

铜管坯水平连铸水冷调控与实验分析

王守权¹, 岳峰丽¹, 陈大勇^{2,3}, 刘劲松^{1,2,3}, 陈传来³

(1. 沈阳理工大学 汽车与交通学院, 沈阳 110159; 2. 中国科学院金属研究所 师昌绪
先进材料创新中心, 沈阳 110016; 3. 常州润来科技有限公司, 江苏 常州 213149)

摘要: 为实现传统铜管坯水平连铸水冷控制系统在线自动化精准控制, 提高生产质量与精度, 改善管坯组织性能, 对现有铜管坯水平连铸一冷水控制进行分析。采用程序设计和物理实验验证的方法, 开展了基于可编程逻辑控制器(PLC)闭环策略下石墨结晶器冷却水量自动控制的相关研究。实验结果表明, 基于闭环控制逻辑的自动水冷控制系统可以将流量波动控制在 ± 0.5 L/min 范围内, 离散系数为 2.68×10^{-3} , 明显小于传统水冷控制系统, 铜管坯水平连铸一次冷却水闭环控制系统可以实现连铸过程的精确控制。

关键词: 铜管坯; 水平连铸; 石墨结晶器; 一次冷却; 自动控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2024.02.013

Water Cooling Control and Experimental Analysis of Horizontal Continuous Casting of Copper Tube Billets

WANG Shouquan¹, YUE Fengli¹, CHEN Dayong^{2,3}, LIU Jinsong^{1,2,3}, CHEN Chuanlai³

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

Abstract: In order to achieve online automation and precise control of water cooling system of horizontal continuous casting of the traditional copper tube billets, improve production quality and accuracy, and improve the structural properties of the tube billets, an analysis is conducted on the existing copper tube billets horizontal continuous casting and water cooling control. Program design and physical experimental verification are adopted to carry out correlational research on the automatic control of cooling water volume of crystallizer based on a closed-loop strategy of PLC controller. The experimental results show that automatic water cooling control system based on closed-loop control logic can control flow fluctuation within the range of ± 0.5 L/min, with a discrete coefficient of 2.68×10^{-3} , which is significantly smaller than traditional water cooling control system. Closed-loop control system for primary cooling water system for horizontal continuous casting of copper tube billets can achieve precise control of the continuous casting process.

Key words: copper tube billets; horizontal continuous casting; graphite crystallizer; primary cooling; automatic control

铸轧法具有工艺流程短、模具费用低、能源消耗低、占地面积小、投资少等诸多优点,是铜杆、铜管、铜线、铜板带等铜材的主流生产工艺^[1-3]。水平连铸作为整个铸轧工艺的首道工序,决定铜材的组织及性能,其核心的控制环节是一冷水系统。现有铜管加工工艺的一冷水系统大多由人控制,操作者要具有丰富的经验,且水受到各种外界因素的干扰,温度会发生变化,若不能及时调整水量,会引发各种问题,影响生产效率和产品质量。一冷水量过大,铸坯会产生裂纹;水量过小,冷却不够,使坯壳太薄,造成漏液。

国内外对水平连铸水冷技术研究较多,但都集中在钢厂二冷水的控制上。唐钢 1700 板坯连铸机二次冷却水控制调节采用动态控制,通过比例控制、参数控制、目标表面温度控制等方法调节气动阀门开度以改变二次冷却段水流量^[4]。纪振平等^[5]以方坯铸机为研究对象,研究了一种自适应的比例-积分-微分(PID)动态权值调整法用于二冷动态控制。Wang 等^[6]通过建立中厚板坯连铸凝固传热数学模型,开发了模拟板坯连铸凝固传热及水量分布的软件,利用软件确定了二冷区各回路的水量。Ma 等^[7]基于实时传热模型开发了动态控制系统,可连续测量二次冷却出口钢坯表面温度及针对不同铸造条件调整二次冷却水流量。Brezina 等^[8]通过建立热凝固数值模型,对比不同优化调节算法在连续铸钢二次冷却区的应用,优化冷却喷嘴的水流量,以满足在二次冷却过程中尽可能少出现缺陷的质量要求。Cho 等^[9]综述了利用电磁力控制板坯连铸过程中流体流动以提高连铸质量的研究现状,通过电磁系统设计防止缺陷的形成和提高钢的质量。

