

铜及铜合金管材三辊行星旋轧研究及应用现状

刘劲松^{1,2,3}, 孙扬乐¹, 陈大勇^{2,3}, 宋鸿武², 张士宏², 陈传来³

(1. 沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159; 2. 中国科学院金属研究所 师昌绪材料创新中心, 辽宁 沈阳 110016;
3. 常州润来科技有限公司, 江苏 常州 213149)

摘要: 随着对铜管材产品质量及效率的要求越来越高, 管材需要满足薄壁化、大螺旋角化和高齿化等更高标准。现有三辊行星旋轧工艺对管材组织未定量控制, 组织及性能均匀性难以保证, 对后续产品质量及性能产生不利影响。针对以上问题, 对三辊行星旋轧工艺的研究与应用进行了文献调研, 对相关研究机构、进展以及目前存在的研究盲点和问题进行了梳理和归纳。结果表明, 科研院所、高校及企业对铜及铜合金三辊行星旋轧工艺的宏观规律做了大量研究, 对轧制过程中的微观组织演变也有一定研究, 但目前还缺少对轧制水冷流量及组织定量调控的相关研究。三辊行星旋轧的定量化、差异化、精准化冷却, 将可能成为解决现有轧制管材缺陷的最有效途径之一, 为管材三辊行星旋轧工艺的智能化奠定理论模型及机理基础, 成为未来的研究热点。

关键词: 三辊行星旋轧; 铜及铜合金; 定量控制; 水冷控制系统; 组织演变

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.06.002

中图分类号: TG335

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 06-0014-12

Status of research and application on three-roll planetary rolling for copper and copper alloy tubes

Liu Jinsong^{1,2,3}, Sun Yangle¹, Chen Dayong^{2,3}, Song Hongwu², Zhang Shihong², Chen Chuanlai³

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;
2. Shi Changxu Materials Innovation Center, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. Changzhou Enreach Copper Co., Ltd., Changzhou 213149, China)

Abstract: With the increasing demand of the quality and efficiency of copper tube products, the tube needs to meet the higher standards of thin-wall, large spiral angle, high teeth and so on. However, the tube is not controlled quantitatively by the existing three-roll planetary rolling process and the uniformity of microstructure and properties is difficult to be guaranteed, which have adverse impact on the quality and properties of the subsequent products. Therefore, in view of the above problems, the research and application for the three-roll planetary rolling process were investigated, and the research affiliations, progress and existing blind spots and problems of three-roll planetary rolling for copper and copper alloy were reviewed and summarized. The results show that scientific research institutes, universities and enterprises have made a lot of research on the macroscopic laws of the three-roll planetary rolling process for copper and copper alloy and pay some attention on the microstructure evolution in the rolling process. However, the relevant research is still lack on the quantitative control of water cooling flow and microstructure in rolling. The quantitative, differentiated and precise cooling of three-roll planetary rolling may become one of the most effective ways to solve the defects of the existing rolled tubes, which will lay the theoretical model and mechanism foundation for the intellectualization of three-roll planetary rolling process for tubes and become the research hotspot soon.

Key words: three-roll planetary rolling; copper and copper alloy; quantitative control; control system of water cooling; microstructure evolution

三辊行星旋轧工艺利用三辊行星旋轧设备 (Planet Schräge Walzwerk, 简称为 PSW 轧机) 加工连铸管坯, 生产出质量优异的薄管坯, 是生产铜及

铜合金管材的主要手段。

三辊行星旋轧设备的发明到目前已有近 50 年的历史。1975 年, 第 1 台 PSW 轧机在原联邦德国的 Hoesch 冶金厂投入使用; 1977 年, 在瑞典 Hellefors 的 SKF 公司用于轧制轴承钢; 1982 年, 在日本用于轧制直径为 $\Phi 90$ 和 $\Phi 160$ mm 的特殊钢坯料; 1992 年, 韩国 Lucky 金属公司首次在国际上采用水平连铸-行星轧管 (Continuous Casting & Planetary Rolling,

收稿日期: 2023-11-06; 修订日期: 2024-02-09

基金项目: 2022 年度辽宁省教育厅基本科研项目 (LJKMZ20220591);

常州市领军型创新人才引进培育项目 (CQ20220057)

作者简介: 刘劲松 (1971-), 男, 博士, 教授

E-mail: jslu@imr.ac.cn

C&R)法进行铜管材的工业化生产,而行星轧制是铸轧法技术的核心^[1];1994年,金龙精密铜管集团股份有限公司将该技术引入我国^[2]。到目前为止,三辊行星轧机在铜管材的生产应用中已处于不可替代的地位。

在工业化应用的同时,国内外学者对铜管坯三辊行星旋轧也展开了广泛的研究工作。图1为国内外有关三辊行星旋轧工艺研究论文与专利的出版和被引用情况。可以看出,在2009年之后有关三辊行星旋轧工艺发表的论文与专利逐年增多,被引频次在2005年之后也呈上升趋势。发表的文献中,83%为轧制设备的专利,15%为学术论文。2000年前发表的文献中,论文仅占了4.2%,其余几乎均为专利,而在2000年后发表的论文数目占比上升至19.2%,可见对三辊行星旋轧研究的重点逐渐由设备研制专利转变为了轧制过程中温度场、应力应变场、轧辊轧件的宏微观特征、变形机理等相关研究。

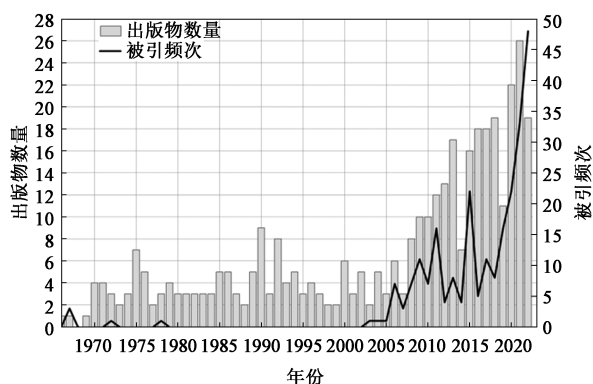


图1 三辊行星旋轧相关论文与专利发表情况

Fig. 1 Publication situation of relevant papers and patents on three-roll planetary rolling

中国科学院金属研究所张士宏团队是我国研究铜管材三辊行星旋轧工艺最早的队伍,并且做了较为系统的研究。研究成果包括在轧制过程中铜管坯的变形规律,管坯上一点的运动轨迹及相应规律,三维热力耦合有限元模拟分析等效应力、应变和温度变化规律,基于有限元的轧制力预测及分析,轧辊轧件接触区域的分布情况,轧制铜管材温度场预测及分析等宏观研究,铜管材轧制过程中组织演变的模拟与试验分析等微观研究及三辊行星旋轧试验机等设备研究^[2-10]。研究表明,轧制过程中轧件变形呈现三角形效应,并且轧件上任一点的运动轨迹呈螺旋形,B10铜合金较TP2紫铜在旋轧模拟过程中具有等效应力大、等效塑性应变过渡均匀、轧制温度高、温度梯度大等特点,高轧辊转速时较大的

摩擦因数有利于降低轧制力,而接触区域还与轧件的进给速度和轧辊转速有关。由于剧烈摩擦和巨大变形量,轧制温度升高至再结晶温度,使柱状晶转变为等轴晶粒,并且随着变形的进行,由再结晶形成的等轴晶会长大。对试验轧机的主要技术参数进行详细设计,设定不同的偏斜角和倾斜角进行试验研究。

