DOI: 10.3969/j.issn.1000-6826.2024.05.2402

攻克连铸机“心脏”磨损难题：小方坯结晶器下口长寿化技术实践

Tackling Wear in the “Heart” of Continuous Casting: Technology and Practice for Extending the Life of Billet Mold Bottom

供稿|谭杜 / TAN Du

内容导读

结晶器被誉为连铸机的“心脏”，其状态直接影响铸坯质量和生产成本。在实际高效连铸生产中，结晶器铜管下口常出现严重磨损，导致其使用寿命短、更换频繁、成本居高不下。本文基于阳春新钢铁小方坯连铸机的生产实践，系统分析了铜管下口磨损的主要原因，并从设备结构、工艺控制、操作规范等多个维度提出了一系列改进措施。通过优化足辊布置、调整开口度、增强支架刚性、规范操作流程等综合手段，显著延长了铜管使用寿命，实现平均过钢量超 10000 t/支，为同类企业降低消耗、稳定生产提供了有益参考。

结晶器是连铸生产过程中关键的部件，被称为连铸机的“心脏”，其质量及使用条件对连铸机的生产能力和铸坯质量起着十分重要的作用。结晶器铜管过钢量的高低是结晶器总体参数和连铸工艺参数是否合理的一个重要标志，铜管过钢量低不仅会大幅增加备件费用，还会延长下线维修时间，打乱正常的生产节奏，影响结晶器的有效周转。可见铜管的使用寿命直接影响连铸机的作业率、铸坯质量、收得率，进而影响连铸工序的生产成本。造成铜管下口磨损的原因，在工艺方面为钢水温度和钢水质量，在设备方面为结晶器足辊的支撑效果和铜管内腔腔型，在操作方面为足辊调整方式和送引锭杆操作等[1]。目前，国内以生产普碳钢钢种为主的钢铁企业，结晶器过钢量仅为 3000 t/支[2]，由于铜管下口磨损严重，铸坯与铜管之间的均匀传热受到影响，导致生产事故率和铜管成本较高。阳春新钢铁有限责任公司的 1#、3#铸机弧度为 9 m，结晶器过钢量平均寿命为 8000 t/支；2#铸机弧度为 8 m，结晶器过钢量平均寿命为 6000 t/支。为了进一步降低生产备件成本并稳定生产，本文从改进结晶器设计、优化维修工艺、推进技术改造以及完善工艺技术等方面入手，延长铜管的使用寿命。

攻关措施

结晶器多排足辊的应用

钢水进入结晶器后，在铜管的冷却作用下开始由液态转变成固态，逐渐凝固形成初生坯壳[3]。坯壳

作者单位：阳春新钢铁有限责任公司，广东　阳春　529600

生长初期，其在铜管内不断膨胀收缩，紧密贴合铜板持续冷却。当凝固形成的铸坯离开铜管时，初生坯壳厚度为 10~12 mm，此时的铸坯虽然质地较软，但已具备一定强度。铜管材质选型时，其关键指标为导热性。铜本身不具备良好的耐磨特性，当初生坯壳的厚度增加且铸坯运行轨迹偏离铜管中心线时，会导致铜管下端磨损长度达 150 mm（见图 1），磨损面由铸坯在二冷室运行轨迹的偏弧来决定。

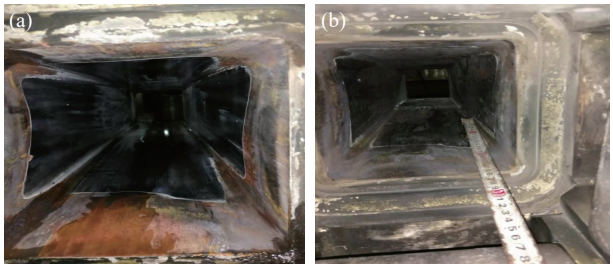


图 1　铜管下口磨损情况 (a) 和磨损长度 (b)