目前对一冷水控制的研究没有明确文献,国内大多数企业通过经验对铜管坯一冷水进行控制。本研究建立一冷水控制模型,通过闭环控制,由上位机、可编程逻辑控制器(PLC)、触摸屏等进行流量控制,实现数据采集、精准控制、自我调节、自动报警等功能,从而提高生产效率和铸坯质量。通过对铜管坯水平连铸一次水冷进行自动控制研究,能稳定控制温度区间,实现铸坯水平连铸的自动化控制。

1 一次冷却水系统调控

1.1 结晶器结构

结晶器一次冷却水的控制在铜管坯水平连铸

生产过程中至关重要,其结构由石墨、钢套、铜套等组成,如图 1 所示。

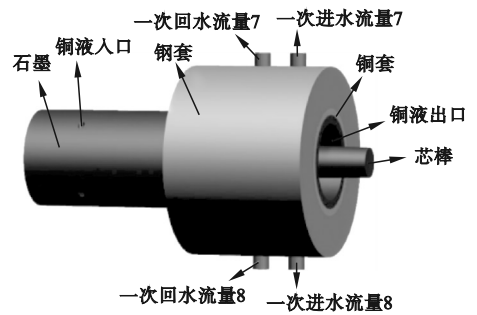


图 1 结晶器结构

Fig. 1 Structure of the crystallizer

1.2 水平连铸工艺

水平连铸工艺以电解铜板为原材料,电解铜板在熔炼炉中经 1 150 °C 高温被融化成铜水,将铜水转移到保温炉中保存。在铜管坯生产时,铜水在重力作用下注入水平放置的石墨结晶器中,经过一次冷却逐渐凝固形壳,从结晶器中被牵引出来后,经二次冷却凝固成铜管坯。

1.3 一冷水控制系统

铜管坯水平连铸生产线共有 A、B、C、D 四个结晶器,每个结晶器的进水流量又分为两个流次,结晶器 A 包含一次进水流量 7 和一次进水流量 8。为实现 PLC 控制流量,在原有管路中增加电动调节阀来控制结晶器水流量。电动调节阀安装在结晶器的两进两出冷却水管路上,电动调节阀两端安装截止球阀,若电动调节阀出现失控情况,先打开旁路,再关闭截止球阀,可以迅速由在线切换为手动方式。为节约成本,实验阶段在结晶器 A 上进行。一冷水控制系统设计思路如图 2 所示。

结晶器一冷水控制系统使用西门子 S7-1200PLC。在复杂工况中合理运用 PLC 技术能显著增加系统的抗干扰性能,满足用户所需要的良好系统性能^[10]。在模拟量闭环控制系统中,被控量(水流量)是模拟量,执行机构(电动控制阀)要求 PLC 输出模拟量信号,而 PLC 的 CPU 只能处理数字量。在 PLC 中可通过 A/D 转换器和 D/A 转换器将模拟量与数字量相互转换,最终输出模拟量用于控制电动调节阀的开度从而控制水流量^[11]。

一次冷却水系统调控采用闭环控制,闭环控制程序的逻辑思路是把输出量直接或间接地反馈到输入端构成闭环。通过比较系统行为(输出)与期望行为之间的偏差,并消除偏差以获得预期的系统性能^[12-14]。