Dieter F等^[11]对降低三辊行星轧机轧辊的磨损进行了研究,发明了带有不旋转支撑体的轧机承载保持架环;我国台湾阳明交通大学的Shih C K等^[12-14]对三辊行星旋轧无缝管材进行了试验与数值分析,研究了该工艺的变形特点及工件内部的应力、应变分布;我国台湾中山大学的Hwang Y M等^[15-16]对三辊行星旋轧铜棒材进行了分析,得到了应力应变分布、轧制力、入口和出口轧制速度等结果并提出了预测轧制结果的经验公式;中国科学院金属研究所李冰等^[2-3]和张士宏等^[4-10]对铜管材三辊行星旋轧过程中轧件变形规律、接触区分布、轧制力、温度场及组织性能、三辊旋轧试验机设备等进行了研究;哈尔滨工业大学Sun B Y等^[17]研究并得到了三辊行星旋轧管件的平均单位压力计算公式;北京科技大学臧勇等^[18-19]和曾庆龄^[20]对摩擦及不同辊形对铜管材三辊行星旋轧过程产生的影响进行了研究,分析了滑动系数的变化趋势及不同区域摩擦因数的影响,研究结果表明增大摩擦有利于减小金属滑动;大连理工大学付亚波等^[21]对白铜三辊行星旋轧及拉拔过程中塑性变形进行了研究,三辊行星旋轧后的B10铜合金管坯的偏心率优于挤压管坯,固溶强化与细晶强化产生了作用;中国有研科技集团有限公司吴朋越等^[22-23]对HAL77-2铝黄铜和紫铜管材的三辊行星旋轧过程进行了模拟分析,研究发现紫铜轧制过程中温度迅速升高、轧件呈现三角形效应,需控制黄铜管坯温度,防止出现开裂;美国中东大学的Bagherian E R等^[24]通过扩径试验对不同工艺的DHP铜管材的力学性能进行了研究,结果表明行星轧制较铸造或挤压管材样品具有更好的膨胀率;江苏隆达超合金航材有限公司的Pu Y^[25]对镍基高温合金管材三辊行星旋轧过程中轧辊和芯棒的表面质量等进行了研究;邵阳学院戴小标等^[26]利用Matlab对PSW轧机轧辊辊形进行了设计;浙江菲达环保科技股份有限公司的Wang L^[27]研究了一种新型的压辊技术控制冷却水的三辊行星轧机,可以有效避免压辊连续受热而损坏;俄罗斯国立研究技术大学的Akopyan T K等^[28]对轧制Al-Zn-Mg-Fe-Ni系新型铝合金的性能进行了研究,发现三辊行星旋轧处理后的力学性能优异;江苏隆达超合金航材有限公司的李华兵

等^[29]对三辊行星旋轧铜和铜合金的高温芯棒进行了研究,该合金芯轴的综合力学性能高、疲劳寿命高、高温强度高,提高了模具的使用寿命;海亮奥托铜管(广东)有限公司的林锡彬^[30]对三辊行星轧机轧辊表面角度进行了研究,所提出的轧辊可以依次连续、平滑地轧制多个管件,特别是可以轧制多个无氧铜件,有效地满足了生产的要求;武汉科技大学胡盛德等^[31]对不锈钢棒材行星轧制中裂纹损伤进行了分析,获得了一组最佳的轧制工艺参数;武汉科技大学 Li L X 等^[32]对含铌奥氏体不锈钢棒材三辊行星旋轧中的内部裂纹和孔洞进行了分析,研究表明限制伸长率对避免内部裂纹和孔洞的产生有影响;青岛登辉金属制品有限公司的孙进宅^[33]对用于加工铜管材的三辊行星轧机进行了研究;燕山大学张晓波^[34]、杨蕾^[35]对三辊行星旋轧铜管材的冷却装置进行了研究,发现冷却水套存在流动静区与内部涡流;沈阳理工大学刘劲松等^[36]对 TP2 铜管材三辊行星旋轧过程中的组织演变及变形规律进行了分析,研究发现轧制过程中发生了动态再结晶并且轧件上任一点呈螺旋式运动;邓迪大学的 Bagherian E R 等^[37]对行星旋轧铜管材的组织演变进行了研究,研究发现行星轧制试样的平均晶粒尺寸较铸造或挤压更小;南京理工大学刘一^[38]、熊炜^[39]、周玉伟^[40]分析了双金属管材三辊行星旋轧过程中变形组织、纯铜的变形温度及轧辊轧件接触区分布情况。

总体上看,国内外学者对三辊行星旋轧过程中轧件变形规律、温度场、冷却装置及组织演变等进行了分析,但相比轧制过程中的宏观分析,针对微观组织演变分析相对较少,并且对于轧件及轧辊的冷却装置的研究也较少。随着智能制造在各行各业的快速发展,以及高质量发展战略对高精度、高性能产品的极致需求,对轧管等产品的组织及性能提出了越来越高的要求,对于三辊行星旋轧热变形过程中的再结晶进行精确和差异性调控,将成为旋轧工艺研究的热点和未来的发展趋势。因此,本文对国内外现有的三辊行星旋轧研究现状进行总结和评述,对旋轧宏观变形、微观组织演化与有限元模拟等方面的研究进展及成果进行总结,旨在为铜管材三辊行星旋轧智能化以及组织精确调控的方法和手段的研究提供借鉴和基础。

1 三辊行星轧机工作原理

三辊行星旋轧是加工管坯使其壁厚更薄、性能

更好的一种工艺,主要包括管坯、3 个轧辊、芯棒和推车,如图 2 所示。轧制过程中,3 个锥形轧辊沿着同一方向自转,其轴线与管坯轴线具有一定的夹角,同时绕着管坯轴线进行公转,轧辊自转和公转方向相同^[41],而管坯在推车的推动下向前送进,轧辊公转的作用是抵消管坯在轧制过程中的扭转,实现径向压缩和轴向伸长,所以称为三辊行星旋轧。

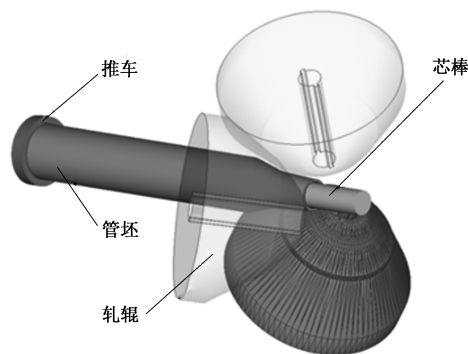


图 2 三辊行星旋轧示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three-roll planetary rolling

PSW 轧机是一种大压下量的管、棒材轧机,实际生产中的轧件在前进过程中不发生旋转运动而是仅做匀速直线运动,单道次变形量大、生产效率高,节约成本和时间,并且能自动咬入,不需要导向装置,产生的轧制力小且噪音低^[42]。三辊行星转动系统由一个行星轮系和差动轮系组成,辅助电机负责带动轧辊自转,主电机负责实现轧辊的公转^[9,43-44]。在实际生产中,调整主、辅电机转速达到合理的匹配值,使咬入前转动的轧件轧出后不转动。

根据最终应用和所需尺寸,管坯可以通过挤压、焊接或旋轧来加工,研究结果表明,旋轧铜管材质量不低于挤压铜管材。三辊行星轧机的 3 个渐锥轧辊具有一定的偏转角 α 和倾斜角 β 。轧辊轴线与轧制线成空间交叉的两直线,所形成的角度为 α ,产生轴向送进, α 越大,送进速度越大;轧辊轴线与管坯轴线成一定的倾角 β ,使管坯产生径向压力^[1,9]。

三辊行星旋轧过程中管坯变形复杂。管坯被轧辊咬入后,在持续的剧烈三向挤压变形中受到剧烈的摩擦,单道次变形量很大。剧烈摩擦和大变形量使管坯温度迅速升高,达到再结晶温度,管坯的微观组织发生变化。三辊行星旋轧变形过程中温度迅速升高,持续的高温会导致由于动态再结晶而细化的晶粒粗化,所以,通过在轧出端设置冷却装置来控制轧制温度从而控制晶粒尺寸,对于轧出的管材

性能至关重要,设置精细的对流换热冷却边界条件,可以获得性能较佳的薄管坯。

综上所述,三辊行星轧机主要用于成形管、棒材,而三辊行星旋轧工艺具有单道次变形量大、轧制温度高的加工特点,三辊行星旋轧技术已被广泛应用于铜管的生产,国内外学者对其研究较多。有限元模拟是一个很好的揭示变形过程信息的方式,通过有限元法对三辊行星旋轧工艺进行模拟分析,可以有效地掌握旋轧成形过程中摩擦对管坯成形的影响和温度场的变化,以及管坯发生动态再结晶后晶粒组织的变化,降低试验成本,节省时间,因此,对相关的模拟研究做进一步总结。

