

Analysis of the Current Situation of Cold Rolling of High-Temperature Alloy Sheets and Strips

Mingchen Zhao Fuqiang Mei

Steel Research Engineering Design Co., Ltd., Beijing, 100081, China

Abstract

To address the challenges in cold rolling of thin-section high-temperature alloy sheets, such as high deformation resistance, coupled plate shape and surface quality, and equipment parameter matching, a thermal-coupled elastoplastic contact finite element model was constructed. The elastic properties of the rolls, the rigidity of the frame, the lowering and speed, the tension between the frames, and the frictional heat transfer characteristics of the emulsion were all taken into account. Multi-objective Pareto and response surface regression optimization were employed to form the coordinated setting range for lowering and speed, and the secondary verification paths for tension, bending rolls, roll type, and cross movement of the middle roll were provided. A device upgrade and intelligent transformation scheme centered on a high-stiffness four-roll unit, variable roll type, positive and negative bending rolls, and cross movement of the middle roll, as well as AGC and AFC collaborative control was proposed. Combined with zone spraying, online monitoring of lubrication concentration and cleanliness, and post-rolling cleaning and drying closure, the effectiveness of multi-machine parameter coupling optimization and thermal friction elasticity collaborative control in improving thickness accuracy, plate shape stability, and surface cleanliness was verified. This provides a complete technical path for stable supply of high-temperature alloy sheet products with thin specifications.

Keywords

high-temperature alloy sheet and strip; cold rolling; plate shape control; surface quality; numerical simulation optimization

高温合金板带冷轧现状分析

赵明臣 梅富强

钢研工程设计有限公司, 中国·北京 100081

摘要

面向薄规格高温合金板带冷轧中高变形抗力、板形与表面质量耦合以及设备参数匹配等难题, 构建热力耦合弹塑性接触有限元模型, 联动辊系弹性、机架刚度、压下与速度、机架间张力及乳化液摩擦传热特性, 采用多目标帕累托与响应面回归寻优, 形成压下与速度的协同设定区间, 并给出张力与弯辊、辊型的二次校核路径。提出以高刚度四辊机组、可变辊型与正负弯辊及中间辊横移、AGC与AFC协同控制为核心的设备升级与智能化改造方案, 配合分区喷淋、润滑浓度与清洁度在线监测和轧后清洗干燥闭环。结果验证了多机架参数耦合优化与热摩擦弹性协同控制在提升厚度精度、板形稳定与表面清洁度方面的有效性, 为高温合金板带薄规格稳定供货提供成套技术路径。

关键词

高温合金板带; 冷轧; 板形控制; 表面质量; 数值模拟优化

1 引言

航空航天与工业燃机对薄规格耐热材料的需求增长, 推动高温合金板带由单道次间歇轧制向多机架连续冷轧与连退协同演进。高温合金兼具固溶强化与沉淀强化, 冷态下变形抗力高、加工硬化强, 叠加低热导率, 使板形与表面质量控制耦合加深。国外已形成多机架连续化、在线测厚与表面检测以及乳化液清洁度控制的闭环工艺链, 厚度公差与表面粗糙度等指标显著领先^[1]。本研究围绕热力学与摩擦学多

场交互, 结合数值模拟与智能化控制, 提出可实施的参数寻优与设备改造方案, 旨在获得更高的厚度精度、板形稳定性与表面清洁度, 并提升产线效率。

2 高温合金板带冷轧技术发展现状

2.1 高温合金板带冷轧工艺发展历程与应用领域

鉴于航空推进与能源装备对薄规格耐热材料的增长需求, 高温合金板带冷轧工艺完成了由单道次间歇轧制向多道次串联连续轧制与连退协同的演进。高温合金为以镍基或钴基为主体并在高温下保持强度与抗氧化性的合金, 冷轧为在再结晶温度以下实施的塑性变形过程, 用来获得高精度厚度与表面质量。早期受轧机刚度与测厚控制制约, 单道次压下