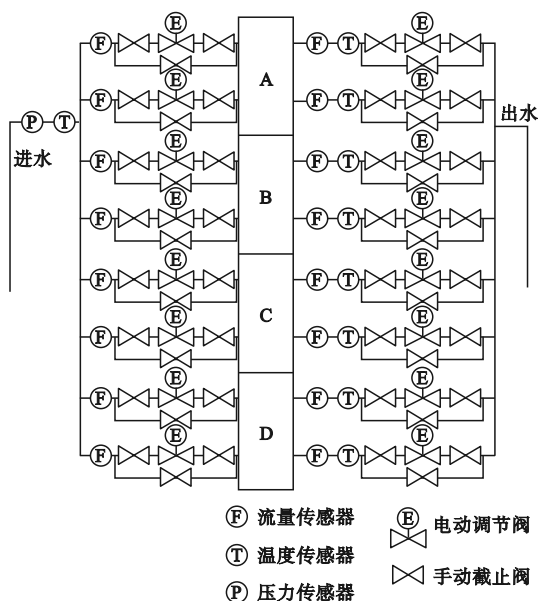


图2 一冷水控制系统设计思路

Fig. 2 Design concept of the primary cooling water control system

为实现 PLC 控制输入信号的设置功能,选择电动阀门输入输出信号为 DC 4 ~ 20 mA。根据现场实际情况,电动控制阀以 AC 220 V 作为电源。水冷框架长 1 835 mm、宽 1 520 mm、高 1 260 mm,水冷框架模型如图 3 所示。

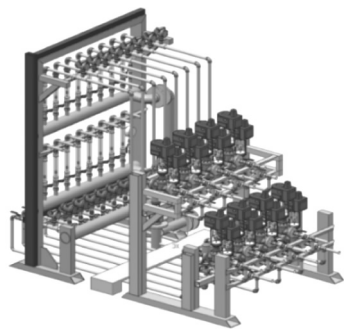


图3 水冷框架模型

Fig. 3 Frame of the water cooling system model

水平连铸生产过程中,结晶器一次冷却水的进水流量根据牵引机的平均牵引速度在程序中进行定义。以正常生产阶段为例,其流量与牵引速度(档位)对应关系如表 1 所示。

闭环控制是通过西门子 S7 协议读取原水冷系统 PLC 中的牵引机牵引速度,由牵引机的平均牵引速度对应生产过程中的档位与流量,使档位作为输入量输入到控制器 PLC 中,由 PLC 作为控制器控制执行器,即电动控制阀,水流量作为被控量,被电动控制阀控制。闭环控制系统在程序中