2 铜管三辊行星旋轧宏观及微观研究进展

自三辊行星旋轧技术引入我国,便有不少科研院所、企业及高校对三辊行星旋轧铜管坯展开了广泛的研究。其中,对三辊行星旋轧铜管材的宏观研究,大多采用有限元模拟法,还有一些机构采用试验及理论分析相结合的方法,主要从模具及变形体运动、应力及应变、温度场演变、工艺优化等方面开展研究;此外,还有研究人员主要从微观组织及性能的角度对三辊行星旋轧过程进行研究,包括微观组织演变、再结晶发生条件及程度、组织与性能之间的关系等。

2.1 宏观研究

2004年,金龙精密铜管集团股份有限公司的董顺德等^[45]基于三辊行星轧机的结构和工作原理分析了轧制过程中管材不旋转的条件和管材运动形式。试验发现,可以通过调整主、辅电机转速达到合理的匹配值来保证管材旋轧过程中不产生旋转,从而真正实现连续轧制。

2005年,中国科学院金属研究所李冰等^[4-5,7]对B10铜合金管材三辊行星旋轧过程进行了热力耦合模拟及试验分析,研究了等效应力、应变及温度分布,并与TP2紫铜的模拟结果进行了对比。发现铜合金在轧制过程中具有等效应力大、温度高、等效应变过渡均匀等特点,在轧制过程中TP2铜管材的温度会升高至700℃左右,降低了轧制力并改善了管材性能,轧后的变形组织仍可以满足后续拉制要求。同年,李冰等^[3]又应用弹塑性大变形有限元法对铜管材的三辊行星旋轧过程进行了三维有限元模拟研究,发现在轧制过程中三向压应力起主要作用,

管坯经历了由圆形到三角形再归整到圆形的变形过程,即三角形效应。

2006年,中国科学院金属研究所李章刚等^[6]采用基于Levenberg-Marquardt算法的BP神经网络分析了摩擦因数、轧辊偏转角和轧辊转速对轧制力的影响。分析表明,适当增大摩擦因数可以降低轧制力,而增大偏转角和轧辊转速可以提高轧制力。

2008年,沈阳理工大学刘劲松等^[46]采用正交试验设计了三辊行星旋轧铜管的试验方案,利用BP神经网络建立了映射关系,并与遗传算法寻优相结合,获取了三辊行星旋轧工艺的最优工艺参数。研究结果表明,偏转角为6.84°、轧辊转速为102.97 r·min⁻¹、摩擦因数为0.69时,轧制力最小。

2009年,北京科技大学李立敏等^[18]通过将有限元软件MSC. Marc模拟结果与现场数据进行对比,研究了摩擦状况对铜管材三辊行星旋轧的影响。研究表明,适当增大摩擦有利于减小金属滑动和成品的圆度误差。同年,李立敏等^[19]又利用有限元软件MSC. Marc对五段式和四段式轧辊进行了模拟分析。研究表明,在两种辊形轧制模拟过程中,管坯和成品的尺寸完全相同,但在轧件变形规律和温度等方面存在不同,五段式轧辊轧出的轧件截面的三角形效应比四段式更明显,并且也比四段式轧辊轧出的轧件截面先归圆。

2011年,中国有研科技集团有限公司吴朋越等^[22]运用有限元软件DEFORM-3D进行模拟,研究了紫铜管材在三辊行星旋轧过程中温度场的变化规律和管坯的变形规律。结果表明,变形过程中铜管材的温度迅速升高至753℃,同样发现轧制过程中管坯变形呈现三角形效应。

2016年,北京科技大学曾庆龄^[20]利用有限元软件ABAQUS建立了铜管材三辊行星旋轧的三维热力耦合模型,在原有的仅考虑轧辊自转的模型的基础上加入了轧辊公转因素,并且将轧辊按摩擦情况分为3个区域,针对不同区域的摩擦因数对轧制速度和扭转的影响展开研究。发现轧制过程中的扭转会随着减径段及精整段和归圆段的摩擦因数的减小而减弱,轧件出口的轴向速度会随着减径段和集中变形段摩擦因数的增大而增大。并且,随后又提出了将二次扭转段作为独立的被动段,从轧辊中分离出来以减轻二次扭转现象的新思路。利用有限元软件ABAQUS进行模拟,研究发现,轧辊结构的改变对金属变形、温度和轧制力的影响较小,但有效地减小了二次扭转变形,并使轧管外圆度略

有提高。该研究为三辊行星轧机轧辊设计提供了新的思路。

2016 年, 山东大学董莹^[47]采用 MSC. Marc 有限元软件及 ANSYS Workbench 软件对三辊行星轧辊进行了耦合模拟分析。模拟分析了轧辊和轧件温度场、应力场、应变场的分布情况, 轧辊与铜管坯接触区域的最高温度约为 380 ℃, 并且此区域的热通量远大于非接触区域的热通量, 轧辊在高温环境下的应力和变形量均呈增大趋势。南京理工大学刘一^[38]对三辊行星旋轧变形区进行了理论分析, 结果表明, 接触区的分布还受到轧件原始尺寸的影响, 因为轧辊与轧件的接触区域随着轧件轴向的延伸变得更为狭窄; 建立了三辊行星旋轧变形过程中的运动许可速度场分布模型, 应变、应变速率分布模型及温升储能模型。

2018 年, 燕山大学 Han Y 等^[48]利用 ABAQUS 和 FLUENT 软件进行了铜管材三辊行星旋轧热力耦合模拟分析, 并对轧件冷却后的穿水冷却过程进行了有限元仿真。研究表明, 在冷却水模型内部存在流动“静区”和“涡流”现象, 调整冷却水套进水口和出水口的位置可以改善温度分布不均匀的现象(进水口位置为两端左侧, 出水口位置为水套上下两部分均匀分布)。最终, 通过金相试验和显微硬度试验的对比分析, 验证了模型的准确性。要保证轧件的冷却效果, 就要避免流动“静区”和内部“涡流”的产生, 优化改进冷却装置。上海龙阳精密复合铜管有限公司胡贤富等^[49]分析了轧辊的冷却装置, 以及如何调整冷却装置来提高轧辊的表面质量和使用寿命。结果显示, 将突变区作为冷却位置, 冷却水要连续、足量, 生产中轧辊冷却水温设定在 40~60 ℃ 之间, 增设过滤网或过滤系统进行过滤以保证冷却水洁净, 防止杂物堵塞喷水环的出水孔, 同时冷却水也起到了润滑的作用。

2019 年, 江西铜业集团有限公司加工事业部刘长荣^[50]通过模拟分析设计了三辊行星旋轧冷却系统, 运用新式可调水嘴喷水环冷却系统, 通过调整水嘴喷水环孔径实现对各轧制区域冷却流量的控制, 最大限度地降低轧辊热变劳损和粗糙, 从而大幅提升轧辊的使用寿命, 降低了生产成本, 改善了轧管表面质量。海军航空大学 Yang Z J 等^[51]对轧辊芯棒进行了热力耦合模拟分析, 建立了轧辊的受力模型, 并根据被加工材料的特性分析了轧辊的温度场, 为轧辊的热力耦合分析提供了数据支持, 分析了轧辊温度场、应力场和应变场分布对轧辊的影响。研究

发现, 轧辊与轧件接触区的温度远高于非接触区的温度, 并且随着轧辊与变形管坯的接触数的增加, 节点的最高温度逐渐升高, 在高温环境中轧辊的应力与变形量均增加。同年, 广东海亮铜业有限公司的秦备荒^[52]利用试验与有限元分析相结合的方法, 对铜管材三辊行星旋轧过程中轧辊轴的力学行为进行了研究。轧辊轴力在整个旋轧过程中起着关键作用, 在对轧辊轴力进行分析之前, 需要对其中的支承反力、扭矩力以及弯矩力展开分析。实际生产中, 轧辊主要受到接触压力和扭矩力, 而扭矩为摩擦力与半径的乘积。

