● 工艺技术 Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.03.007

连铸铜杆小尺寸铸轮工艺改进及关键控制技术研究

陈享珊[1],张伟旗[2]
(江西铜业集团 铜材有限公司,江西 贵溪 335424)

摘　要:分析了SCR铜杆生产线铸轮的使用工况和主要技术要求,研究了小尺寸铸轮运行中存在的缺陷,提出了相应的工艺改进及控制关键技术。结果表明,解决了制约铜杆生产的技术"瓶颈",以及同类型生产线连铸过程中的"核心技术"问题。可实现铜杆生产线的安全、连续、稳定和高产。铜杆品质好,小尺寸铸轮使用寿命长,损耗量小,生产成本低。

关键词:小尺寸铸轮;工艺改进;控制关键技术;铜杆品质
中图分类号:TG335.6; TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)03-0188-05

Research on Process Improvement and Key Control Technology of Small Size Cast Wheel in Continuous Cast Copper Bar

CHEN Xiangshan[1], ZHANG Weiqi[2]
(Copper Co., Ltd., of Jiangxi Copper Corporation, Guixi 335424, China)

Abstract: Analyzed the SCR copper rod production line working condition limit of size casting wheel and the main technical requirements, it studied the casting wheel defects existing in the operation of small sizes, it put forward the corresponding key technology of process improvement and control, it successfully solved the poor quality of copper rod become the "bottleneck" restricting production technology and the same type "core" problem in the process of continuous casting production line. it can realize the production line of safe, continuous, stable and high yield, the quality of copper rod is good, the service life of small sizes of casting wheel is long, the wastage amount is small, and the production cost is low.

Key words: small size of casting wheel; process improvement; the key technology of control; the quality of copper rod

SCR连铸连轧生产线因作业率高、操作简便、上手快,目前已广泛应用于国内外铜铝杆加工行业。五轮钢带式铸造机是整条生产线的核心[1]。铜杆连铸工艺的核心就是控制铸造的温度、速度和冷却强度,为下道工序提供无裂纹、塑性强的铜铸坯,打造品质优良的铜杆。铸轮是该生产线的"心脏"部件,也是易损件和大宗耗材。其传热、喷涂、冷却、摩擦及车削等复杂行为,与其表面裂纹、铜铸坯缺陷及漏铜的发生密切相关。江铜铜材公司分别于2003、2006年从美国SOUTHWIRE公司引进了SCR3000和SCR 4500两条铜杆连铸连轧生产线,尽管其生产工艺成熟,技术装备水平国际领先,但因美方垄断了SCR生产线核心技术,对铸轮长期实施技术封锁,其进口周期长、备件昂贵、铸轮损耗较大,常常供不应求[2]。因而,针对铸轮特别是小尺寸铸轮工艺改进及控制关键技术的研究意义十分重大。

以SCR4500铜杆生产线为例。小尺寸铸轮是指车修后直径为ϕ2 410～2 400 mm、底部厚度为23.9～19.0 mm者。报废铸轮是指车修后直径为ϕ2 400 mm以下、底部厚度为19 mm以下者。投产初期,由于该公司使用小尺寸铸轮经验不足,运行过程中易产生铸轮结垢、底部或侧面开裂、金相不良和晶粒度偏大、轴向或径向跳动偏大、红黑锭等缺陷,成为生产技术的"瓶颈"。小尺寸铸轮的正常运行、维修和调整,对生产顺行和铜杆品质极为重要,既影响SCR铜杆生产线的安全、连续、稳定和经济运行,又极大地影响其使用寿命和损耗。当前,国内铜杆行业产能扩张过快、利用率低,同质化竞争日趋激烈,且国内外铜杆加工企业和研究机构皆专注于常规尺寸铸轮生产工艺优化及控制方面的研究,却无小尺寸铸轮生产工艺改进及控制关键技术方

收稿日期:2021-01-12
作者简介:陈享珊(1974—),江西南康人,助理工程师.主要从事铜加工、金属材料成型及自动化控制等方面的工作.
电话:13870192259,Email:583870551@qq.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

面研究的先例。因而有必要开展针对性的创新性研究。

1　铸轮使用工况分析及主要技术要求

1.1　工况分析

五轮钢带式浇注机作业图，见图1。根据铸轮工作原理，其作业条件恶劣且复杂，浇注温度约1 120℃，需经历高温、水冷、周期性的热疲劳应力等工况，主要承受急冷急热和复杂多变的动静载荷的影响。

