

初轧温度对 Cu/Al 复合管成形性的有限元研究★

何宗霖

(太原科技大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为提高双金属复合管轧制成型性, 以三辊纵轧 Cu/Al 复合管为研究对象, 针对其关键工艺参数初轧温度进行了数值仿真研究。结果表明: 过高的初始温度会对双金属变形温度场产生较大影响, 增大 Cu 层和 Al 层在纵向延伸上的差异, 影响复合管的成形性。

关键词: 热轧复合管; 有限元模拟; 温度场; 延伸率

中图分类号: TG 335.83

文献标识码: A

文章编号: 1672-1152(2026)01-0107-02

0 引言

自 20 世纪中叶起, 国外开始对金属复合管展开研究, 经过几十年的持续发展, 其应用技术已日益成熟。近年来, 我国在金属复合管领域的研究也取得了显著进展。铜铝双金属复合管兼具铜的良好的稳定性、导热性和铝的质量轻、抗腐蚀的优良性质, 被广泛应用于换热管材等领域。在能源和家电市场中, 铜铝复合管因其结合了铝的吸热性强、耐腐蚀和质量轻的特性以及铜的优异的散热性和稳定性等, 已成为备受关注的产品^[1-3]。然而, 由于我国对铜铝双金属复合管的研究起步较晚, 当前国内铜铝复合管的产量较低, 难以满足不断增长的市场需求。因此, 需要对铜铝双金属复合管的生产工艺进行深入研究, 找到一种高效的生产方法。相比其他生产工艺, 轧制具有生产效率高、成本较低的优势。

本文主要以铜铝复合管为研究对象, 采用三辊热轧工艺^[4-5]。以外管为铜管、内管为铝管的复合管为研究对象, 利用 Deform 有限元分析方法, 分析研究了三辊热轧过程中的复合管温度场和变形情况^[6]。通过优化铜铝复合管的热轧过程, 为双金属复合管轧制生产提供了理论依据。