2020 年, 燕山大学杨蕾^[35]借助有限元软件 ABAQUS、FLUENT 和 MPCCL, 对铜管材三辊行星旋轧和轧后冷却过程进行了模拟分析, 研究了进水口、出水口位置和尺寸的改造对冷却水套内部流动和轧件应力场的影响。研究表明, 轧件整体温度分布较均匀, 最高温度出现在轧件中部, 最低温度出现在轧件头部, 均高于铜的再结晶温度; 轧件整体应力分布也较为均匀, 最高等效应力出现在轧件头部和尾部, 最低等效应力出现在轧件头部; 冷却水套内部同样出现了流动“静区”和“涡流”现象(进水口分布于右端, 及由于水封不严等效成的两端 4 个周向分布的进水口; 出水口分布于水套上端及左端出口), 要保证轧件的冷却效果, 就要避免流动“静区”和内部“涡流”的产生, 优化改进冷却装置。

2023 年, 沈阳理工大学李旺^[53]通过 Simufact Forming 有限元软件分析了铜管材在三辊行星旋轧过程中对水平连铸中常出现的表面裂纹、粗糙、坑穴、内部裂纹、气孔、缩孔、夹杂等几何缺陷的修复性。建立了铜管材三辊行星旋轧变形及传热过程的离线数值模型, 根据模型计算结果对铜管材三辊行星旋轧的变形及温度分布特点进行了分析; 基于当前模型对铜管坯内部缺陷的形变演化特点进行了分析, 开发了基于质点追踪法的铜管坯几何缺陷变形后尺寸在线预测原型程序。然而基于缺陷无损检测的技术, 传统解决方案仍存在一些局限, 而以数值模拟作为基本研究手段的方法还需要不断完善。

三辊行星旋轧技术在铜管材生产中的应用越来越广泛, 对铜管材三辊行星旋轧技术的研究也越来越多。通过以上研究总结可以得出:

(1) 调整主、辅电机转速可以使管坯在轧制过程中不旋转;

(2) 在铜合金管坯三辊行星旋轧过程中三向压

应力起主要作用,最高等效力出现在轧件头部和尾部,轧件中部的等效力分布均匀;

(3) 三辊行星旋轧过程中轧件温度不断升高,达到铜的再结晶温度时轧件中部各截面具有相同的均匀温度分布;

(4) 降低摩擦因数可以减小管坯扭转,增大摩擦因数可以减小轧制力、金属滑动和成品圆度误差;而摩擦力会随着倾斜角的增大而减小;

(5) 管坯经历了由圆形到三角形再归整到圆形的变形过程,轧制过程中任一点的运动轨迹表现为螺旋形;

(6) 轧辊轧件接触区域与行星轮公转半径、偏转角、倾斜角、轧件前进速度、轧辊转速及轧件原始尺寸有关,并且该区域的热通量远大于非接触区域的热通量;

(7) 轧辊结构的改变可以有效地减小二次扭转变形,四段式轧辊轧件的畸变比五段式小,而五段式轧辊变形区的温度高于四段式;

(8) 要保证轧件的冷却效果,就要避免流动“静区”和内部“涡流”的产生,把突变区作为轧辊的主要冷却位置;

(9) 开发了基于质点追踪法的铜管坯几何缺陷变形后尺寸在线预测原型程序。

通过以上分析可以发现,已经有许多企业、高校及科研院所对铜管材三辊行星旋轧工艺进行了研究。分析手段大多数倾向于 DEFORM-3D、MSC. Marc、ABAQUS 和 Simufact Forming 等有限元软件。通过不断地模拟、试验及理论分析,三辊行星旋轧铜管材的轧辊结构、温度场、应力场、变形规律、轧辊轧件接触区域及摩擦对轧制影响等的研究已逐渐趋于完善,研究人员关注的重点已经慢慢从对旋轧过程中轧件轧辊温度场、应力场及变形规律的分析逐步转变为对轧辊轧件的冷却分析。由于三辊行星旋轧具有单道次变形量大的特点,温度升高迅速,铜管坯会发生动态再结晶,对轧辊进行冷却可以延长其使用寿命,也可以提高轧件的表面质量,而对轧后的轧件进行冷却,则是为了控制再结晶晶粒的长大,改善铜管材的性能,晶粒尺寸对管材的性能至关重要。但三辊行星旋轧铜管材冷却装置的研究还在不断探索中,还需要考虑增加冷却区域,采用柔性控冷技术等。

2.2 微观组织研究进展

2004 年,金龙精密铜管集团股份有限公司的董顺德等^[45]对三辊行星旋轧得到的铜管材在不同阶段

断面处的组织变化进行了试验观测分析,研究发现,在轧制过程中铜管坯由柱状晶组织变为弯曲柱状晶又变为纤维状变形组织,最后变为再结晶组织。

2006 年,中国科学院金属研究所李冰等^[7]对铜管材轧制过程中的微观组织进行了金相试验观察,研究发现,轧制变形量大、轧制温度高,铜管组织由初始柱状晶向等轴晶转变,在集中变形区发生动态再结晶,随后晶粒迅速膨胀并逐渐稳定,可以通过控制轧出集中变形区后的冷却速度来优化晶粒尺寸,管坯的硬度在远离轧辊集中变形区处逐渐降低,轧辊速度的变化是导致集中变形区组织极端演化的主要原因。因此,铜管材的性能可以通过集中变形区来控制。中南大学刘东华等^[54]和邓楚平等^[55]利用金相显微镜、布氏硬度仪以及激光热导仪对三辊行星旋轧过程中紫铜管材的组织 and 性能进行研究,发现轧制变形量达到一定时发生了再结晶,形成的晶界为锯齿状的等轴晶,而等轴晶内部存在被缠结的位错所分割的亚晶粒,亚晶粒的形成是因为在动态再结晶晶核长大的同时变形也在继续,形成了亚结构。

2007 年,中国科学院金属研究所李冰等^[8]将微观组织演化模型与有限元模拟相结合,得到了铜管材的晶粒分布规律。利用人工神经网络对不同工艺参数下铜管材的晶粒尺寸进行了预测。研究结果表明,在减径区时,动态再结晶发生在铜管坯的上下两侧,在集中变形区时,铜管坯在整个厚度方向上均发生了动态再结晶,并且动态再结晶的初始晶粒在高温阶段会逐渐长大。计算结果与实测结果吻合较好,可用于优化轧制铜管材的性能。

2008 年,沈阳理工大学刘劲松等^[36]对三辊行星旋轧的 TP2 铜管坯进行了研究,采用有限元技术与金相试验相结合的方法,分析了轧制过程中轧件的微观组织变化。研究发现,铜管坯在旋轧过程中发生了在集中变形区合并的动态再结晶,轧制完成后只有少量的加工流线组织保留了下来,再结晶晶粒已经基本分布均匀。

2016 年,南京理工大学熊炜^[39]研究了 TP2 紫铜/3003 铝合金双金属复合管材的三辊行星旋轧,利用电子背散射衍射技术分析双金属管材轧制过程中的组织演变,采用差示扫描热分析法计算了金属内部变形储存能。研究表明,增大变形量可以明显细化铝合金及紫铜的晶粒,金属内部的储存能也呈上升趋势;晶粒尺寸随着变形温度的下降和应变速率的提高而减小,当温度降到一定程度后,金属

内部不会发生再结晶而是出现大量的亚晶粒。

2018 年,南京理工大学周玉伟^[40]对纯铜管材三辊行星旋轧过程中的变形升温热加工进行了研究。通过金相和电子背散射衍射分析观察了金属的宏观组织,发现铜样品整体晶粒沿轴向细化,组织不均匀性下降,同时减径区管材沿径向呈现出梯度分布状态,最终在集中加工区的出口处形成均匀的等轴组织,且发现出口处的管材织构为一种近轧制织构,而加工过程中发生的再结晶弱化了该织构的强度;通过模拟分析了纯铜管材轧制过程中温度场、应力场及应变场的分布情况,与发生再结晶行为的结果相吻合。同年,周玉伟等^[56]又研究了采用三辊行星轧机轧制的工业纯铜 TP2 管材的显微组织。通过电子背散射衍射观察分析发现,由于加工过程中发生了动态再结晶,粗晶组织转变为细晶组织,晶粒细化一般是沿着轴向移动实现的,再结晶使细长晶粒被等轴晶所取代。

