响:破坏“秒流量恒定”

厚度是铝带材最核心的质量指标之一。现代冷轧机普遍采用基于“秒流量恒定”原则的前馈-反馈复合AGC系统。在此系统中,出口厚度 h_{out} 的实时值并非完全依赖于昂贵的在线测厚仪(如X射线测厚仪),而是可以通过入口厚度 h_{in} 、入口速度 v_{in} 和出口速度 v_{out} 计算得出: $h_{out} = (h_{in} \cdot v_{in}) / v_{out}$ 。如果出口线速度 v_{out} 的测量值存在正偏差(即测量值大于真实值),根据上述公式,计算出的出口厚度 h_{out} 将小于其真实值。AGC系统会误判为带材过薄,从而发出指令减小轧制力(或增大辊缝),试图增加厚度。然而,真实的带材并未变薄,此操作反而会导致实际出口厚度进一步增大,造成厚度超差。反之,若 v_{out} 测量值存在负偏差,则会引发相反的错误调节,导致带材过薄。这种由速度测量误差驱动的错误控制,会直接导致产品厚度公差超标,严重时甚至可能因调节幅度过大而引发断带事故。因此,线速度测量精度是保证厚度控制精度不可或缺的一环。

3.2 对板形与表面质量的间接影响:扰动张力控制

系统

在冷轧过程中,前后卷取机与轧机之间需要建立并维持精确的张力。恒定的张力对于保证带材平直(良好板形)、防止跑偏、控制延伸率以及获得均匀的表面状态至关重要。张力的大小通常是通过调节前后机架(或卷取机)之间的速度差来实现的。假设后机架的速度测量值出现正偏差,控制系统会认为后机架的实际速度比设定值快,从而判断当前张力过大。为了降低张力,系统会自动降低后机架的速度设定值。然而,后机架的真实速度并未改变,此操作实际上增大了前后机架间的真实速度差,导致张力不降反增。过大的张力会使带材过度拉伸,可能导致边部裂纹、板形不良(如拉伸矫直过度产生的屈服平台)等问题。反之,速度测量的负偏差则会导致张力不足,引发带材松弛、起皱、层间错动(产生擦伤)等缺陷。因此,线速度测量的任何微小波动,都会被张力控制系统放大,最终体现在产品的板形和表面质量上。

3.3 对轧制工艺模型校准的影响:扭曲前滑率计算

前滑率(ForwardSlip)是描述轧制变形区摩擦与润滑状态的核心工艺参数,其定义为 $(v_{slip} - v_{roll}) / v_{roll}$,其中 v_{slip} 是带材出口速度, v_{roll} 是轧辊线速度。准确的前滑率对于优化轧制油配方、设定合理的压下制度以及校准复杂的轧制力数学模型至关重要。现代冷轧机的设定模型需要通过实际生产数据进行自学习和在线校准,以提高预设定的精度。前滑率是其中一个关键的校准输入量。如果用于计算前滑率的带材出口速度 v_{slip} 因测量误差而不准确,那么计算出的前滑率也将失真。一个失真的前滑率反馈给模型后,会导致模型对当前轧制状态的误判^[3]。例如,模型可能会错误地认为摩擦系数发生了变化,从而在未来道次的设定中做出不恰当的调整,如错误地修正轧制力预测值。这种错误的累积会使得模型的预测能力逐渐下降,最终导致整个轧制过程的控制品质恶化,表现为厚度波动加剧、板形难以控制等一系列问题。

3.4 对生产管理与质量追溯的基础性作用

除了直接影响核心工艺控制外,精确的线速度还是生产管理和质量追溯体系的基石。通过对测速脉冲信号进行时间积分,可以精确计算出每个生产卷的总长度、分卷长度以及任意时刻带材的位置。这对于订单交付、成本核算、库存管理以及最重要的——缺陷精准定位,都具有不可估量的价值。当在线表面检测系统发现一个缺陷时,只有结合高精度的线速度数据,才能准确地标记出该缺陷在整卷带材中的具体位置(例如,距离卷头XX米处)。这对于后续的分切、判定和质量分析至关重要。

要。若线速度测量不准,缺陷定位就会出现偏差,轻则导致合格品被误判为废品,重则让带有缺陷的产品流入下游客户,造成严重的质量事故和经济损失。

4 提升线速度测量精度的综合策略

鉴于线速度测量精度对产品质量的全局性影响,必须采取系统性的措施来保障和提升其精度水平。

4.1 科学严谨的设备选型

选型是精度保障的第一步。应根据生产线的具体要求(如最高轧制速度、带材最小厚度、表面状态、环境条件等)选择合适的技术路线(LDV或空间滤波)和性能等级的测速仪。重点关注其标称精度、动态响应频率、抗环境干扰能力(如IP防护等级、抗电磁兼容性EMC指标)以及对不同表面状态的适应性^[4]。不应仅着眼于采购成本,而应从全生命周期的总拥有成本(TCO)角度进行考量。

4.2 规范化的安装与调试

严格按照制造商提供的安装手册进行操作是保证精度的关键。这包括精确控制测速仪与带材的距离、入射角度,确保光斑位于带材宽度方向的理想位置(通常为区域中心),并采取有效的减振措施。安装完成后,必须使用标准速度源或与其他高精度测量设备进行交叉比对,完成现场校准。

4.3 优化测量环境与信号处理

尽可能改善测速仪工作区域的环境,如加装防护罩以隔绝粉尘和油雾,采取屏蔽措施以减少电磁干扰。同时,利用测速仪内置的先进信号处理算法(如数字滤波、自适应增益控制)来抑制噪声,提取纯净的速度信号。合理设置滤波参数,在响应速度和信号平滑度之间取得最佳平衡。

4.4 建立完善的维护与校准制度

将测速仪纳入工厂的预防性维护计划,定期进行清

洁、检查和性能验证。建立周期性的校准制度,使用可溯源的标准装置对其精度进行核查,确保其长期处于受控状态。任何异常的测量波动都应及时排查原因,避免带病运行。

5 结语

本文通过对铝冷轧工艺的深入剖析,系统论证了线速度测量精度对产品质量的深远影响。研究表明,线速度绝非一个简单的生产参数,而是整个冷轧自动化控制体系的神经中枢。其测量精度的高低,直接决定了厚度控制的准确性、板形与表面质量的稳定性、轧制工艺模型的有效性以及生产管理与质量追溯的可靠性。线速度测量误差会通过“秒流量恒定”、张力控制、前滑率计算等多个核心路径,将微小的偏差放大为显著的产品质量问题。因此,将线速度测量系统视为与测厚仪、板形仪同等重要的关键质量传感器,并投入相应的资源进行科学选型、规范安装、精心维护和定期校准,是现代铝冷轧企业迈向高质量、高效益发展的必然选择。未来,随着人工智能、大数据等技术的融入,对线速度测量数据的深度挖掘和智能诊断,将进一步提升其在保障产品质量方面的价值,为铝加工行业的智能化升级奠定坚实的数据基础。

参考文献

- [1]李华,王建国.金属轧制过程中的速度测量技术及其误差分析[J].仪器仪表学报,2019,40(5):123-130.
- [2]张立,刘明.铝冷轧厚度控制系统中速度信号滤波方法研究[J].冶金自动化,2021,45(3):55-61.
- [3]周志宏,孙伟.铝合金冷轧过程中的振纹形成机理及抑制措施[J].轻合金加工技术,2020,48(7):23-29.
- [4]吴晓峰.轧机振动与速度测量噪声的相干性分析[J].振动工程学报,2022,35(2):412-419.