增加了一段 if 函数作为比较器,比较流量的输出值与期望值并消除偏差,使消除偏差后的流量为输出量。闭环程序设计思路如图 4 所示。

表 1 不同牵引速度对应水流量

Table 1 Water flow rate at different casting speeds

档位	牵引速度/ (mm · min ⁻¹)	一冷水流量/ (L · min ⁻¹)
6	380	40
7	400	43

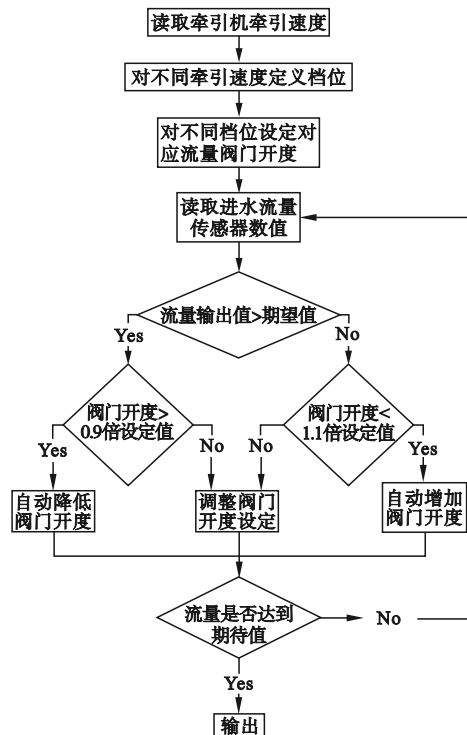


图4 闭环程序设计思路

Fig. 4 The design idea of closed-loop program

2 一次冷却水控制实验

通过一次冷却水控制实验验证结晶器水流量闭环控制程序的稳定性。为了生产与实验安全,在程序编程时增加了一段虚拟程序,虚拟程序是指不需要读取原 PLC 中的牵引机数据,模拟输入不同范围牵引速度,让程序识别其档位。同时为了实验方便,不影响实际生产,将实验分为三个阶段:虚拟控制程序下未接入生产流次实验;虚拟控制程序下接入生产流次实验;实际控制程序下接入生产流次实验。相应的实验阶段状态如表 2 所示。

2.1 现有水冷工艺参数分析

为了确定自动水冷系统控制目标,提取现有

表 2 实验阶段状态

Table 2 The status of different experiments

实验名称	结晶器位置	牵引动作	铜液流入铸坯情况
虚拟控制程序下未接入生产流次实验	离线	无	无
虚拟控制程序下接入生产流次实验	在线	无	无
实际控制程序下接入生产流次实验	在线	有	有

一个生产周期水冷工艺参数,分析现有参数的稳定程度,引入离散系数来判断程序控制条件下自动水冷系统所得到的流量波动程度,离散系数 C_v 计算式为

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (1)$$

式中: σ 为标准差; μ 为平均值。

上位机安装监控软件,将该软件通过以太网与 PLC 相连,该软件作为主站,PLC 作为从站。由传感器采集的数据传入到 PLC,通过以太网将 PLC 中的数据传递到上位机,由上位机监控软件提取的水冷工艺参数,如图 5 所示。

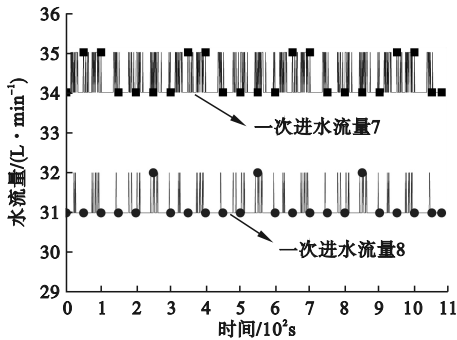


图 5 原水冷系统参数分析

Fig. 5 Analysis of the conventional water cooling system parameters

由图 5 可知,正常生产时水流量波动在 ± 0.5 L/min 范围内。经计算得到,一次进水流量 7 的离散系数为 12.57×10^{-3} ,一次进水流量 8 的离散系数为 9.64×10^{-3} 。结合实际,在现有一冷水手动控制条件下,水流量及稳定性能满足铸坯凝固冷却要求,说明离散系数只要不超过 9.64×10^{-3} ,就可以满足实际的生产要求。

2.2 虚拟控制程序下未接入生产流次实验

在虚拟控制程序下未接入生产流次实验中,即由虚拟程序控制不将结晶器连接到生产管路中,结晶器内无铜液。由上位机提取闭环程序控

制下得到的水流量实验数据,如图 6 所示。

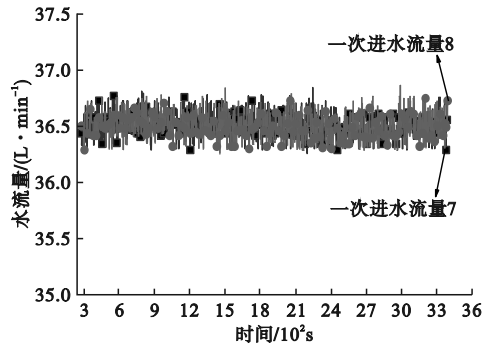


图 6 虚拟控制程序下未接入生产流次实验数据

Fig. 6 Experimental data of inlet water flow rate without accessing to production under the virtual control program