通过以上对三辊行星旋轧铜管材微观组织的相关研究进行总结可以发现:

(1) 轧制过程中,管坯整体晶粒沿轴向细化,组织不均匀性下降,同时减径区管材沿径向呈现出梯度分布状态,最终在集中加工区的出口处形成均匀等轴组织;

(2) 铜管材在三辊行星旋轧过程中发生动态再结晶,管坯由柱状晶转变为存在亚晶粒的等轴晶组织;

(3) 动态再结晶发生在铜管坯的上下两侧,并在轧辊的集中变形区合并,可以通过控制集中变形区的温度控制晶粒长大,从而改善管坯性能;

(4) 增大变形量可以细化紫铜晶粒,变形温度的下降和应变速率的提高也会使晶粒尺寸减小。

可见,相比三辊行星旋轧铜管材的宏观研究,对微观组织演变的研究较少。微观组织的研究主要包括企业、高校及科研院所对组织转变及其影响因素的研究。大多数研究人员均采用金相和电子背散射衍射进行试验分析,也有研究人员利用金相试验与有限元模拟相结合进行分析。通过分析可以发现,在三辊行星旋轧过程中,管坯发生了动态再结晶,动态再结晶首先在集中变形区发生,晶粒会细化,管坯由最初的柱状晶转变为了等轴晶组织,但随着温度的提高,再结晶晶粒长大。从以上分析可以看出,对铜管材三辊行星旋轧过程中的组织演变规律也有待继续探索。

铜管的微观组织对铜管的成形性和性能有着重

要的影响。三辊行星旋轧工艺由于剧烈的变形和摩擦功产生的热量导致 TP2 铜管坯的温度超过了再结晶温度,旋轧变形由冷变形变为热变形,管坯在整个壁厚方向上发生动态再结晶,晶粒尺寸减小,但随着变形的继续,动态再结晶的初始晶粒在持续的高温下逐渐长大^[8]。旋轧冷却装置不仅可以降低轧后的管材温度,控制再结晶晶粒长大,而且可以延长轧辊的使用寿命。国内外学者对轧后冷却装置的研究很少^[35],更缺少对轧后冷却系统对管材组织影响的研究,通过控冷装置对轧后管材晶粒进行定量化控制的研究对铜管坯三辊行星旋轧工艺生产具有重要意义。

我国的铜管材加工生产线中,轧后冷却装置一直作为三辊行星轧机的附属设备使用,轧后管材的冷却工艺并未成为一个单独且重要的生产工序,并且其主要作用是防止高温铜管材与空气接触而氧化,无调控轧后铜管材组织结构的能力。目前,国内各铜管材加工企业轧后冷却装置技术的主要改进方向集中在提高管坯的冷却均匀性和冷却水流量与轧制工艺的适配性等方面,未从原理和技术上进行彻底改进,难以满足生产高质量铜管材的要求。

目前,已有企业联合相应研究机构率先开展了铜管轧后差异性冷却控制技术研究工作,提出了轧后柔性冷却技术并拟研发相应装备,包含水、气雾、氮气 3 种冷却模式,具有冷却速率可调范围大、冷却均匀性好、控制精度高的特点。柔性冷却装备采用环形喷嘴布置方案,沿铜管运动方向设置 4 个可独立控制的环形冷却单元。每个冷却单元均布置有冷却水喷嘴和氮气喷嘴,以此实现水、气雾、氮气 3 种冷却方式的选择。实现冷却速率可大范围调整、冷却均匀性好、控制精度高的目标。

柔性控冷技术的开发是我国铜管材加工产业的一项重要技术升级,如果该技术实现工业化应用,将首次实现铜管材三辊行星旋轧智能化控轧控冷,有望成为铜管材产线的标准装备,对我国精密铜管材产业的发展与创新具有重要意义。

综上所述,三辊行星旋轧变形的影响因素较多,对行星旋轧铜管材的宏观研究包括轧辊结构、温度场、应力场、变形规律、轧辊轧件接触区域及摩擦对轧制的影响等均已经比较完善,而对轧辊轧件冷却系统的分析却较少;有关组织演变的研究相对宏观研究滞后,相关的研究结果存在一定局限性^[57],需要继续探索。轧制过程中主要发生了动态再结晶,达到了细化晶粒的作用,如果工艺参数控制不合理,

后续高温会使晶粒粗化,而随着对微观组织的不断研究,对晶粒的精确度和组织性能的要求越来越高,所以,考虑通过设计采用专用的冷却方式和技术来冷却轧辊及轧件,对三辊行星旋轧铜管材的生产至关重要,是三辊行星旋轧研究的热点问题。

3 三辊行星旋轧有限元模拟重点关注问题

3.1 模型处理

有限元模拟技术在材料加工行业的应用越来越广泛,通过模拟可以获得成形质量、性能均优异的管坯参数,与具体试验相结合,优化轧制工艺,减少了试验的成本和时间。三辊行星旋轧过程中,管材发生较大的减径和减壁,管坯初始尺寸与轧制成形后的尺寸相差较大。因此,将管坯直接推入轧制必然会由于无法顺利咬入而导致模拟计算出错。所以,对管坯的几何模型进行锥形化处理,即将管坯的前端设计为锥形^[23],并且管坯的锥形部分的外形还应与轧辊的集中变形区相匹配。

由于轧制大变形量产生的网格畸变问题,单元网格划分也存在难点。针对此问题,李冰^[2]采用 MSC. Marc 有限元软件进行模拟时,网格划分采用 8 节点 6 面体等参单元划分法,计算中针对三维大变形成形问题采用更新的 Lagrange 算法、Prandtl-Reuss 流动方程以及 von Mises 屈服准则来处理。李旺^[53]采用 Simufact Forming 软件进行模拟时,采用四面体进行几何离散,并在变形达到一定量时进行网格重划分,有效降低了网格畸变量,顺利实现了更准确的模拟,管坯的网格划分如图 3 所示。曾庆龄^[20]利用大型非线性有限元软件 ABAQUS 的 Explicit 中的 ALE 功能,采用任意的拉格朗日-欧拉单元进行网格划分,得到了适用于大变形场景的铸坯网格,解决了三辊行星旋轧仿真过程中存在的网格畸变的问题。

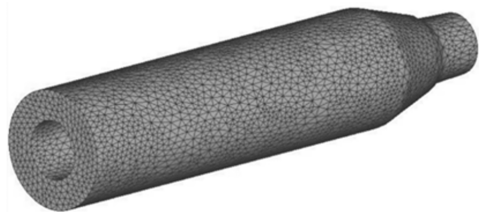


图3 三辊行星旋轧管坯网格划分

Fig. 3 Mesh division of tube billet for three-roll planetary rolling

轧辊表面形状比较复杂,为了顺利、准确地模

拟计算,需要对轧辊表面形状、摩擦状态等做一定的简化。三辊行星旋轧生产中锥形轧辊的实际外形如图 4 所示^[2]。有限元模拟过程中,为了提高计算效率,轧辊前端外表面的环形沟槽采用平面,通过增大摩擦因数的方式来等效代替环形沟槽提供较大的摩擦力。为了使管坯正常的进给和变形,轧辊在装配时存在偏转角和倾斜角,为管坯提供径向和轴向的分力。

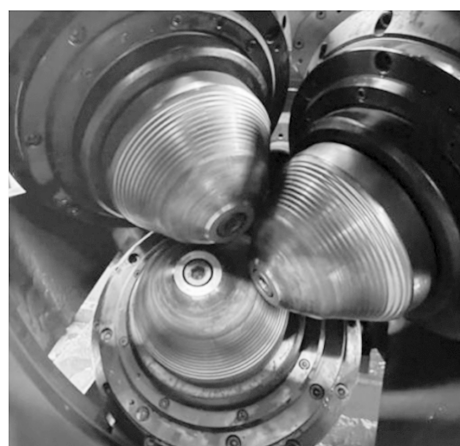


图4 表面带有环形沟槽的实际轧辊

Fig. 4 Actual roll with annular groove on surface

推车要设置一个轴向的匀速前进速度,推着管坯向前运动,不断轧制成形。需要注意的是,推车最好使用弹簧力,因为三辊行星旋轧进行时,轧辊会给管坯一个向后的分力,弹簧力会使管坯向前的运动与辊子的旋转加工配合的效果更好,避免管坯表面出现鼓包,导致成形效果不好。在管坯完全咬入辊缝的过程中,管坯受力不均匀,在与芯棒接触时会使其左右晃动,可能会使计算结果出错,所以,设计圆柱形的芯棒处于三维静止的状态^[41],便于计算与管坯成形。