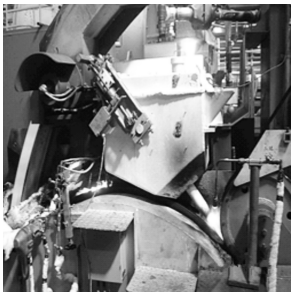

图1　五轮钢带式浇注机作业图

Fig.1　Operation diagram of wheel-belt type casting machine

连铸中间包内的铜液通过出铜口处的SPOUT流入由“U”型铜环凹槽与钢带所密合包裹的浇铸池内，经铸机分段冷却水冷却，凝固结晶成固态铜铸坯，最终在铸轮9点钟处脱模分离。结晶成形的铜铸坯表面温度较高，为满足后序加工要求，应严格管控铸坯温度，可调节铸机二次冷却水的流量大小，使铜铸坯达到所需的生产工艺温度。其生产工艺流程为：加料提升机→竖炉→上溜槽→渣箱→回转式保持炉→下溜槽→连铸中间包→五轮钢带式浇注机→旋转剪→预处理机→摩根粗精连轧机组。

铸轮由德国KME公司制作，采用CuCrZr高强高导合金材料；装配则采用铜环、护板整体式，可反复机加工多次，使用寿命高。SCR4500铸轮浇注速率为35 t/h，额定转速为1 237 r/min。尽管SCR铜杆生产线产能不同，其采用铸轮规格也不尽相同，但工作原理是相同的。连铸过程中，要想准确控制铸轮生产的连续稳定性既是难点，也是重点，对小尺寸铸轮更是如此。

1.2　主要技术要求

SCR4500铜杆生产线铸轮铜环各部位尺寸、表面粗糙度皆以美国南线图纸为准。其主要化学成分w(%)为：0.65±0.02 Cr，0.10±0.02 Zr，其他<0.10%，余量为Cu；抗压强度为263～400 N/mm^2；硬度为125 HB；导电率为85 IACS；热导率为350 W/(m·K)；车修后铜环表面必须无裂纹、变形；铜环沟槽底部厚度最小为19 mm，相当于铜环外缘至铁圈距离为35 mm。

SCR4500小尺寸铸轮的验收方式主要是依据美国南线图纸测量铜环的直径、底部厚度、槽宽等主要尺寸及目视表面状况。其验收技术标准为：铜环直径≥ϕ2 400 mm，底部厚度≥19 mm、槽宽为93.629 mm；表面粗糙度以目视样板比较判定，外观检视以无裂痕、孔、凹槽、变形等为合格；外圆跳动厂内检验以铸机跳动量0.5 mm为合格；端面跳动厂内检验百分表测定，两表差值≤0.5 mm为合格；夹板间支撑杆无歪斜、脱落现象；3个定位螺孔无松动现象。

2　小尺寸铸轮运行中存在的缺陷研究

2.1　结垢

该缺陷最常见。小尺寸铸轮结垢过程是极为复杂、动态综合的，因受到热量、动量、质量交换的共同作用，其呈现形态也不同。为保障连铸过程的连续、稳定、高产，延长铸模寿命，常采用烟灰喷涂模腔。铸造完成后，铜铸坯立即与铸轮、钢带相脱离，但铸轮、钢带上仍会残留部分烟灰，或铸轮压缩风带水，或铸机高压水系统水压低、清洗效果差，皆易导致小尺寸铸轮结垢。

小尺寸铸轮结垢危害极大。其附着力强且难以清除，会迅速恶化其工作条件和换热过程，危害热传导；会减小其工作表面有效面积，传热效果差，乙炔气浪费大。设备运行可靠性降低，铜液的冷却结晶受到影响，造成铜铸坯品质不良，严重危害铜杆品质，生产成本高，劳动强度大。铸轮压缩风带水，浇铸时会造成严重飞溅，水汽易混入熔池内，使铜铸坯夹杂多、气孔多，或造成冷却过程和铸坯金相组织的不稳定，导致铜杆品质波动大，投诉多，甚至导致停产[3]。