由图 6 可知,在闭环控制下,流量稳定性更好,可以达到工艺的控制要求。其中一次进水流量 7 最大流量为 36.85 L/min,最小流量为 36.30 L/min。一次进水流量 8 最大流量为 36.87 L/min,最小流量为 36.20 L/min。经计算得到,一次进水流量 7 的离散系数为 2.42×10^{-3} ,一次进水流量 8 的离散系数为 2.57×10^{-3} ,一次进水流量 7 与一次进水流量 8 的离散系数均小于原水冷系统的离散系数。

2.3 虚拟控制程序下接入生产流次实验

虚拟控制程序下接入生产流次虚拟实验中,即由虚拟程序控制将结晶器接入生产管路中,但结晶器内无铜液。由上位机提取闭环控制得到的水流量数据,如图 7 所示。

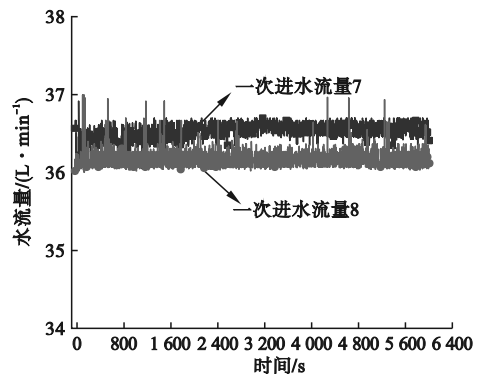


图 7 虚拟控制程序下接入生产流次实验数据

Fig. 7 Experimental data of inlet water flow rate with accessing to production under the virtual control program

由图 7 可知,一次进水流量 7 最大流量为 36.91 L/min,最小流量为 36.12 L/min。一次进水流量 8 最大流量为 37 L/min,最小流量为 36 L/min。计算出一次进水流量 7 的离散系数为 3.04×10^{-3} ,一次进水流量 8 的离散系数为

2.60×10^{-3} , 一次进水流量 7 与一次进水流量 8 的离散系数远小于原系统的离散系数。

2.4 实际控制程序下接入生产流次实验

在实际生产中闭环程序控制下得到的水流量数据如图 8 所示。

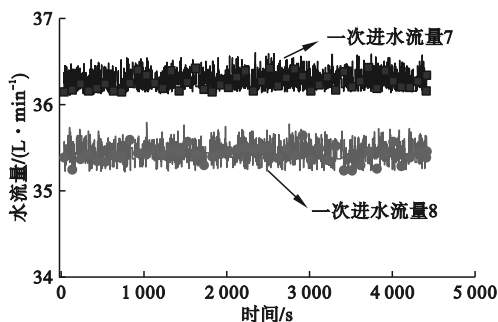


图 8 实际控制程序下接入生产流次实验数据

Fig. 8 Experimental data of inlet water flow rate with accessing to production under the actual control program

由图 8 可知, 一次进水流量 7 最大流量为 36.58 L/min, 最小流量为 36.14 L/min。一次进水流量 8 最大流量为 35.78 L/min, 最小流量为 35.23 L/min。一次进水流量 7 的离散系数为 2.54×10^{-3} , 一次进水流量 8 的离散系数为 2.68×10^{-3} , 均远小于原水冷系统的离散系数。在实际生产中控制水流量得到的实验数据虽然受到生产中各种因素的影响, 有一定的波动, 但完全可以达到实际生产要求的 ± 0.5 L/min 波动范围。

3 结论

本文采用程序设计和物理实验验证的方法对现有铜管坯水平连铸一冷水控制进行分析, 得到如下结论。

1) 在结晶器一次冷却水路中增加电动控制阀, 通过改变电动控制阀开度, 消除流量设定值与传感器实际值间的误差, 实现铜管坯水平连铸一冷水闭环控制。

2) 闭环控制策略下流量控制更加稳定, 其流量波动小于工艺要求的 ± 0.5 L/min, 最大的离散系数也小于工艺要求。

参考文献 (References):