1 有限元模型的建立

对某厂三辊纵轧机的主体部分进行测绘, 如图 1 所示。

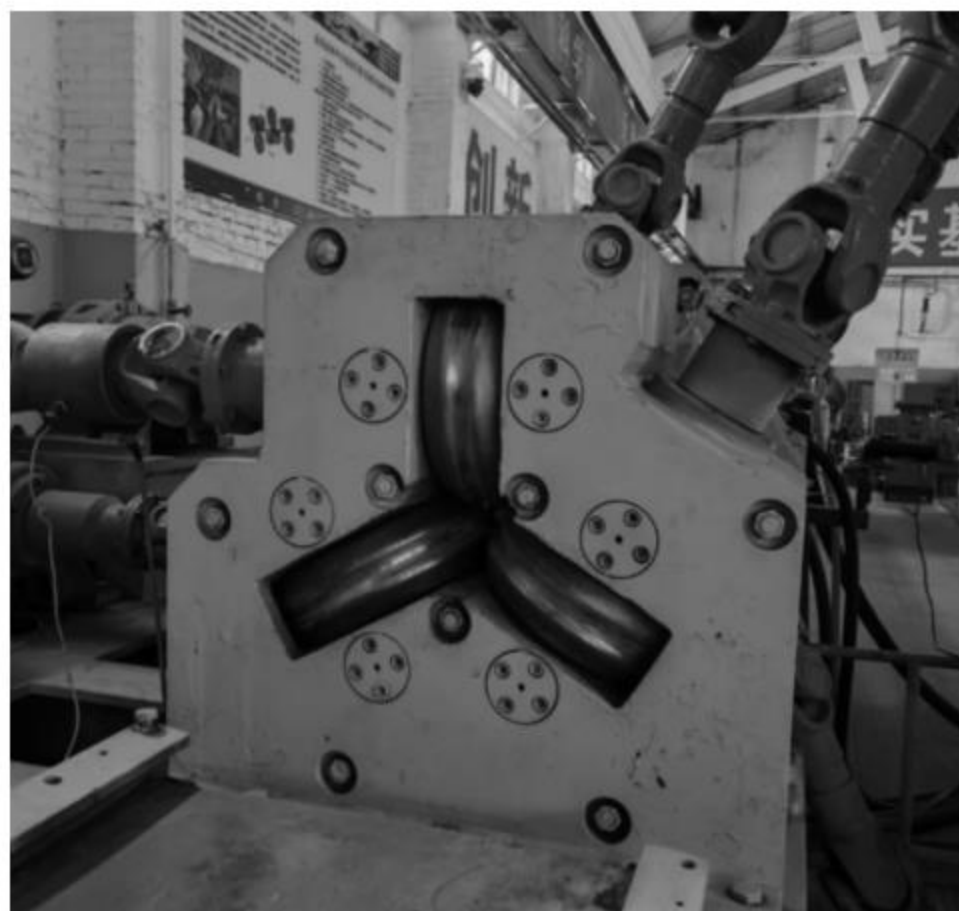


图 1 三辊纵轧机现场

使用 Solidworks 三维软件建立三辊纵轧机的主体变形部分, 包括轧辊、芯棒和复合管塑性变形体的模型, 将其导出为 STL 文件, 并导入 Deform 有限元中进行建模分析, 如图 2 所示。轧制道次选取 4 个道次。



图 2 四机架纵连轧有限元模型

2 有限元参数设定

2.1 材料属性设定

本次模拟试验选用的材料及规格尺寸如表 1 所示。内、外管设置为塑性体。轧辊、芯棒设置为刚性体。

表 1 材料属性及尺寸规格

材料属性	铜管	铝管
模拟实验牌号	C10100	3003
外径 /mm	44	50
壁厚 /mm	2	3
长度 /mm	500	500

2.2 网格划分

对内、外管进行网格划分, 网格类型选用四面体网格。内管、外管网格数量均为 60 000。如图 3 所示。

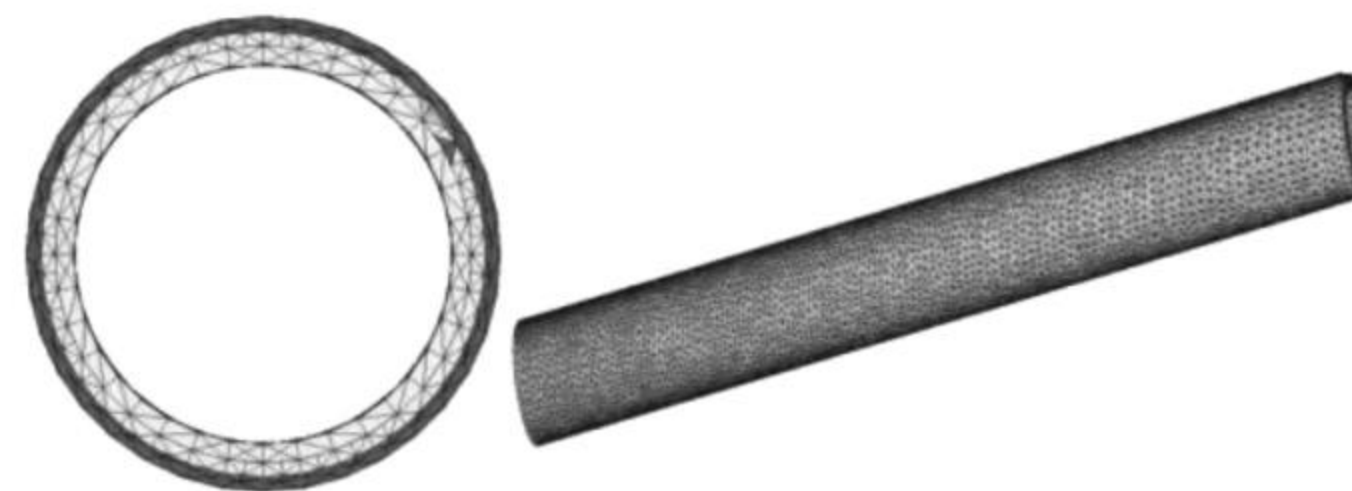


图 3 网格划分

2.3 边界条件设置

边界条件主要考虑轧辊、芯棒和复合管之间的摩擦和传热。根据经验, 参数设置如表 2 所示。

2.4 模拟控制设置

本次模拟设置 3 个温度对照组, 分别为 420 ℃、

收稿日期: 2025-10-14

★基金项目: 太原科技大学校级博士科研启动金 (20222045); 双金属冶金复合管轧制成形工艺研发 (2025098); 山西省教学改革创新项目 (J20250154); 太原科技大学校级教学改革创新研究项目 (JGB2025022)