根据管坯的轧入变形过程,轧辊可分为减径段、集中变形段、精整段和归圆段,如图 5 所示^[2]。在有限元模拟过程中,为了方便计算,只考虑轧辊的自转,自转速度与管坯向前的运动速度相配合,避免管坯由于内部流动性问题而产生堆叠,导致模拟不能正常计算。

3.2 边界条件

微元体获得的热能分为外界通过界面传给微元体的热量和微元体内部产生的热量^[2]。三辊行星旋轧铜管材属于大塑性变形过程,大变形和剧烈摩擦使热能显著增多,温度迅速升高。热边界条件的设置对模拟结果有很大的影响,尤其是轧制温度场。

物体间的传热方式分为热传导、热对流和热辐

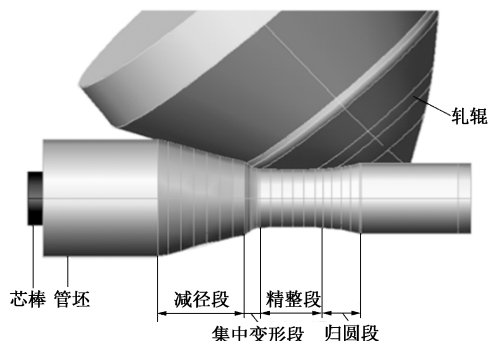


图 5 轧辊和轧件相交情况

Fig. 5 Intersection of roll and rolled piece

射 3 类, 旋轧模拟时设置换热边界条件主要考虑管坯与轧辊及芯棒接触的热传导, 管坯与冷却介质之间的热对流, 以及与周围环境的辐射传热。

管坯与轧辊及芯棒之间主要通过热传导的方式来传递热量, 热传导的基本表达式为^[34-35]:

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1)$$

式中: q 为热流密度, $(W \cdot m^{-2})$; k 为热传导系数, $(W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1})$; T 为管坯温度, $^\circ C$; n 为轧辊、芯棒与管坯接触面法线方向上的长度; $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为温度梯度, $(^\circ C \cdot m^{-1})$ 。

轧件与冷却介质之间主要为对流传热, 热对流的基本公式均可采用牛顿冷却公式^[34-35]。

$$q = h \cdot \Delta T \quad (2)$$

式中: h 为表面对流换热系数, $(W \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1})$; ΔT 为温差, $^\circ C$ 。

在轧制过程中, 高温轧件会与周围环境进行辐射传热, 不同温度下的辐射传热系数可以通过式 (3) 计算^[34-35]。

$$h_r = \frac{\varepsilon c_b [(T_r/100)^4 - (T_s/100)^4]}{T_r - T_s} \quad (3)$$

式中: h_r 为辐射传热系数, $(W \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1})$; ε 为表面发射率; c_b 为黑体辐射系数; T_r 为表面绝对温度, $^\circ C$; T_s 为环境绝对温度, $^\circ C$ 。

在旋轧过程中, 热辐射相比热传导和热对流较弱, 一般将辐射换热系数和对流换热系数等效为一个换热系数, 以加快计算速率。

初始问题研究的是在初始时刻整个空间的温度分布情况, 如果要研究空间的某个区域的导热过程, 就需要考虑该区域边界上的约束状态, 即所谓的边界条件^[2], 即物体边界上的换热条件。物体边界上

的换热条件一般可分为 3 类, 即给出物体边界上各点的温度值、给定物体表面上的热通量和给定表面上的热损失^[2]。由于管坯在进入轧制前温度为车间温度, 所以, 初始条件可以用式 (4) 表示^[34-35]。

$$T|_{t=t_0} = T_0 \quad (4)$$

式中: T_0 为管坯初始温度 (即车间温度), $^\circ C$; t 为轧制时间, s ; t_0 为初始轧制时间, s 。

所以, 旋轧铜管坯时的换热条件主要包括管坯与轧辊及芯棒之间的热传导, 管坯与冷却介质之间的热对流, 高温管坯与周围环境之间存在的热辐射, 还有管坯由于大塑性变形和剧烈摩擦而产生的热量。

三辊行星旋轧过程中, 摩擦是影响管坯成形质量的一个关键性因素。三辊行星旋轧过程中, 摩擦力会在接触的表面上发生粘着与滑动的交替变化, 因此, 三辊行星旋轧有限元模拟中, 可以选择反正切函数修正的剪切摩擦模型平滑突变^[2]。轧辊减径段具有沟槽是为了增加咬入摩擦力, 所以, 采用表面光滑的轧辊进行模拟时, 减径段需赋予较大的摩擦因数; 集中变形段有较大的减壁量会使晶粒破碎和发生再结晶, 所以采用稍小些的摩擦因数; 精整段和归圆段, 为了满足高精度要求, 保证管材的外表面质量, 轧辊表面采用更小一些的摩擦因数。

接触条件会直接影响模拟计算结果的准确性。在 MSC. Marc 模拟软件中, 采用直接约束接触法则, 在成形过程中追踪节点的运动^[2]。在 Simufact Forming 有限元模拟软件中可以采用接触表格的方式, 定义接触边界条件^[53]。

在旋轧模型建立的过程中, 运动边界条件也需要合理的设置。推车与管坯之间的摩擦因数设置得很小, 以保证管坯的顺利向前运动和旋转变形。轧辊的自转速度和推车的向前运动速度要相配合, 具体根据实际生产情况分析。由于在有限元分析过程中忽略了轧辊的公转, 此时得到的轧件转速是实际轧件转速与轧辊的公转速度的叠加。

综上所述, 进行三辊行星旋轧有限元模拟时需关注的重点问题包括由于大变形量产生的管坯网格畸变问题及边界条件的设置问题, 包括热边界条件、摩擦边界条件、接触边界条件及运动边界条件, 尤其是热边界条件的设置。通过以上调研分析及试验研究, 确定旋轧模拟参数。目前, 三辊行星旋轧工艺的模拟研究主要集中在宏观和微观模拟, 包括轧辊结构、温度场、应力场、变形规律等方面, 但是对于冷却水、轧制速度及轧件组织性能等方面综合影响的模拟还需要进一步深入研究。

4 结语

三辊行星旋轧技术对于铜管材的生产应用已逐渐广泛,科研院所、高校及企业对其展开了广泛研究。文献调研结果表明,国内外学者对轧制过程中的轧辊结构、温度场、应力场、变形规律、轧辊轧件接触区域及摩擦等的研究均已经较为完善,而对微观组织演变及其影响因素的研究相比宏观较少,对轧辊轧件冷却装置的研究也较少。所以,对铜管三辊行星旋轧工艺的微观组织研究还需要不断地探索,而随着对组织演变研究的不断深入,对铜管材三辊行星旋轧微观组织均匀性及性能的要求越来越高,冷却装置的研究成为三辊行星旋轧铜管材的热点问题。通过增加冷却区域,研究精确的柔性控冷技术冷却轧辊轧件,利用有限元模拟与智能化柔性水冷控制系统,综合考虑水冷流场、轧辊冷却、管坯冷却、管坯变形、冷却控制等,实现控制轧制过程中的管坯组织,生产高性能的铜管件。三辊行星旋轧工艺在铜管材的生产中至关重要,通过对铜及铜合金管材的旋轧成形相关研究的总结和梳理,发现铜及铜合金三辊行星旋轧相关研究成果主要体现在如下几个方面:

(1) 对三辊行星旋轧技术的宏观研究主要包括对轧辊结构、温度场、应力场、变形规律、轧辊轧件接触区域及摩擦因数等的研究,这些方面的研究已经较为成熟,而对轧辊轧件的冷却装置的研究较少,有待不断探索;

(2) 对三辊行星旋轧技术的微观组织研究包括对轧制过程中铜管材的组织转变及其影响因素的研究,相对宏观研究较少,一些组织及性能的相关问题还有待进一步研究;

(3) 对铜管材三辊行星旋轧工艺进行模拟时需关注的重点问题包括由于大变形量产生的管坯网格畸变问题及边界条件的设置问题,尤其是热边界条件的设置。

参考文献:

- [1] 龚燃. 白铜合金管铸轧法生产工艺的探讨 [J]. 有色金属加工, 2016, 45 (5): 53-56.
Gong R. Discussion of production process of copper nickel tubes by casting-rolling [J]. Nonferrous Metals Processing, 2016, 45 (5): 53-56.
- [2] 李冰. 铜管坯三辊行星轧制塑性变形机理与组织预测 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2007.
Li B. Plastic Deformation Mechanism and Microstructure Predic-

tion of Copper Tube Billet in Three-roll Planetary Rolling [D]. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 2007.