2.2　金相不良、晶粒度偏大

连铸过程中，因小尺寸铸轮外径尺寸减小，两侧夹角及护板处会产生冷铜剐蹭。若浇管切角不良，易导致浇铸时液穴过深，排气不畅，铜铸坯金相不良、晶粒度偏大（穿晶），后续加工过程中易在晶界处产生裂纹而引起断线。其影响主因是铸轮冷却强度不均匀，局部冷却强度过大等。

2.3　底部、侧面开裂

常规铸轮使用至小尺寸铸轮后，易产生铸轮底部裂纹和侧面裂纹，且呈现方式多种多样。一旦产生小尺寸铸轮裂纹并扩展，会使其返修量大幅增加，甚至导致其报废。小尺寸铸轮裂纹是在连铸过程中逐步产生的，铸轮裂纹处的烟垢易长核，还有水汽皆会严重影响铜铸坯的质量，乃至连轧过程中也无法消除。因而，连铸过程中，如何避免产生铸轮底部裂纹

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

和侧面裂纹是小尺寸铸轮工艺改进及优化的重点和难点。

2.3.1 底部裂纹

小尺寸铸轮底部横向开裂,见图 2。通常,小尺寸铸轮底部易呈横向开裂,其影响主因是:加工工艺缺陷,铸轮常采取离心式浇注法,铸轮工作表面易产生加工缺陷;出铜铸坯时,铜液温度过高,易引起铸轮底部过烧,出铜铸坯发生爆炸异常时,对铸轮底部的冲击大;撬铜铸坯时,铸轮底部易被钢钎刮伤,伤口处易发生应力集中而产生开裂;铸轮温度过高或温差过大,会导致铸轮底部局部过烧而开裂;烟灰喷头堵塞时,会造成喷涂不良,烟灰有“发白”现象,铸轮导热不均,进而产生底部开裂;浇管对中不良时,铜液流量不稳定,铜液对铸轮表面产生一定的冲击,导致铸轮底部开裂。

图 2 小尺寸铸轮底部横向开裂
Fig.2 Transverse crack at the bottom of the small size of casting wheel

2.3.2 侧面开裂

以铸轮操作侧最常见。小尺寸铸轮侧面开裂,见图 3。小尺寸铸轮护板变形、螺杆松动时,会导致其强度不足,易产生应力裂纹;烟灰喷涂左右不均或不足,长时间运行会产生铸轮热裂纹;浇管对中不良,铸机 W1 段水流量过大,会造成其局部冷却不均,因其侧面较薄弱,易导致其侧面开裂。若在线打磨不当,易造成黑红坯、坯裂等情况,严重时将导致断坯、倒坯甚至停铸,会严重影响生产的安全顺行[4]。手持千叶轮站在操作侧在线打磨烟垢困难,而在外侧打磨过量或不均匀,则易导致铸轮开裂。

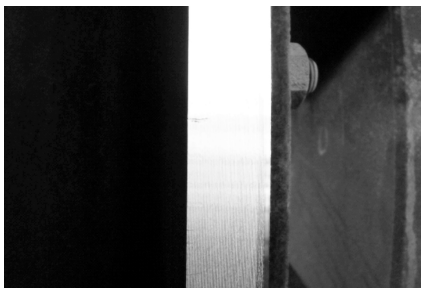

图 3 小尺寸铸轮侧面开裂
Fig.3 Crack at the side surface of the smaller size of casting wheel

2.4 轴向跳动偏大

铸机基座不平及定位支承变形,易导致小尺寸铸轮轴向跳动偏大,引起其单面歪斜,变形尺寸较大,必须及时下机检修。先检测其护板水平,再打表检测其轴向跳动值,若高于 2.5 mm,说明其轴向跳动偏大:①中心线跳动,冷却水呈扇面喷射,铜铸坯结晶发生偏移,铜铸坯中心线产生歪斜;②烟灰喷涂左右厚薄不均,铜铸坯左右冷却强度偏差过大,严重时铜杆易扭转开裂,难发现处理;③小尺寸铸轮与钢带左右偏移,导致钢带受损弯曲,严重时发生侧漏,易产生铜铸坯角裂及孔洞;④小尺寸铸轮在热交换过程中,易产生应力变形和相对扭曲。若紧固件缺损或松动,易引起漏铜,渗入铜环与护板,均会使铸轮使用至极限后冷却强度不均,且差异是逐步增大的。小尺寸铸轮浇注时侧漏,见图 4。