作者简介: 何宗霖 (1982—), 男, 山西阳城人, 博士, 毕业于太原科技大学, 副教授, 研究方向为金属塑性成形。

表 2 边界条件设置

对象相互关系	铜管—铝管	芯棒—铜管	轧辊—铝管
摩擦类型	剪切	库伦	库伦
摩擦系数	0.3	0.02	0.2
热传导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	11	5	5

450 ℃和 480 ℃。模拟考虑耦合,并选用拉格朗日增量。模拟总步长为 1 000 步,每 50 步保存一次。

2.5 运动参数设置

考虑到金属连轧秒流量相等原则,经计算,对每个道次的轧辊转速和芯棒移速进行设置,如表 3 所示。

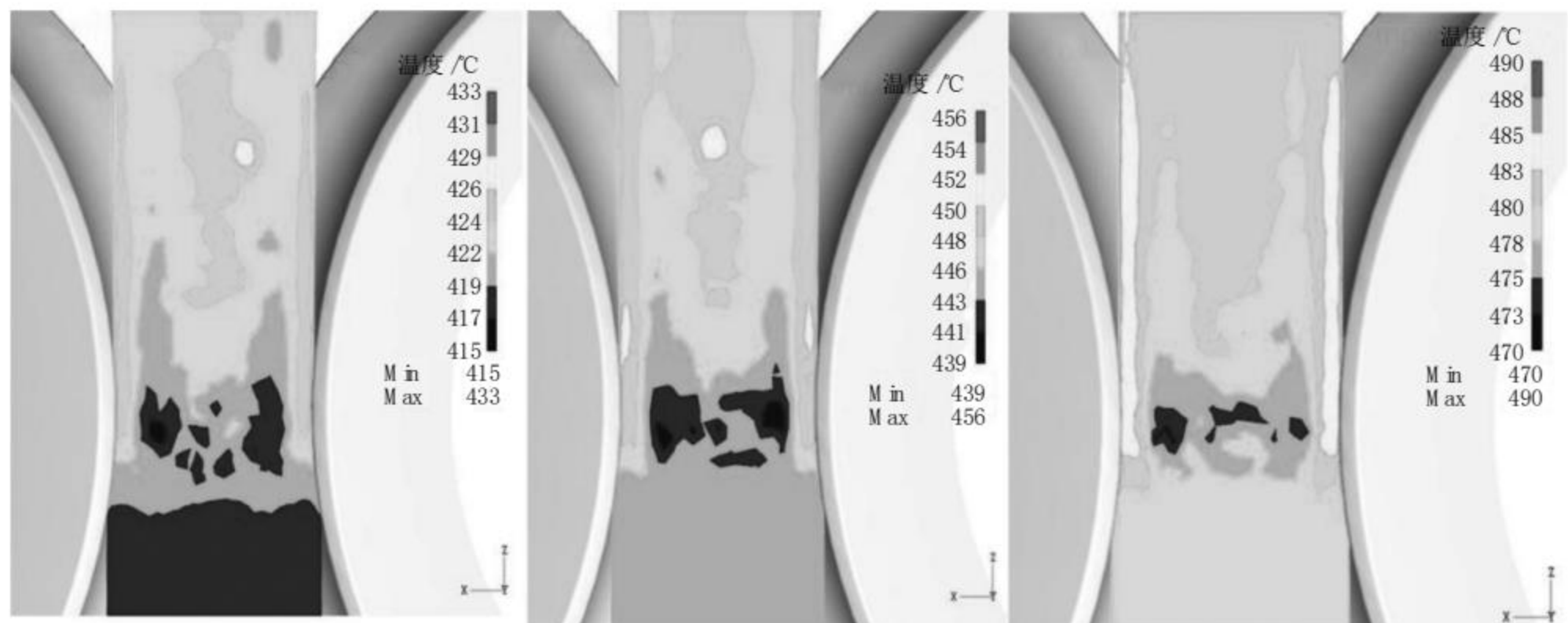
表 3 运动参数设置

轧制道次	轧辊转速/(rad/s)	芯棒速度/(m m/s)
1 道次	8.30	600
2 道次	10.50	600
3 道次	13.04	600
4 道次	14.17	600