- [3] 李冰, 杨志, 刘化民, 等. 三辊行星轧制运动和管坯变形规律的仿真模拟 [J]. 塑性工程学报, 2005, 12 (5): 70-73.
Li B, Yang Z, Liu H M, et al. Computer simulation on the movement and deformation rules of three-roll planetary rolling process of copper tube [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12 (5): 70-73.
- [4] 李冰, 李章刚, 张士宏, 等. 铜合金管坯旋轧成形的三维热力耦合有限元模拟 [J]. 科学技术与工程, 2005, 5 (17): 1293-1296.
Li B, Li Z G, Zhang S H, et al. 3-D thermo-mechanical coupling FEM simulation in three-roll planetary rolling process of copper alloy tube [J]. Science Technology and Engineering, 2005, 5 (17): 1293-1296.
- [5] 李冰, 张光亮, 张士宏, 等. B10 合金管坯三辊行星轧制过程的数值模拟 [A]. 第九届全国塑性工程学术年会、第二届全球华人先进塑性加工技术研讨会论文集 [C]. 太原, 2005.
Li B, Zhang G L, Zhang S H, et al. Numerical simulation of three-roll planetary rolling process of B10 alloy tube billet [A]. Proceedings of the 9th National Academic Annual Conference on Plastic Engineering and the 2nd Global Chinese Advanced Plastic Processing Technology Seminar [C]. Taiyuan, 2005.
- [6] 李章刚, 李冰, 张士宏, 等. 基于有限元的三辊行星轧制力预测及分析 [J]. 材料科学与工艺, 2006, 14 (6): 561-564.
Li Z G, Li B, Zhang S H, et al. Rolling force prediction and analysis of three-roll planetary rolling process based on FEM [J]. Materials Science and Technology, 2006, 14 (6): 561-564.
- [7] Li B, Zhang S H, Zhang G L, et al. Prediction of 3-D temperature field of TP2 copper tubes in three-roll planetary rolling process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 205 (1-3): 370-375.
- [8] Li B, Zhang S H, Zhang G L, et al. Microstructure simulation of copper tube and its application in three roll planetary rolling [J]. Materials Science and Technology, 2007, 23 (6): 715-722.
- [9] 张士宏, 王炳德, 朱士光, 等. 一种新型三辊旋轧试验机的设计 [J]. 锻压装备与制造技术, 2007, (2): 40-42.
Zhang S H, Wang B D, Zhu S G, et al. Study on designing of a new type three-roll rotary experimental mill [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2007, (2): 40-42.
- [10] Li B, Zhang S H, Zhang H Q, et al. Microstructure and properties of copper tube during three-roll planetary rolling [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 17 (4): 499-505.
- [11] Dieter F, Hans-Ingolf A. Planetary rolling mill with reduced roll-wear [P]. America: DE4442361-C1, 1996-03-07.
- [12] Shih C K, Hung C H, Hsu R Q. The finite element analysis on planetary rolling process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113 (1-3): 115-123.
- [13] Shih C K, Hsu R Q, Hung C H. A study on seamless tube in the planetary rolling process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121 (2-3): 273-284.
- [14] Shih C K, Hung C H. Experimental and numerical analyses on three-roll planetary rolling process [J]. Journal of Materials Pro-

- cessing Technology, 2003, 142 (3): 702-709.
- [15] Wu S J, Hwang Y M, Chang M H. A three-dimensional finite element analysis of the three-roll planetary mill [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123 (3): 336-345.
- [16] Hwang Y M, Hu H L, Tang Y C. Experiments of three-roll planetary rolling [J]. Key Engineering Materials, 2004, 501: 274-276.
- [17] Sun B Y, Yuan S J. Average unit pressure formula for three-roll tube rolling [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2008, 15 (4): 38-41, 94.
- [18] 李立敏, 臧勇, 姚会忠, 等. 摩擦状况对铜管行星轧制过程的影响 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (1): 116-119.
Li L M, Zang Y, Yao H Z, et al. The effect of friction state on the planetary rolling process of copper tube [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16 (1): 116-119.
- [19] Li L M, Zang Y, Gao Z Y, et al. The effect of roller shape on the planetary rolling process of copper tube [A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics [C]. Beijing, 2009.
- [20] 曾庆龄. 行星轧制过程中的金属流动及其稳定性研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
Zeng Q L. Study on the Metal Flow and Stability of the Planetary Rolling Process [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
- [21] 付亚波, 卢一平, 陈平, 等. 白铜管行星轧制及拉拔过程塑性变形研究 [J]. 大连理工大学学报, 2011, 51 (1): 47-50.
Fu Y B, Lu Y P, Chen P, et al. Research on plastic deformation of planetary rolling and drawing process on copper nickel tubes [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51 (1): 47-50.
- [22] 吴朋越, 王永如, 谢水生, 等. 紫铜管三辊行星轧制过程有限元分析 [J]. 有色金属, 2011, 63 (2): 72-75.
Wu P Y, Wang Y R, Xie S S, et al. Finite element analysis for pure copper tube 3-roll planetary rolling process [J]. Nonferrous Metals, 2011, 63 (2): 72-75.
- [23] 吴朋越, 王永如, 谢水生, 等. HAl77-2 铝黄铜管三辊行星轧制工艺模拟 [J]. 有色金属, 2011, 63 (2): 76-80.
Wu P Y, Wang Y R, Xie S S, et al. Copper tube 3-roll planetary rolling process simulation with finite element [J]. Nonferrous Metals, 2011, 63 (2): 76-80.
- [24] Bagherian E R, Chang F Y, Cooper M, et al. Analysis and quantification of mechanical properties of various DHP copper tubes manufacturing processes using drift expanding test [A]. Proceedings of the 25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials [C]. Brno, 2016.
- [25] Pu Y. Planetary rolling production of nickel-based high temperature alloy pipe by checking planetary rolling die roller and core rod surface quality, starting auxiliary system and hydraulic pump, rotating main machine, rolling and preheating [P]. China: CN105964693-A, 2016-09-28.
- [26] 戴小标, 刘志辉, 徐勇. 基于 Matlab 的 PSW 轧辊辊形设计 [J]. 邵阳学院学报: 自然科学版, 2016, 13 (3): 76-81.
Dai X B, Liu Z H, Xu Y. Roll-shape design of PSW based on Matlab [J]. Journal of Shaoyang University: Natural Science Edition, 2016, 13 (3): 76-81.
- [27] Wang L. Three-roller planetary rolling mill, has pressing roller arranged opposite to water pipe that is connected with nozzle, and electromagnetic valve arranged on water pipe, where controller is electrically connected with valve to control flow of water pipe [P]. China: CN108421834-A, 2019-09-03.
- [28] Akopyan T K, Belov N A, Aleshchenko A S, et al. Formation of the gradient microstructure of a new Al alloy based on the Al-Zn-Mg-Fe-Ni system processed by radial-shear rolling [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 746: 134-144.
- [29] 李华兵, 王颜臣, 李淑苹. 应用于行星轧机轧制铜及铜合金的高温合金芯棒及其制备方法 [P]. 中国: CN109402424-A, 2019-03-01.
Li H B, Wang Y C, Li S P. High-temperature alloy mandrel useful for rolling copper and copper alloys in planetary rolling mills, comprises chromium, molybdenum, aluminum, titanium, niobium-thallium, silicon, manganese, phosphorus, sulfur, iron and nickel [P]. China: CN109402424-A, 2019-03-01.
- [30] 林锡彬. 一种三辊行星轧机的轧辊及三辊行星轧机 [P]. 中国: CN208853452-U, 2019-05-14.
Lin X B. Roller of three-roller planetary rolling mill, has second angle which is formed between conical contour of second area and central axis of tapered roller main portion, and first angle is greater than second angle [P]. China: CN208853452-U, 2019-05-14.
- [31] 胡盛德, 杜张环, 余昊, 等. 三辊行星轧制含铌奥氏体不锈钢棒材的工艺参数优化 [J]. 武汉科技大学学报, 2011, 63 (2): 76-80.
Hu S D, Du Z H, Yu H, et al. Optimization of process parameters for three-roll planetary rolling of Bi-containing austenitic stainless steel bar [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2011, 63 (2): 76-80.
- [32] Li L X, Li J Y, Ye B. Internal damage mechanism and deformation process window of a free-cutting stainless steel bar rolled by three-roll planetary mill [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 31 (2): 1187-1194.
- [33] 孙进宅. 一种铜管加工用三辊行星轧机 [P]. 中国: CN215696785-U, 2022-02-01.
Sun J Z. Three-roller planetary rolling mill for processing copper pipe, has mounting seat whose inner part through groove is provided with alloy ball contact to bottom surface of connecting plate close to top part of mounting seat [P]. China: CN215696785-U, 2022-02-01.
- [34] 张晓波. 铜管三辊行星轧后冷却过程温度场数值模拟与试验研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
Zhang X B. Numerical Simulation and Experimental Study of Temperature Field During Cooling Process of Copper Pipe After Three-roll Planetary Rolling [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [35] 杨蕾. 铜管三辊行星轧后冷却过程应力场分析及冷却水套改造 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
Yang L. Analysis of Stress Field During Cooling Process of Copper Tube After Three-roller Planetary Rolling and Modification of Cooling Water Jacket [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.