为解决铜管磨损问题，可从稳定铸坯运行轨迹入手开展工作，为此借鉴板坯铸机二冷室的结构，在铜管出口处增设足辊。为了保证足辊段的冷却效果，提高对铸坯的冷却强度，优化足辊间喷嘴布置，采用从上往下“2-1-1”的布置方式。同时，根据铜管下口的尺寸来确定足辊的安装位置，保证铸坯的运行轨迹。该措施效果显著，但单排足辊因受到铸坯机械应力，足辊表面与轴承磨损严重，难以长时间保持精度，且每个浇次均需下线调整结晶器，大幅增加岗位员工更换和维护结晶器的工作量。为缓解单排足辊的抗压能力，采用多排足辊（见图 2）方式，由原来的单排足辊增加至 3 排，足辊数量由 4 个增加至 12 个，以分散铸坯在运行过程中产生的机械应力，确保铸坯始终沿铜管的中心线稳定运行。由于足辊的弧度根据结晶器的弧度进行调整，铜管出口处增设的足辊可看作结晶器的延长段，不仅抵消了钢水静压力的影响，还能避免铸坯在出结晶器后因受到高强压的二冷水冷却导致的凝固收缩变形，具有抑制脱方和角部裂纹缺陷的作用，同时减轻了铜管下口的磨损问题。

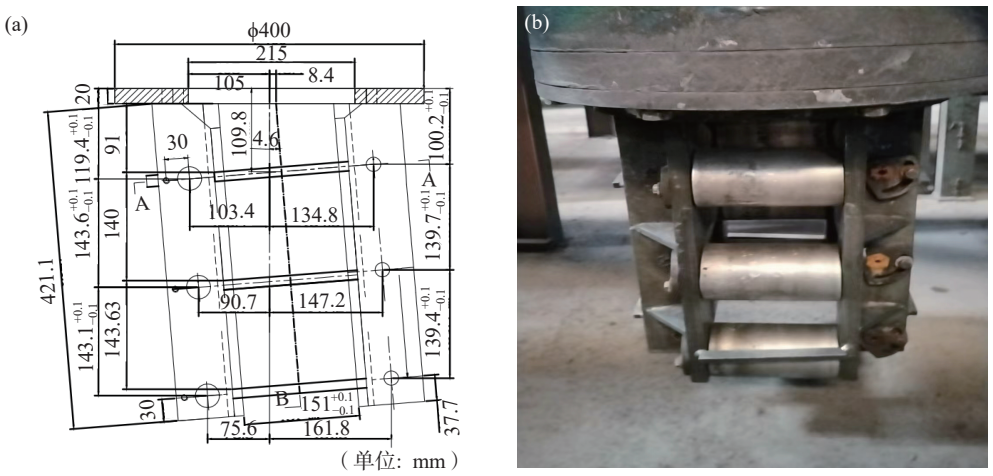


图 2　结晶器足辊设计图 (a) 和实物图 (b)

改进结晶器足辊开口度调整方法

铜管采用整体煅铸和拉拔工艺，制作过程中均需使用模具，因此铜管内腔的弧度及精度能得到较好的保障；而结晶器足辊由多个零散部件组成，安装上线后精度较差，需要维护人员人工调整。若足辊开口度与结晶器弧度偏差较大，轻则无法有效支撑铸坯，重则可能造成生产事故。目前，结晶器足辊传统的调整方法是将弧板放入铜管，贴合铜管某一弧面，再将足辊调整至与弧板贴合，以确保足辊与铜管弧度一致。

跟踪此方法在现场的应用情况发现，铜管下端的磨损问题并未得到有效改善。这是因为原足辊开口度根据铜管下口尺寸调整，但铸坯在出结晶器后，经高强度的二冷水冷却产生凝固收缩，断面尺寸变小，且小于足辊开口度，导致调整后的足辊无法支撑铸坯。为此，根据铸坯单位长度凝固收缩

量，将足辊原“0 对 0”（第 2 组足辊与第 3 组足辊调整尺寸均与弧板保持一致）改为“0 对负”（第 2 组足辊尺寸与弧板保持一致，第 3 组足辊按小于弧板调整尺寸）的调整方式，以此提升结晶器足辊对铸坯的支撑稳定性，保证铸坯在二冷室稳定运行。足辊调整示意图见图 3。根据铸坯凝固收缩比例调整第 1 组、第 2 组足辊的开口度，有效解决铸坯出一冷后，经过二冷强冷收缩导致尺寸变小的问题，避免了铸坯只贴合足辊单面，造成铜管与足辊单边过度磨损，进而减少了铜管因下口局部磨损而提前更换的情况。