3 有限元模拟分析

3.1 初始轧制温度对温度场的影响

通过选取纵剖面,可以观察到复合管在轧制过变形过程中辊底和辊侧部分温度场的分布情况,如图 4 所示,分别表示复合管初始温度为 420 ℃、450 ℃和 480 ℃时的情况。表 4 为对应温度下辊底和辊缝处的温度。



4-1 420 ℃ 4-2 450 ℃ 4-3 480 ℃
图 4 不同初始轧制温度下辊底和辊缝处温度场分布

表 4 不同初始轧制温度下辊底和辊缝处温度

初始轧制温度/℃	辊底温度最小值/℃	辊缝温度最大值/℃	温度差/℃
420	417	426	9
450	441	452	11
480	473	485	12

从表 4 可以看出,相对初始轧制温度,辊缝处的温度都有所升高,这是由于辊缝处的金属塑性变形程度较大,且未与轧辊接触。变性能使得该处金属温度升高,且没有热传导的损失。而辊底处的金属由于变形,相对辊缝较小,且与轧辊、芯棒均有接触,增加了金属与轧辊、芯棒间的热传导。这使得辊底处金属的温度相较初始温度有所下降。随着初始温度的升高,辊缝和辊底的温度差也逐渐上升,不仅不利于复合管的整体受力,而且微观组织的均匀性也会受到影响。