- [36] 刘劲松, 王芳, 李艳娟. TP2 铜管坯行星旋轧组织演变规律的研究 [J]. 沈阳理工大学学报, 2008, 27 (5): 61-64.
Liu J S, Wang F, Li Y J. Research on microstructure evolutions of TP2 planetary rolling of copper tubes blank [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2008, 27 (5): 61-64.
- [37] Bagherian E R, Bell C, Cooper M, et al. Analysis and quantification of grain size of various DHP copper tubes manufacturing processes [J]. Advanced Materials Research, 2014, 856: 241-245.
- [38] 刘一. 三辊行星轧制变形区理论解析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
Liu Y. Theoretical Analysis on Deformation Zone of the PSW Rolling [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016.
- [39] 熊炜. 基于行星轧制双金属管变形组织演变及加工窗口的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
Xiong W. Research on Microstructure Evolution and Process Window of Bimetal Tube Via Three-roll Planetary Milling Process [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017.
- [40] 周玉伟. 纯铜三辊行星轧制中变形升温热加工研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
Zhou Y W. Investigation of Hot Processing with Temperature-rise by Rolling Deformation in Pure Copper During Three-roll Planetary Rolling [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2018.
- [41] 谢红, 李应强, 贾赦. 三辊行星轧机铜管轧制的有限元模型研究 [A]. 冶金轧制过程自动化技术交流会论文集 [C]. 成都, 2005.
Xie H, Li Y Q, Jia S. Finite element model of copper tube rolling in three-high planetary rolling mill [A]. Proceedings of Metallurgical Rolling Process Automation Technology Exchange Meeting [C]. Chengdu, 2005.
- [42] 陶炳旺. 三辊行星轧管机的特点及轧制功率的计算 [J]. 有色金属加工, 2003, 32 (5): 28-33.
Tao B W. Features and rolling power calculation of three-high planetary tube rolling mill [J]. Nonferrous Metals Processing, 2003, 32 (5): 28-33.
- [43] Yin Z W. Three-roll planetary rolling mill motion analysis and test research [J]. Advanced Materials Research, 2013, 712-715; 1724-1728.
- [44] 郭庆荣, 沈家刚. 三辊行星轧机的结构原理及轧制运动分析 [J]. 电线电缆, 1993, (3): 45-48.
Guo Q R, Shen J G. Structure principle and rolling motion analysis of three-roll planetary rolling mill [J]. Wire & Cable, 1993, (3): 45-48.
- [45] 董顺德, 王世中, 段广超. 行星轧机的运动形式和轧管组织变化 [J]. 锻压装备与制造技术, 2004, (4): 30-32.
Dong S D, Wang S Z, Duan G C. Motion form of planetary rolling & pipe microstructure variety [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2004, (4): 30-32.
- [46] 刘劲松, 蔚敬泽, 岳峰丽, 等. 三辊行星轧制工艺参数优化技术研究 [J]. 中国工程机械学报, 2008, 6 (3): 340-343.
Liu J S, Wei J Z, Yue F L, et al. Specification optimization for three-roller planetary rolling [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2008, 6 (3): 340-343.
- [47] 董莹. 三辊行星轧机轧辊的热力耦合分析研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
Dong Y. Research on Thermal Mechanics Coupled Analysis of Rollers of Three-roll Planetary Rolling Process [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [48] Han Y, Zhang X B, Wang Z X, et al. Study on cooling process of copper tube after three-roll planetary rolling [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 110: 104393.
- [49] 胡贤富, 刘昆, 杜文远. 铜加工过程轧辊冷却与质量控制 [J]. 世界有色金属, 2018, (20): 4-6.
Hu X F, Liu K, Du W Y. Roll cooling and quality control in copper processing [J]. World Nonferrous Metals, 2018, (20): 4-6.
- [50] 刘长荣. 三辊行星轧机轧制温变区冷却设计及应用 [J]. 铜业工程, 2019, (6): 48-50.
Liu C R. Cooling design and application of three-roll planet rolling temperature change regional [J]. Copper Engineering, 2019, (6): 48-50.
- [51] Yang Z J, Pan X N, Tang W F, et al. Thermo-mechanical coupling analysis of roll mandrel [J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2019, 493: 012106.
- [52] 秦备荒. 铜管三辊行星轧制过程轧辊轴力学行为研究 [J]. 中国设备工程, 2019, (5): 181-182.
Qin B H. Study on mechanical behavior of roll-shaft during three-roll planetary rolling process of copper tube [J]. China Plant Engineering, 2019, (5): 181-182.
- [53] 李旺. 精密铜材铸轧过程缺陷监控技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.
Li W. Study on Defect Monitoring Technology of Precision Copper Casting and Rolling Process [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2023.
- [54] 刘东华, 苏玉长, 邓楚平, 等. 三辊行星轧制过程中 ACR 紫铜管的组织和性能演变 [J]. 中国有色金属学报, 2006, 16 (5): 881-886.
Liu D H, Su Y C, Deng C P, et al. Microstructure and properties of ACR copper tube during three-roll planetary milling process [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16 (5): 881-886.
- [55] 邓楚平, 黄伯云, 苏玉长, 等. 对 ACR 铜管生产中 PSW 轧制技术的研究 [J]. 湖南冶金, 2006, 34 (5): 3-6.
Deng C P, Huang B Y, Su Y C, et al. Study on the PSW cast-roll process in the production of the ACR copper tubes [J]. Hunan Metallurgy, 2006, 34 (5): 3-6.
- [56] Zhou Y W, Mao Z N, Liu Y, et al. Microstructure evolution of copper by three roll planetary milling [J]. Solid State Phenomena, 2018, 279: 44-48.
- [57] 梁琦明, 田原晨. 铜管生产过程中的组织演变与质量控制 [A]. 2018 年中国铜加工产业年度大会暨中国铜产业黄石高峰论坛论文集 [C]. 黄石, 2018.
Liang Q M, Tian Y C. Organization evolution and quality control in copper pipe production process [A]. Proceedings of Annual Conference of China Copper Processing Industry & Huangshi Summit Forum of China Copper Industry in 2018 [C]. Huangshi, 2018.