【作者简介】赵明臣(1981-), 男, 中国北京人, 本科, 高级工程师, 从事轧钢研究。

有限且道次间需频繁中间退火,造成产线节拍慢与性能波动。随着四辊机组、自动厚度控制和精细润滑配置完善,多道次连续轧制配合在线退火把厚度精度与表面清洁度提升到更高水平,并推动薄规格拓展。

2.2 国内外高温合金板带冷轧研究与产业现状对比

鉴于航空与工业燃机对薄规格高温合金板带的严苛适配需求,北美与欧洲把多机架连续冷轧、在线测厚与表面检测、乳化液清洁度控制联成闭环,形成热轧、固溶、冷轧精整的稳定工艺链。国内研究在变形机理与润滑行为上积累加深,产线已实现小批量稳定供货,但在大卷连续化和批间一致性方面仍待提升。对比关键指标可见,国内典型厚度公差为 $\pm 0.05\text{ mm}$,而海外认证产线普遍达到 $\pm 0.03\text{ mm}$;国内表面粗糙度 R_a 控制在 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 以内,国外先进水平稳定在 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 以内。需重点关注的是,自动厚度控制AGC与自动板形控制AFC的协同,把厚度与板形波动压缩到目标窗口,进而牵引宽度尺寸、一致性与表面缺陷密度的系统改进^[2]。

3 高温合金板带冷轧过程中的关键技术难点与挑战

3.1 轧制变形抗力与温度控制难点

在高温合金板带轧制中,固溶强化与沉淀强化并存,使材料在大塑性变形阶段呈现高变形抗力特性,这一特性把机架轧制力推至高位,并对压下路径与润滑状态提出苛刻要求。从变形机理来看,应变硬化与位错交缠使流动应力随累积应变上升,且在多道次连续变形中叠加应变历史,导致入口段承载峰值被放大。鉴于此,需构建可表征应变硬化规律的本构关系,用于匹配轧机刚度与分配压下率。

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

其中, σ 表示变形抗力,单位为MPa; K 为材料强度系数,反映合金在给定温度与应变速率下的基准强度,单位为MPa; ε 为真应变,为无量纲量; n 为应变硬化指数,为无量纲量。

把温度窗口设定在900至1100℃,有助于在再结晶驱动与相稳定之间取得折中。温度升高会使强度系数下降,从而减小轧制力,温度偏低则上扬并与较高值耦合,使轧制力陡增并诱发板形异常。从工艺一致性来看,跨机架温度的瞬时波动会改变动态再结晶分数与晶粒长大速率,进而影响织构与残余应力分布,最终在硬度梯度与抗疲劳性能上形成区域差异。因此,应把温度场稳定控制并把温度敏感性纳入在线预测,以获得均匀组织与可控轧制力。

3.2 板形精度与表面质量控制挑战

立足高温合金板带在冷轧阶段强加工硬化与低塑性并存的工况,板形精度与表面质量的控制呈现耦合化难题。平直度控制目标设为不高于5I,从轧制力学角度来看,横向应力与厚差并行叠加会把边部浪形与中心鼓形同时放大,而辊系在热机械载荷共同作用下的弹性挠曲与热凸度变化又

把不均匀接触弧进一步固化为稳定缺陷。需重点关注的是,高温合金热导率较低,使辊面与带材界面温升更快,导致跨幅摩擦系数由中部向边部产生梯度,从而使张力分配与板形反馈陷入恶性循环。

进一步观察发现,表面划痕与氧化皮的生成具有多源驱动特性,其中辊面微观附着物与氧化碎屑的二次夹带会在高接触压力下形成线状或带状划痕,而润滑膜在高应力高温升条件下易出现瞬时失稳,使金属直接接触并触发粘着撕裂。把乳化液黏度、油滴尺寸、有效浓度与清洁度作为核心变量来进行管理工作,可在摩擦与传热两条路径上同时发挥作用,浓度稳定在3%至4%区间并配合在线精滤与温控,可显著降低接触界面的摩擦波动。辊面纹理与硬度匹配度同样不可忽视,粗糙峰谷不均一会把局部峰值压力推高,诱发黏着结瘤与周期性擦伤^[3]。