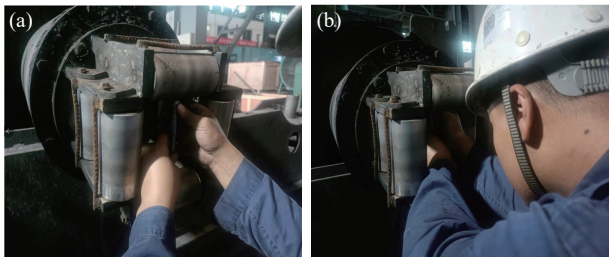


图 3　结晶器足辊调整示意图: (a) 第 1 组; (b) 第 2 组

改善结晶器足辊支架

结晶器足辊支架本体为不锈钢材质，由于长期处于高温、高速运行环境[4]，对其耐受性要求较高。跟踪现场使用情况发现，每使用 5 个浇次以上，足辊支架的焊接位置和足辊安装销轴孔均会出现不同程度变形或磨损，导致无法长期维持足辊精度，从而导致足辊支架报废。深入分析足辊变形位置及原因可知，焊接结构的足辊支架强度不高，在高温和铸坯应力双重作用下产生变形，为此在足辊支架焊接位置增加筋板以提高支架强度；在足辊支架上增加支撑和筋板，进一步增加固定点（见图 4），减少辊架变形量，足辊使用次数能达到 15 浇次，同时提高结晶器上线过程中足辊的尺寸精度，降低偏差，保障铸机稳定生产，减少铜管四周磨损。

优化铜管内腔

采用高精度倒锥度仪[5]，利用测量小车上的高精度位移传感器采集铜管内壁的变化数据，并通过串行通信将数据传至计算机，然后通过专用软件基于多角度传感器测量值绘制铜管内壁轮廓曲线，最终精准计算出锥度值，见图 5。这种测量方式能更加精

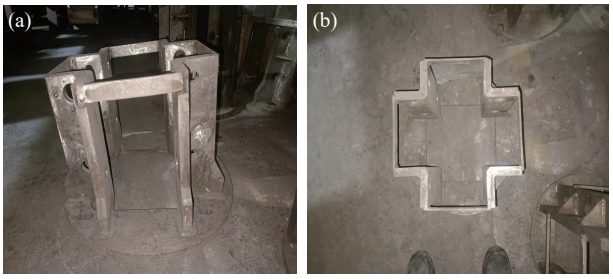


图 4　改进后结晶器足辊支撑: (a) 正面图; (b) 俯视图

准控制结晶器的锥度，提高测量精度，为结晶器维护及铜管下线标准制定提供精准依据，有助于提高结晶器的通钢量，减少生产事故。

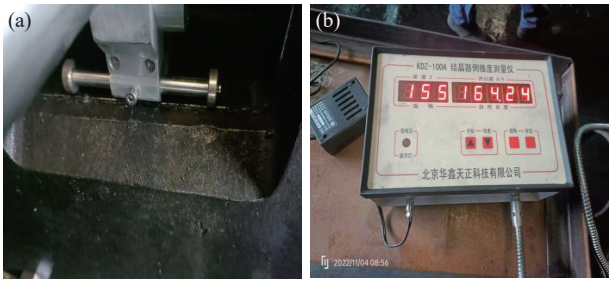


图 5　锥度仪测量图 (a) 和测量数据 (b)

根据铜管的冷却强度要求，对铜管内腔弯月处采用小范围大锥度的设计。在实际使用中发现，受到钢水静压力影响，铸坯坯壳尺寸未因结晶器弯月面冷却强度提升而改变，仍与铜管上口尺寸一致，这加剧了铸坯坯壳对铜管下口的摩擦，使得下口磨损更严重；同时，在正常拉速以下时，出现拉坯阻力增大，可见弯月面不适合采用大锥度设计。通过试验，将铜管内腔锥度由原先弯月面 1.98%、下口 1.93% 的固定锥度，优化为梯度变锥设计（弯月面锥度最高 1.98%，沿下口方向渐变至 1.79%），确保坯壳在铜管内均匀冷却的同时，有效降低铜管磨损。