3.2 初始轧制温度对铜铝复合管纵向延伸的影响

不同初始温度下,铜铝复合管沿轧制方向上的延伸对比如图 5 所示。表 5 为铜管和铝管在 420 ℃、450 ℃和 480 ℃时的延伸长度对比数据。

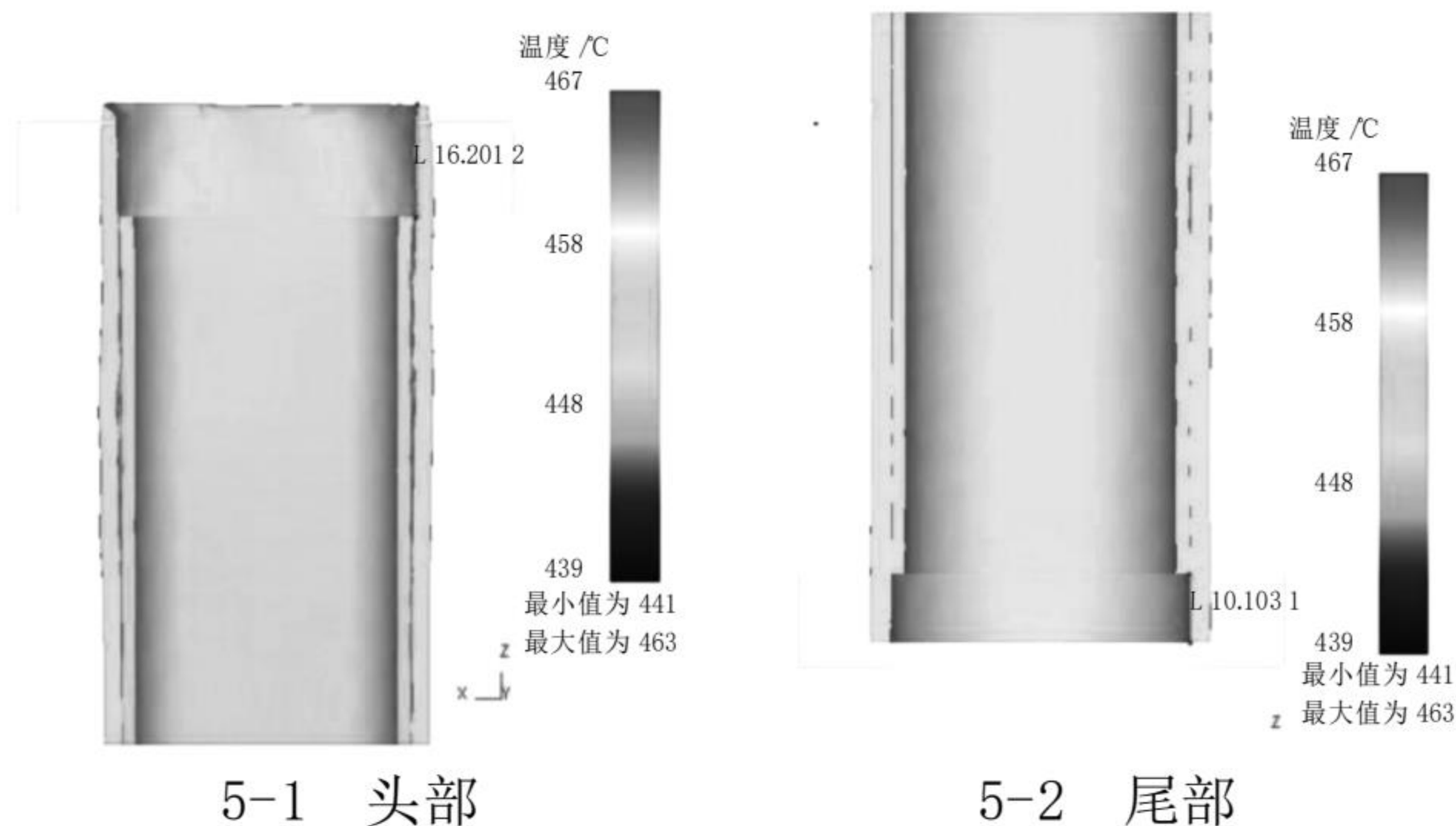


图 5 铝管铜管头部和尾部长度对比

表 5 不同初始轧制温度下铜管和铝管沿轧制方向的延伸长度

温度/℃	轧后长度/mm		前端铝管超出铜管长度/mm	后端铝管超出铜管长度/mm	轧后铜管和铝管长度差/mm
	铜管	铝管			
420	512.3	533.2	11.4	9.5	20.9
450	512	538.5	16.3	10.1	26.4
480	510.8	538.8	16.3	11.7	28.0

从图 5 可以看出,外管为铝管,有着更好的塑性,在轧制中的前滑和后滑上要比铜管(内管)更大。从表 5 可以看出,随着温度的升高,铜管的伸长量逐渐下降,而铝管的伸长量却逐渐上升。这将导致复合管头部和尾部内外管的尺寸差也出现增大的趋势。考虑到复合管在轧制方向的一致性,太高的温度不利于铜铝复合管延伸变形。

4 结论

1)采用 Deform 软件建立了在不同初始温度下的 Cu/Al 复合管纵轧有限元模型。

2)初始温度会影响 Cu/Al 复合管在变形区的温度场,过高的温度会使辊缝和辊底的温度差过大。

3)初始温度会影响 Cu/Al 复合管在轧制方向上的延伸,过高的温度会使铝管过长,影响复合管的成形性。

参考文献

[1] 田双永,徐泽,徐振,等.层状复合材料制备工艺现状及未来发展展望[J].铝加工,2024(2):3-10.
[2] 胡建华,郝亚栋,宋博,等.316L/20 复合管热连轧过程变形与应力分析及其实验研究[J].材料科学与工程,2025(3):82-89.
[3] 徐志祥.45 钢/316 不锈钢复合管三辊波平斜轧有限元模拟与工艺优化[D].太原:太原理工大学,2022.
[4] 胡建华,王小花,陈建勋,等.20 碳钢/316L 不锈钢复合材料热压缩试验与有限元模拟[J].锻压技术,2023,48(7):222-227.
[5] 苏剑峰.碳钢/不锈钢双金属复合管的数值模拟与工艺研究[D].太原:太原科技大学,2020.
[6] 张思宇.中厚板热轧过程温度场模型建立与实验研究[D].沈阳:东北大学,2019.