3.3 轧制设备与工艺参数匹配性问题

在高温合金板带冷轧的工艺系统中,设备刚度与工艺参数的协同匹配决定了变形均匀性与板形稳定性。轧机刚度系数可理解为轧制力变化与辊缝弹性压下变化的比值,数值越高表征机架与辊系的整体变形越小。辊系配置指工作辊与支承辊直径组合、辊型与辊胀预设、正负弯辊与横移策略的系统化设置。压下率是单道次厚度相对减少量,轧制速度指带钢出口线速度。

从机架弹性到接触弧分布的传递链条来看,当目标压下率与轧机刚度系数不相匹配时,辊缝在带钢宽向上产生差异化弹性闭合,机械皇冠与热皇冠的合成量随宽度位置发生偏移。刚度偏低且辊径组合偏软,会把接触弧中心区域的接触宽度扩大,导致中心区单位压力上升,边部因有效载荷不足而产生相对欠变形。与此相伴,弯辊力预置不足或辊型补偿不当,会使轧制力增长转化为额外的辊扁平效应,放大厚向与宽向的应力不均衡,进而在后续机架的拉伸协调中形成难以消除的累计板形误差。

从匹配路径的角度考察,提升有效刚度并对辊系进行针对性配置是抑制上述机理链条的关键环节。采用高刚度机座与大直径支承辊组合,可以把辊扁平带来的力学增厚效应控制在可调范围内;小直径工作辊配合可变辊型与正负弯辊闭环,能够在高压下实现宽向负荷的快速再分配;在压下率与速度联动设定上,应把单道次负荷峰值限制在弯辊和辊型的可补偿区间内,并凭借机架间张力的阶梯化设定对宽向延伸差进行二次调平。上述耦合思路的目标是让设备弹性、辊系几何与参数设定在接触弧、摩擦状态和温度场三个层面实现同向协同,从源头降低压下过载触发板形失控的概率。

4 高温合金板带冷轧优化策略与应用效果评估

4.1 基于数值模拟的工艺参数优化方法

鉴于薄规格高温合金板带在冷轧阶段呈现高变形抗力与板形表面耦合的工况,本研究把有限元数值模拟当作参数

寻优的核心工具，构建热—力耦合、弹—塑性接触模型，联动轧辊弹性变形、辊型与弯辊设定、机架刚度以及乳化液传热与摩擦特性，围绕道次压下与轧制速度对接触区应力应变与温升的影响进行系统扫描。模型采用跨幅三维带材—轧辊接触域以刻画厚向与宽向应变分配，弹性辊系与带材塑性体耦合求解，边界条件引入入口与出口张力、喷淋冷却与辊缝热源，摩擦系数依据速度与温升构建分区映射。参数空间设置为压下率 15% 至 30% 与速度 10 至 20 m/min，先以拉丁超立方抽样生成候选组合，再对近优区域进行加密仿真。基于多目标帕累托排序对候选组合进行归类，选取在满足承载约束条件下同时削弱应变梯度与剪应力峰值的参数域，形成压下一速度耦合设定的可选区间，再把机架间张力与辊系调节量嵌入二次校核以完成工艺路线固化。

4.2 轧制设备升级与智能化改造方案

面向薄规格高温合金板带的高负荷工况，提出以高精度四辊轧机为核心的设备升级与智能化改造路径。四辊轧机指以小直径工作辊配大直径支承辊的辊系组合，本研究选用加厚机座与一体化横梁把刚度系数提升约 20%，并配置可变辊型、正负弯辊以及中间辊横移的电液伺服单元，使辊缝弹性闭合更可控。结合快速 AGC 与 AFC 协同控制，AGC 为自动厚度控制，AFC 为自动板形控制，把负荷扰动映射为弯辊与辊型的实时补偿，抑制辊扁平与机械皇冠波动，稳定接触弧与中性点。配套的机架间张力以及主传动升级，选用高响应矢量驱动与双活套协调，把速度同步误差与张力相位滞后收敛在设定窗口，从应力再分配层面减弱宽向延伸差与边浪的放大效应。