图 4 小尺寸铸轮浇注时侧漏
Fig.4 Side leakage of the smaller size casting wheel

2.5 径向跳动偏大

检测小尺寸铸轮径向跳动值,若高于 2.0 mm,则表明小尺寸铸轮径向跳动偏大。这将导致二大问题:①烟灰底部喷涂厚薄不均,小尺寸铸轮温差较大,铜铸坯易产生黑红耙,严重时易发生疏松、缩孔现象;②在小尺寸铸轮端面侧,易形成棱边,引起铜铸坯脱模不良、扭矩波动,导致磨锭、入轧后速度波动打滑等问题。

2.6 红黑锭

连铸过程中,小尺寸铸轮使用不规范时,极易产生红黑锭,造成后续铜杆扭转不良。红黑锭,见图 5。

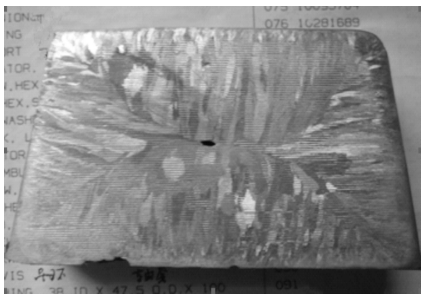

图 5 红黑锭
Fig.5 Discontinuous black and red ingot

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

据分析，其影响主因是其尺寸公差较大，冷却不均匀。小尺寸铸轮在急冷急热的恶劣作业环境下，因热胀冷缩产生扭曲变形、平面度歪斜等，打磨铸轮、下机车修过程中易产生公差，造成铸轮尺寸公差较大，出铜铸坯时黑红锭现象就已表现出来，铜铸坯呈现出一节黑、一节红。由于冷却强度的不均匀性，导致铸轮温度偏差大，100 ℃以上高温区烟灰喷涂粘附性差。铸坯将出现中心缩孔而黑锭。铸轮低温区，烟灰喷涂较好，铸坯结晶相对稳定，发生黑红锭则是将铸轮温差下降至最低所致。

3　小尺寸铸轮工艺改进及控制关键技术

3.1　小尺寸铸轮结垢工艺改进

可根据小规格、大规格和大间隙、大规格和小间隙阴极铜板等原料不同，创新竖炉加料方式和火力控制技术。新增 1 个大喷嘴替代原设计的 3 个小喷嘴，采用纯乙炔整体喷涂，或在铸机后段、高压水的上侧设计新增一块带“U”型槽的冷却水挡板，熔池飞溅少，皆可确保喷涂更均匀。新增铸轮高压水防护罩；在铸轮铜环外新增 1 个单喷嘴冷却、除垢，替代原设计铸轮铜环内 6 个喷嘴；改进原供水管路，引入新补充水；拆除 4 个侧喷喷嘴，将两个底部喷嘴合二为一且下移少许，高压水冲洗效果好，除垢彻底。将 6 台喷油双螺杆式空压机组冷凝水排放管道从排水阀端向下倾斜，并新增干燥器安装于高压包入口。发明一种铸轮吹干装置，采用“U”型辅助压缩风管，使其与原压缩风管吹扫出的压缩风同向且形成互补，可吹干铸轮工作面“死角”的水汽。采用勿需停机的在线打磨结垢铸轮新技术等。

3.2　小尺寸铸轮温度控制工艺改进

小尺寸铸轮使用初期，因其导热性能较好，表面温差大，铸轮易结垢且不均匀，铸轮温差值大；小尺寸铸轮使用后期，由于其底部偏薄、导热性相对增强、烟垢逐渐累积变厚，铸轮温度偏低难以提升。

出铜铸坯时，铜液温度控制稳定，要防止铜液温度偏高现象；出铜铸坯后，若铜铸坯、小尺寸铸轮温度波动较大，应立刻调整后段水流量，要及时打开 WSO、WSM，以降低铸轮温度，减小温度差。出铜铸坯 15 分钟后或进入过线生产前，应打开高压水，控制水压为 3.92 MPa；需注意调整铸轮两侧的冷却水，以提升小尺寸铸轮温度。小尺寸铸轮温度差值大，铜铸坯温度差值高。若仍未果，可尝试增加铸轮侧烟灰流量，必要时使用两根 SOOTER 喷枪同时喷涂，可使其温度稳定在 90～100 ℃，1# 旋转剪处铸坯温度的波动应控制在 30 ℃以内。

