

铝合金楔横轧模具加热控温系统的设计及应用

白 鹭, 邵长斌, 袁红霞, 李思奇, 梁培新, 陈钰金, 高丙坤, 石一馨, 赵 利
(中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

摘要: 为了解决轧辊转动时加热控温元件的导线连接和绕动问题, 对铝合金楔横轧模具加热控温系统进行了结构设计, 并对加热控温元件的布局进行了设计优化, 采用多点式加热测温方式保证了模具的加热效率和温度均匀性。开发了基于PID控制算法的功率自适应模具温度补偿系统, 可根据设定的控温逻辑自动调节加热棒功率, 将模具温度控制在工艺要求范围内。基于该模具加热控温系统开发了铝合金精密楔横轧机, 批量生产了尺寸一致性好、表面质量高的铝合金楔横轧锻件, 表明该项研究成果切实可行, 可用于铝合金、钛合金等有色金属的回转成形工艺及设备的开发。

关键词: 铝合金; 楔横轧; 模具加热; PID控制算法; 加热控温元件

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.11.024

中图分类号: TG339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 11-0174-05

Design and application on heating and temperature control system for aluminum alloy cross wedge rolling mold

Bai Lu, Shao Changbin, Yuan Hongxia, Li Siqi, Liang Peixin, Chen Yujin, Gao Bingkun, Shi Yiqing, Zhao Li
(Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd. CAM, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of wire connection and winding for heating and temperature control elements during roll rotation, the structure of the heating and temperature control system for aluminum alloy cross wedge rolling mold was designed, and the layout of the heating and temperature control elements was designed and optimized. Then, the heating efficiency and temperature uniformity of the mold were ensured by using multi-point heating and temperature measurement method. Furthermore, an adaptive mold temperature compensation system based on PID control algorithm was developed, which automatically adjusted the heating tube power according to the set temperature control logic to control the mold temperature within the range of process requirements. Finally, based on the heating and temperature control system of mold, an aluminum alloy precision cross wedge rolling mill was developed. The aluminum alloy cross wedge rolling forgings with good dimensional consistency and high surface quality were mass-produced. The results show that the research results are feasible and can be used in the development of rotary forming process and equipment for non-ferrous metals such as aluminum alloy and titanium alloy.

Key words: aluminum alloy; cross wedge rolling; mold heating; PID control algorithm; heating and temperature control elements

铝合金因其良好的综合性能成为汽车、航空等领域轻量化的首选材料。然而, 铝合金具有锻造温度范围窄、应变速率敏感、流动性差、黏附性大等特点, 锻造过程中的模具预热温度、模具润滑、变形速度等对材料组织演化影响明显。若工艺条件控制不当, 坯料会出现温降快、流动性差、与模具粘连等问题, 达不到高质量锻件的性能要求, 甚至产生废品^[1-2]。针

对铝合金锻造温度范围窄的特性, 通常需要对模具进行加热以保证坯料成形过程中的温度^[3]。

楔横轧是一种高效的回转成形方法, 是一种常见的复杂锻件的制坯手段。其作用是通过坯料体积的合理分配, 以控制模锻时的金属流动, 保证型腔顺利充填, 提高锻件质量和材料利用率^[4]。目前, 国内的钢件楔横轧工艺及装备的研究已比较成熟, 其设备结构可靠、生产效率高、产品质量好^[5-7]。由于钢的轧制温度范围广, 模具无需预热, 钢件楔横轧机不具备模具加热功能。德国、日本等发达国家的铝合金精密楔横轧技术发展较早^[8-10], 而国内尚在起步阶段。为满足铝合金锻造对模具温度的

收稿日期: 2023-08-04; 修订日期: 2023-11-02

作者简介: 白 鹭 (1989-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: 997137378@qq.com

通信作者: 石一馨 (1982-), 男, 学士, 研究员

E-mail: shiyiqing1005@163.com

要求, 需设计一套铝合金楔横轧模具加热的控温系统。

本文设计了模具加热控温系统的结构以及加热控温元件的布局, 开发了一种基于比例微分积分 (Proportion Intergration Differentiation, PID) 控制算法的功率自适应模具温度补偿系统, 采用该成果开发的铝合金精密楔横轧机通过了生产验证。

1 铝合金楔横轧模具加热控温系统结构设计

模具加热的方法主要有火焰加热法、电加热法、感应线圈加热法等。火焰加热法加热速度快, 但是模具加热温度不易控制; 感应线圈加热法加热快、能耗小, 但其机构较为复杂; 电加热法加热速度介于两者之间, 其技术发展较为成熟。模具测温方法可分为接触式测温和非接触式测温。接触式测温主要是指热电偶测温, 测温精度高, 但是只能单点测温。非接触式测温无需破坏模具即可进行温度场测量, 但其成本高, 测温精度易受环境因素影响。综合考虑加热测温效果和经济性, 本文采用电加热法加热模具和接触式测温, 即在模具内部插入加热棒和热电偶, 并将其接入加热控温系统。