再从热管理与摩擦控制的智能化入手，构建入口以及出口多波段测温、辊缝热模型与分区喷淋的闭环温控系统，把热凸度变化纳入在线补偿并对边中差喷射强度进行自适应调节。润滑与清洁子系统引入浓度折光监测、黏度估算与颗粒计数，配合磁性过滤以及精过滤维持乳化液清洁度与油滴尺度稳定，同时强化轧后清洗与风刀干燥以降低油污残留。

4.3 优化方案的应用效果评估

足于高温合金板带在冷轧阶段对厚度一致性、板形稳定性与表面清洁度的同步要求，本研究把优化方案的效果评估聚焦在厚度公差、平直度、表面粗糙度以及产线效率四个维度展开，并把统计口径与测量条件固化为可复现的评价框架，以避免不同批次与不同机组之间因方法差异带来的偏移。结合前文的参数寻优与设备协同设定，可观测到厚度精度与板形指标的收敛同向发生，表现为在相同厚度段内把公差窗口从 $\pm 0.05\text{ mm}$ 压缩至 $\pm 0.03\text{ mm}$ ，并把平直度指标

从 8I 收敛至 4I，这一趋势与 AGC 和 AFC 的闭环协同以及弯辊和辊型的在线补偿高度相关。进一步观察表面质量层面，润滑与清洁子系统对摩擦热与界面粘着的抑制作用使接触峰值剪应力降低，从而把表面粗糙度 Ra 由 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ ，且在跨卷统计口径下保持稳定波动范围。与质量维度并行，机架间张力的响应升级与主传动同步误差的收敛，叠加连轧与连退节拍的协调，使单位机时产出不提高单机架负荷峰值的前提下获得提升，综合评估对应生产效率提升 15%。在相同钢号的连卷统计中，四项指标的对比关系如表 1 所列，评价口径严格绑定厚度段、取样长度与统计方式，便于把不同批次的离散性纳入同一评价区间进行横向比较，从而支撑后续在多钢号、小批量供货场景中的长期过程稳定性判断。

表 1 优化前后高温合金板带冷轧关键指标对比

指标	优化前	优化后	统计口径与测量条件
厚度公差	$\pm 0.05\text{ mm}$	$\pm 0.03\text{ mm}$	厚度范围 0.5-2.5 mm，取样长度 1 m，3 σ 统计
平直度指标 I	8I	4I	长度 1 m 波高与波距综合评价，在线板形仪，跨卷统计
表面粗糙度 Ra	$1.2\text{ }\mu\text{m}$	$0.7\text{ }\mu\text{m}$	触针式测量，取样长度 0.8 mm，同卷 3 点均值
生产效率	100%	115%	以改造前年均机时产出为基准，连轧连退协同节拍，按班组核算

5 结语

本文以数值模拟驱动的参数寻优与设备智能化改造为抓手，建立了覆盖辊系弹性、压下速度张力联动与润滑热管理的协同控制体系，实现厚度公差、平直度与表面粗糙度的同步优化，并在不提升单机架负荷峰值的前提下提高产线效率。结果表明，多机架参数耦合与 AGC、AFC 闭环配合是抑制接触弧波动与摩擦失稳的关键，分区喷淋与乳化液清洁度管理可有效降低剪应力峰值与表面缺陷。后续将面向更宽规格与多钢号扩展模型参数库，强化在线缺陷识别与残余应力监测，细化摩擦与温度的自适应控制策略，进一步提升大卷连续化与批间一致性表现。

参考文献

[1] 段云波,王皓,马鑫,刘庆,王敏.冷轧汽车板表面“sliver”缺陷溯源分析研究[J].连铸,2025,44(02):15-21.

[2] 任禹铜,于庆波,秦勤.冷轧带钢感应加热退火过程的数值模拟[J].材料与冶金学报,2025,24(03):293-300.

[3] 游鑫,蔡笑蓉,杨庚蔚,金学军.薄板坯热轧过程多物理场演化与工艺参数的有限元分析[J].上海金属,