规范停浇与送引锭杆操作标准

铸机生产前需对铸机设备及程序进行试车，以确保开机顺畅。试车时需将引锭头送至结晶器内部，查看引锭杆是否存在偏弧等问题，见图 6。由于引锭头为钢质材料，强度远高于铜管，在送入结晶器时会造成铜管下端出现磨损和划伤。针对此问题，首先要求在送引锭杆时必须安装引锭帽，以保

护铜管免受引锭杆刮蹭；其次，要求生产前试车，且不再安排引锭杆送入结晶器，从而减少引锭头与结晶器的接触次数，降低对铜管的磨损；最后，规范停浇拉速要求，将正常拉速控制在 2.6 m/min 以下，有效减少拉速非正常时因铸坯拉速过快，导致铜管下口磨损加剧的情况。

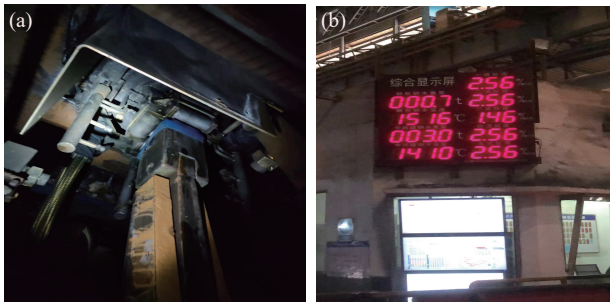


图 6　送引锭杆操作 (a) 和停浇拉速控制 (b)

工艺条件的影响

连铸钢水过热度偏高，易使铜管内腔变形，导致铜管倒锥度发生突变，不再呈连续抛物线型，这是连铸机出现粘结漏钢和裂纹漏钢的主要原因。一旦发生漏钢事故，在铸坯出尾坯或再次送引锭杆时，铜管下口会造成一定损伤，将各钢种过热度（液相线温度+控制温度）严格控制在 10~20 ℃（见图 7），既能有效减缓铜管内腔变形，又能有效减少漏钢事故的发生，从而减少对铜管下口的磨损。

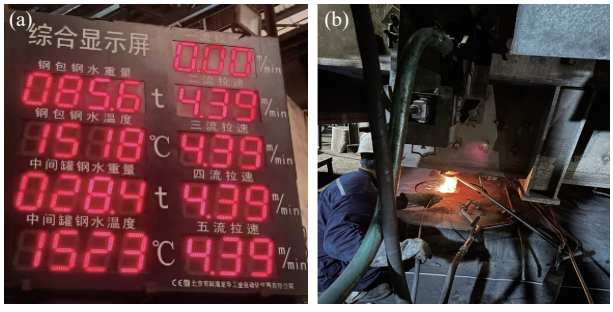


图 7　过热度实际控制情况 (a) 和铜管冷钢处理过程 (b)

当钢水温度偏低或流动性较差时，中间包水口容易结瘤，冷却的钢水（简称冷钢）会粘附在铜壁或铜管上口，用氧气管或割炬处理冷钢时（见图 7），易烧坏铜管。在普碳钢生产过程中，由于钢水的脱氧效果较差，此类情况更为普遍，铜管被烧坏的风险更高。

改善设备条件，稳定设备运行

利用停浇时间对引锭杆进行校正[6]，及时更换变形严重且无法校正的引锭杆，同时严格调整铸机弧度。对弧时，将对弧样板送入结晶器 100 mm 深度处，然后从结晶器开始依次向下通过各设备，最终送至第一架拉矫机下辊位置；对弧样板与铜管内壁、各区段导向辊辊面、第一架拉矫机下辊辊面完全贴合为最佳状态，间隙超过 2 mm 视为异常。根据对弧情况，逐一检查调整辊子对中、倾斜、悬空等问题，并及时做出调整。

在检修期间，需检查二冷室调弧辊及辊子基座，及时更换松动的螺栓。同时，检查各区段调弧辊有无明显窜动以及辊面、辊沿的磨损情况，当圆周长＜600 mm，辊沿高度＜30 mm，辊面出现不平且磨损深度超过 5 mm 时，需对辊子进行更换。辊子更换后，需要确认其弧度正常，确保二冷段与弧板对中、贴合，符合铸坯的运行轨迹，避免铸坯运行偏弧导致铜管下口磨损。对弧样板与铜管、辊面的对弧情况见图 8。