连铸过程中，当小尺寸铸轮温度差偏小时，应逐步提升铸机高压水的压力，并采用冲刷角度位置较低，以加强清理底部烟垢，主要控制 SS、WSO、WSM 的水流量来调整工艺温度。为了防止小尺寸铸轮产生裂纹缺陷，需降低生产速率。铸轮尺寸越小，恶化的速率越高，应及时监控小尺寸铸轮的生产工艺，调整时要准确而快速。

正常生产时，若小尺寸铸轮温度波动较大，且调整铸机水流量、铸机扭矩无效时，可适当调整烟灰流量、铸机高压水压力，并要将调整后工艺值记录在异常记录本内。当上述管理值、铸轮温度及入轧温度不在规定的管控范围内，必须严格执行判级标准，并及时反馈至生产班组，需及时进行调整；恢复正常后，要反复尝试恢复至原始工艺值，烟灰流量单根喷涂 60～65 SCFM，尽量将高压水压力值调整至低氧铜杆生产工艺规程上限，以延缓铸轮结垢。停机时，必须采用铸轮槽型样规核对，防止小尺寸铸轮工作面形成尺寸偏差、铸机冷却系统工艺参数波动，消除影响铜铸坯品质的隐患。

3.3　铜铸坯内部缺陷控制工艺改进

小尺寸铸轮使用过程中，出铜铸坯后若产生红黑锭，可使用两把 SOOTER 枪，直至铜铸坯温度稳定后关闭；若出现铜铸坯底部有洞、铜杆扭转不良等质量异常波动时，可调节乙炔流量、高度、角度及高压水压力等；若铜杆品质发生波动，或经调整无明显效果时，可使用两把铸轮 SOOTER 枪喷涂，再使用跟踪 3～5 h，并做好跟踪记录。

3.4　小尺寸铸轮车修控制关键技术

小尺寸铸轮产生底部裂纹、两侧裂纹或凹槽大面积不平时，均可送修。在保证车除裂纹、表面疲劳层的前提下，小尺寸铸轮的车修量应越小越好，每次车修量在半径方向通常不得超过 3 mm，若每次车修量达到 3 mm 仍无法车除裂纹时，须征得相关技术人员检查认可，方可再车修。需注意，小尺寸铸轮连续车修会形成累积公差，造成其冷却不均、温度差值和扭矩波动值大等。SCR4500 生产线现有 3 个小尺寸铸轮在线循环使用。据统计，小尺寸铸轮每少车修一次，将增加 5 000～8 000 t 合格铜杆产品，每个小尺寸铸轮可增产 2～4 万 t。

小尺寸铸轮底部尺寸的控制是重点，能成功使用至报废尺寸的铸轮产能高。车修小尺寸铸轮时，应谨慎小心，需研磨纵向龟裂，特别是内壁过渡圆角热应力集中的裂纹；需车削加工、整形及喷砂除垢和处理严重龟裂的轮面；应连同铸轮底夹板一起校

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

正轴孔中心,严格控制其同心度、圆度、跳动及两个外圆面的允许误差，避免影响钢带的运行;需校核小尺寸铸轮的线速度，满足铸机与轧机速度的匹配、同步及调整,铜铸坯张力合理,不拉断铸坯或不拉裂铸坯底部,延长小尺寸铸轮工作周期,降低单耗成本。

3.5 小尺寸铸轮上下机控制关键技术

小尺寸铸轮下机维护主要包括消除铸轮内应力和裂纹,检测维护铸轮和护板,清理干净铜环与护板接触面堆积的冷铜,紧固处理护板、螺母等。小尺寸铸轮上机运转一个使用周期即 15 天后，必须下机检修和维护,喷砂处理其铜环工作表面。对小尺寸铸轮而言，不能仅喷砂处理其铜环工作面,而应全喷砂处理整个工作表面,以彻底清除污垢。喷砂处理也是消除其内应力的一种常用方式,但要注意铸轮喷砂后,需喷涂渗透剂、显影剂检测裂纹。

拉线检测小尺寸铸轮护板,其凹面不得大于 2 mm,否则需校正护板。应重新预紧护板的主板,受热胀冷缩的严重影响，螺杆或碟簧在连铸过程中易拉长、松动,要打表确认其跳动值是否在规定范围内。