铝合金楔横轧模具需要的总加热功率大, 一般导线连接难以负荷。工作时轧辊和模具持续旋转, 加热棒和热电偶的导线需随动旋转。此外, 更换产品、清理模具等情况下, 轧辊和模具需要拆卸, 加热棒和热电偶的导线连接需要安全、易操作。为解决上述问题, 本文对铝合金楔横轧模具加热控温系统进行了结构设计, 如图 1 所示, 模具安装于轧辊外, 轧辊通过安装于立柱上的半轴与动力系统连接。模具内部设置多根加热棒和热电偶, 其导线经轧辊和半轴与加热控温系统连接, 模具或轧辊拆装时导线需断开连接, 因此, 在模具-轧辊、轧辊-半轴、半轴-加热控温系统的连接处设置导线接口。

在模具-轧辊的连接处, 需设计将模具内的加热棒及热电偶的导线与轧辊内的导线连接。若采用普通接线插头, 拆装时孔位定位不准, 易造成插针损坏, 导致接触不良甚至错位无法安装。多根加热棒的总功率较大, 而普通接线插头可承载的功率有限, 工作时容易过载烧损。此外, 脱模剂和金属碎屑等异物落入插头的接口处容易引发安全事故。

本文设计了一套弹簧端子装置 (图 2), 用于实现模具-轧辊处的导线方便快捷地连接和安全稳定地导电。图 2 中, 两套金属安装座分别将弹簧端子

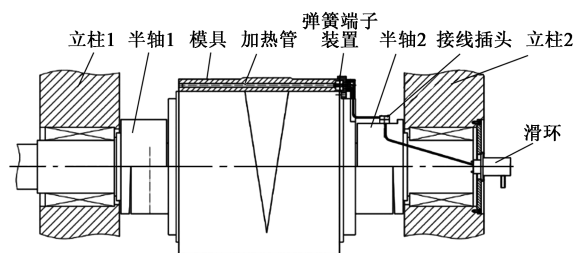


图 1 楔横轧模具加热控温系统结构示意图

Fig. 1 Structure schematic diagram of heating and temperature control system for wedge cross rolling mold

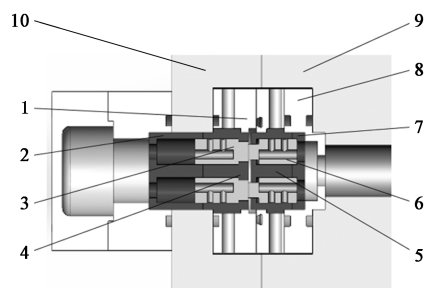


图 2 弹簧端子装置示意图

1. 轧辊端金属安装座 2. 轧辊端陶瓷压紧块 3. 轧辊端铜端子
4. 轧辊端陶瓷端子定位块 5. 模具端陶瓷端子定位块
6. 模具端铜端子 7. 模具端陶瓷压紧块 8. 模具端金属安装座
9. 模具 10. 模具定位环

Fig. 2 Schematic diagram of spring terminal device

的两端固定于模具和轧辊上, 两套陶瓷压紧块分别将铜端子与金属安装座隔开绝缘。加热棒或热电偶的两根导线连接在子母弹簧端子装置模具端的两个端子上, 轧辊端的端子背后设有压缩弹簧。安装时, 随着模具的安装锁紧, 模具端的两端子与轧辊端的两端子接触并将弹簧压紧, 模具内的导线与轧辊内的导线接通。其中, 为了避免模具安装错位造成导电失败, 对两边端子的端面直径进行了差值设计, 可保证端面在模具与轧辊的同轴度允许偏差内 ($\pm 1 \text{ mm}$) 接触, 降低了对模具加工精度及安装定位的要求。根据加热棒总功率的要求, 设计两边端子的直径, 使两端子的直径能满足最大功率的要求, 保证电路不至于过载。此外, 采用耐高温硅胶密封圈对金属安装座的所有接触面进行密封, 可防止脱模剂和金属碎屑等异物进入装置造成短路等故障。这种弹簧端子装置的导线连接便捷、安全可靠, 可实现模具与轧辊的快速拆装。

在轧辊-半轴的连接处, 需将轧辊内的导线与半轴内的导线连接。由于轧辊与半轴相对静止且仅轴向连接, 因此该处采用大功率接线插头连接导线即可。即将轧辊内所有导线接入插头的活动端, 与