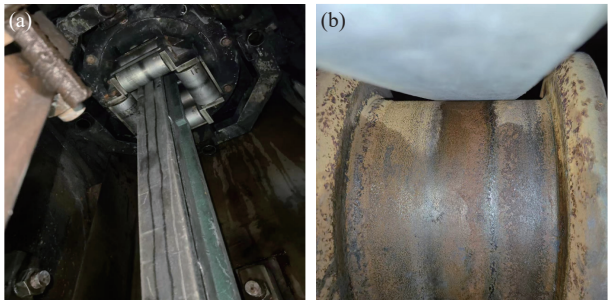


图 8　对弧样板与铜管 (a) 和辊面 (b) 的对弧情况

完善结晶器维修标准

鉴于结晶器足辊的重要性，规定支架南北、内外轴承座钢板偏差＜1 mm；足辊支架安装足辊后的同轴度偏差＜0.2 mm，南北、内外两边开口度偏差＜0.6 mm；足辊上线前必须用洗油浸泡，确保两端轴承安装槽内无杂物凸起，轴承转动灵活。

安装足辊后用调弧板调整，保证足辊面与铜管下口紧密贴合，严禁足辊开口度大于铜管下口尺寸；对弧后，先紧固足辊支架基座螺栓，再调整足辊开口度。

通过完善结晶器的维修标准，有效杜绝了岗位员工在足辊尺寸调整、安装过程中的随意性操作，

进一步规范了结晶器的维修流程，保证了结晶器的维修质量。

改进效果

采取上述改进措施后，铜管下口的磨损长度均＜50 mm（见图 9），四面磨损均匀且铜管过钢量均超 10000 t，在稳定高拉速生产的前提下降低了生产成本。改进后的生产情况见表 1。



图 9　铜管下口磨损长度 (a) 和四面 (b) 磨损均匀性

表 1　改进后的生产情况

编号	上线日期	下线日期	上线锥度/%	下线锥度/%	过钢量/t
3-09	8月1日	9月2日	1.38	0.77	11520
3-14	8月9日	9月1日	1.36	0.63	10657
3-15	7月10日	8月9日	1.38	0.73	11292
3-09	7月12日	8月1日	1.37	0.70	10097

结束语

（1）优化铜管内腔设计，采用梯度变锥的方式减少初生坯壳与铜管之间的摩擦，使铜管下口的磨损长度由 150 mm 缩短至 50 mm 以内。

（2）增加结晶器足辊数量以延伸铜管弧度，保持铸坯运行轨迹稳定，避免铸坯出结晶器后因二冷室偏弧，造成对铜管下口的单边磨损。

（3）提高结晶器足辊支架的强度，在高温、高拉速下保证结晶器足辊的精度，结晶器足辊支架的使用次数由 5 次提升至 15 次以上。

（4）根据铸坯的凝固收缩特性，优化足辊开口度调整精度，使结晶器足辊始终与铜管保持贴合状态。

参考文献

[1] 陈红伟. 宽板坯结晶器铜板的磨损原因分析与改进. 河南冶金，2017，25(1)：13
[2] 王恒，高茜. 关于板坯结晶器在线调宽时铜板划伤问题的研究. 内江科技，2022，43(4)：33
[3] 曹广畴. 现代板坯连铸. 北京：冶金工业出版社，1994
[4] 陈玉鑫，宋佳友，王莉，等. 板坯角部横裂纹的控制实践. 连铸，2016，41(2)：52
[5] 刘启龙，陶红标，张慧，等. 倒角结构对连铸坯角部温度的影响及角横裂控制工业试验. 炼钢，2018，34(2)：31
[6] 谭杜，龙海山. 阳春新钢铁高效铸机改造的实践. 冶金与材料，2020(1)：169

作者简介：谭杜（1989—），男，湖南省湘潭市人，本科，高级工程师。主要研究方向：炼钢连铸。通信地址：广东省阳春市潭水镇南山工业园阳春新钢铁有限公司；E-mail：tandu520@vip.qq.com。