[1] 王松伟, 张士宏, 宋鸿武, 等. TP2 铜管拉拔成形过程组织演变规律[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(4): 782-789.
WANG S W, ZHANG S H, SONG H W, et al. Evolution of microstructure of TP2 copper tube during drawing process [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(4): 782-789. (in Chinese)

[2] 苏华光. 导体铜及铜合金的应用和加工工艺综述[J]. 电线电缆, 2022(5): 22-29, 33.
SU H G. Overview of application and processing technology of conductor copper and copper alloy [J]. Wire & Cable, 2022(5): 22-29, 33. (in Chinese)

[3] 刘鹏, 郑万, 沈韶峰, 等. SCR7000 连铸连轧铜杆扭转裂纹的关键影响因素[J]. 有色金属工程, 2023, 13(4): 29-37.
LIU P, ZHENG W, SHEN S F, et al. Key influencing factors of torsion crack of copper rod produced by SCR7000 continuous casting and rolling [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(4): 29-37. (in Chinese)

[4] 梁云. 板坯连铸二次冷却水自动控制[J]. 中国设备工程, 2013(1): 47-48.
LIANG Y. Automatic control of secondary cooling water in slab continuous casting [J]. China Plant Engineering, 2013(1): 47-48. (in Chinese)

[5] 纪振平, 田珊珊, 王纪. 连铸二冷动态控制算法研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2018, 37(2): 7-10, 17.
JI Z P, TIAN S S, WANG J. The research of dynamic secondary cooling control algorithm in continuous casting [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2018, 37(2): 7-10, 17. (in Chinese)

[6] WANG X Y, LIU Q, WANG B, et al. Optimal control of secondary cooling for medium thickness slab continuous casting [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2011, 38(7): 552-560.

[7] MA J C, LU C S, YAN Y T, et al. Design and application of dynamic secondary cooling control based on real time heat transfer model for continuous casting [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2014, 27(3): 135-140.

[8] BREZINA M, MAUDER T, KLIMES L, et al. Comparison of optimization-regulation algorithms for secondary cooling in continuous steel casting [J]. Metals, 2021, 11(2): 237.

[9] CHO S M, THOMAS B G. Electromagnetic forces in continuous casting of steel slabs [J]. Metals, 2019, 9(4): 471.

[10] 汪海洋. PLC 技术在电气自动化控制中的运用分析[J]. 电器工业, 2023(4): 73-76.
WANG H Y. Application analysis of PLC technology in electrical automation control [J]. China Electrical Equipment Industry, 2023(4): 73-76. (in Chinese)

[11] 尹亮, 陈贵凤, 杨晓龙, 等. 基于 PLC 的电力供电系统自动化监控系统 [J]. 制造业自动化, 2022, 44(8): 153-156, 168.
YIN L, CHEN G F, YANG X L, et al. PLC-based automatic monitoring system for power supply system [J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(8): 153-156, 168. (in Chinese)

[12] 李艳杰, 崔天宇, 王海, 等. 比例阀控液压缸位置 PID 闭环控制的 PLC 软件实现 [J]. 沈阳理工大学学报, 2013, 32(4): 37-40, 46.
LI Y J, CUI T Y, WANG H, et al. Software implementation of hydraulic cylinder position PID closed loop control in proportional valve control system using PLC [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2013, 32(4): 37-40, 46. (in Chinese)

[13] 王静茹. 基于反馈控制的水库闸门调节方法 [J]. 广东水利水电, 2023(5): 87-91.
WANG J R. Regulation method for gates in reservoir based on feedback control [J]. Guangdong Water Resources and Hydro-power, 2023(5): 87-91. (in Chinese)

[14] 李中正, 张一鸣, 王旭红, 等. 数字磁通门反馈控制系统设计 [J]. 电力电子技术, 2023, 57(5): 37-40.
LI Z Z, ZHANG Y M, WANG X H, et al. Design of feedback control system for digital fluxgate [J]. Power Electronics, 2023, 57(5): 37-40. (in Chinese)