对过度受力敏感,根据胡克定律,小力即可产生大的横向变形,凸度侧投入的分离机制可匹配薄带特性。

厚板分离不仅依靠横向分离力,还需通过弯曲变形扩大分离间隙,凹侧投入时能形成更大的偏移角 α ,分离间隙与偏移角呈正相关关系,大的偏移角度可显著放大分离间隙。凸度侧投入时偏移角极小,无法使厚板产生有效弯曲。

3 结论

1)在重卷剖分机组中,宽幅厚板高强钢在圆盘剪处中剖后经分离辊分离时,分离辊装置的弧形辊以凹度侧向上并倾斜于机组运行方向投入可使带钢稳定分离,分离间隙 $\geq 20\text{ mm}$ 。

2)弧形辊与带钢间的包角和摩擦系数与带钢分

离间隙呈指数关系,对分离间隙影响最为显著,弧形辊以凹度侧投入时带钢会形成更大的偏移角,分离间隙与偏移角呈正相关关系,大的偏移角度可显著放大分离间隙。

参考文献

- [1] 孙亚波,张康武,任玉成,等.精整机组中剖带钢单卷取工艺及其控制方法[J].重型机械,2021(2):62-66.
- [2] 侯红亮,余肖放,曾元松.国内航空钣金装备技术现状与发展[J].航空制造技术,2009(1):34-39.
- [3] 景群平,任玉成,刘渭苗.剖分重卷检查生产工艺研究[J].重型机械,2016(5):52-55.
- [4] 周国盈.带钢精整设备[M].北京:机械工业出版社,1979.
- [5] 邹家祥.轧钢机械[M].北京:冶金工业出版社,1989.
- [6] 蒋维兴.轧钢机械设备[M].北京:冶金工业出版社,1981.

Research on Separation Process and Mechanism of Finishing and Rewinding Slitting Units

Xu Shenping¹, Ma Wei², Huang Guan¹, Yang Yu¹, Liu Qingjun¹, Zheng Wenyi¹, Ma Lansong²

(1. Guangzhou JFE Steel Sheet Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 511466, China; 2. China National Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710018, China)

Abstract: To achieve stable central separation of wide, thick high-strength steel plates in finishing and rewinding slitting units, a novel separation roller was designed. Through on-site debugging and mechanical analysis, it was determined that the optimal separation process involves positioning the curved roller with its concave side facing upward and angled toward the strip's forward direction. Actual measurements confirmed a separation gap of $\geq 20\text{ mm}$.

Key words: separating roll; curved roll; separation gap

(上接第 108 页)

Finite Element Study on the Formability of Cu/Al Composite Pipes Under Initial Rolling Temperature

He Zonglin

(School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China)

Abstract: In order to improve the formability of bimetallic composite pipes during rolling, a numerical simulation study was conducted on the key process parameter of three roll longitudinal rolling of Cu/Al composite pipes, namely the initial rolling temperature. The results indicate that excessively high initial temperatures have a significant impact on the deformation temperature field of bimetallic materials, increasing the difference in longitudinal extension between Cu and Al layers and affecting the formability of composite pipes.

Key words: hot rolled composite pipe; finite elements simulation; temperature field; elongation

(上接第 111 页)

Research on Hot Processing Technology of 625 Nickel-based Alloy

Qian Zhangxin

(Jiuquan Iron and Steel (Group) Co., Ltd., Jiayuguan Gansu 735100, China)

Abstract: The equilibrium phase diagram of 625 nickel based alloy was calculated using thermodynamic simulation software, and the precipitation behavior and thermal conductivity of its precipitates were studied. The results show that the solidification mode of 625 nickel based alloy is basically full austenite solidification, with a low solidus temperature, and the actual production process needs to limit the heating temperature. The main precipitated phases of 625 are γ'' phase and δ phase, but the precipitation time is relatively long and the actual production process has little impact. The thermal conductivity is inferior to stainless steel. The results of the pilot rolling test and the rheological stress curve indicate that the high-temperature strength of 625 is about 30% ~ 50% higher than that of 254SMO.

Key words: nickel-based alloy; equilibrium phase diagram; precipitated phases; high-temperature strength