小尺寸铸轮应静置摆放 45 天以上，以完全消除内应力。小尺寸铸轮出铜铸坯失败,会产生局部烧伤或异常事故,呈现局部发蓝现象,应将其精车后放置至少 60 天。其静置摆放时,应采取单独水平静置方式,不得叠压、歪斜或主板向下,谨防其因局部受力而产生微变形。小尺寸铸轮静置支架,如图 6 所示。应至少确保三个及以上支承。吊装小尺寸铸轮时,必须防止发生冲撞、磕碰、斜吊、拖拽等异常状况，否则要待重新检测合格后，方可进行静置处理。

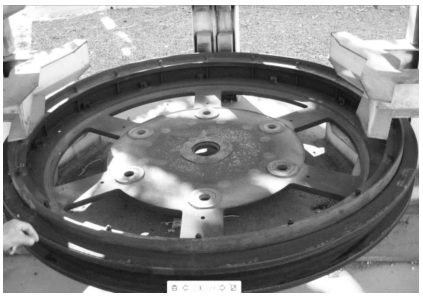

图 6 小尺寸铸轮静置支架
Fig.6 Static supporting of casting wheel

3.6 小尺寸铸轮技术管理创新

目前,国内 SCR 铜杆生产线铸轮使用寿命差别很大。排除跳电停水、铸轮运行卡滞、过烧、车修等异常使用状况,在饱和性生产状态下,常规铸轮单位产能为 3～9 万 t。使用小尺寸铸轮生产的铜杆品质良好,约 50%能确保其径向跳动约 1.5 mm,完全可使用至底部厚度为 19 mm 以下报废。可针对小尺寸铸轮技术管理创新如下：

(1)创建小尺寸铸轮技术管理办法　参考美国南线公司铸轮运行的技术要求,结合生产实际,运用过程分析方法，将 PDCA 循环管理理念即策划、实施、检查、改进引入小尺寸铸轮全过程的技术管理,可极大地提高小尺寸铸轮利用率,进一步降低铸轮损耗。

(2)创建小尺寸铸轮技术管理责任制度　小尺寸铸轮属大宗耗材,必须实施精细化管理,细化分解考核指标,落实责任到人,定期考核各工段、班组的实际损耗状况。

(3)优化改进小尺寸铸轮关键工艺技术参数 应根据小尺寸铸轮使用现状和生产实际，每次小尺寸铸轮上、下机,均应检测、校对其工作状态是否在管控范围内，否则必须重新调校；针对每个小尺寸铸轮,应创建专有设备台账和设备档案,并进一步优化改进小尺寸铸轮的温度、铜铸坯温度、铸机高压水压力、烟灰喷涂流量和压力、车修次数及车削量等关键工艺控制值,合理制订《SCR 铜杆生产线小尺寸铸轮生产工艺规程》,以大幅降低小尺寸铸轮损耗。

4 结语

生产实践表明,该公司针对 SCR 铜杆生产线小尺寸铸轮工艺改进及控制关键技术研究是成功的。目前，国内外铜加工厂家 SCR3000、SCR4500 生产线铸轮车修后分别使用至 ϕ2 397.00 mm×23.28 mm(底部厚度)、ϕ2 406.00 mm×23.90 mm 时，即可报废。该公司加强工艺改进及控制后，需分别使用至 ϕ2 393 mm×19 mm、ϕ2 400 mm×19 mm,平均单位产能可分别达到 3～5 万 t、5～6 万 t,能弥补和克服原美国南线设计的不足，大幅提升小尺寸铸轮单位产能,其抗热疲劳性良好,运行过程中缺陷少,损耗量低,使用周期长,成本能耗水平高,社会经济效益十分显著。该项目填补了国内外铜加工行业小尺寸铸轮研究的技术空白,推广应用价值高。

参考文献：

[1] 杨红军,刘钊,张灵军. SCR 连铸连轧生产线铸机水处理技术研究[J]. 世界有色金属,2020(5):4-5.
[2] 张伟旗. SCR 铜杆生产线铸轮损伤机理分析及关键技术研究[J]. 铸造技术,2015,36(10):2479-2483.
[3] 张伟旗. SCR 铜杆生产线铸轮结垢机理分析及关键技术研究[J]. 铸造技术,2015,36(9):2367-2471.
[4] 张伟旗. SCR 生产线铸轮装备改进与机械故障的控制 [J]. 特种铸造及有色合金,2012,32(3):274-276.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net