安装在半轴上的接线插头的固定端连接。这种导线连接结构简单, 维修成本低, 方便轧辊的快速拆装。

在半轴-加热控温系统的连接处, 需将半轴内的导线与模具加热控温系统连接。为防止半轴旋转时内部导线缠绕, 本文在轧辊和半轴的旋转中心设计安装滑环, 以实现导线的随动旋转及信号的安全传输, 其结构原理如图 3 所示。其中, 转子部分安装在半轴上, 与加热棒和热电偶的导线连接; 定子部分安装在楔横轧机立柱上, 与加热控温系统连接。工作时, 导线可随半轴旋转, 利用滑环内部的电磁耦合传递加热棒的功率和热电偶的信号, 实现高速旋转条件下的模具加热及控温。

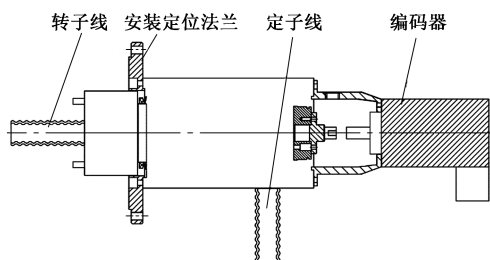


图 3 滑环结构原理图

Fig. 3 Principle diagram of slip ring structure

2 加热控温元件的布局设计

楔横轧模具包括楔入区、展宽区、精整区等, 轧制过程中, 坯料与模具型腔表面接触, 产生热交换。若模具表面温差过大, 则会使实际轧制温度波动过大, 对质量产生影响。模具的温度均匀性和加热效率与加热控温元件(加热棒和热电偶)的功率、数量、位置分布等因素密切相关。

本文研究的某铝合金楔横轧模具的型腔包角为 330° , 模具的目标加热温度为 200°C , 单根加热棒的功率为 3000 W 。图 4 为加热控温元件的周向分布示意图, 利用有限元模拟得到的加热棒沿圆周方向的角度间距与加热时间的关系如图 5 所示。由图 5 可知, 当角度间距 θ 小于 35° 分布时, 加热时间随加热棒密度升高的减少效果并不明显, 但当角度间距超过 35° 以后, 加热时间显著增长。由于加热棒排布过密会影响模具强度, 因此最优加热棒布置间距为 35° , 即沿加热棒的周向均布 9 根加热棒。同时, 在周向均布 4 根热电偶, 通过多点式测温准确反应模具不同区域的温度状态, 作为控制系统的温度检测基准。

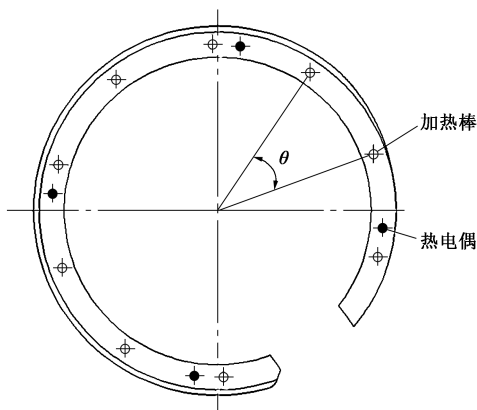


图 4 加热控温元件的周向分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of circumferential distribution for heating and temperature control elements

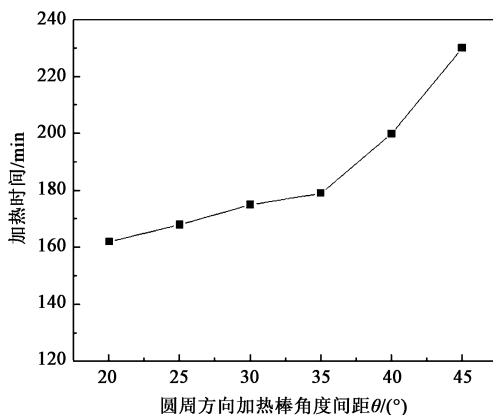


图 5 加热棒沿圆周方向的角度间距与加热时间的关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between angular spacing of heating rod along circumferential direction and heating time

3 基于 PID 控制算法的功率自适应模具加热控温系统

生产过程中, 模具温度受环境温度、喷雾润滑、坯料接触等多因素的影响而动态变化。为了保证模具温度保持在工艺要求范围内, 在模具内部多点插入加热棒和热电偶, 以实现分布式加热和多点测温。图 6 为模具加热控温方式图, 其中, 调功器是应用可控硅及其触发控制电路调整负载功率的盘装功率调整单元。在控温系统中, 三相电接入调功器, 热电偶接入控制 PLC, PLC 根据热电偶检测到的温度数据, 以及利用 PID 控制算法^[11-12]测算的控制参数, 调整控制加热棒功率的调功器的功率输出值 ($4\sim 20\text{ mA}$), 三相电经过调功器调整输出功率后, 将调整后的电压和电流输出至模具加热棒, 从而实现对模具的加热控温。

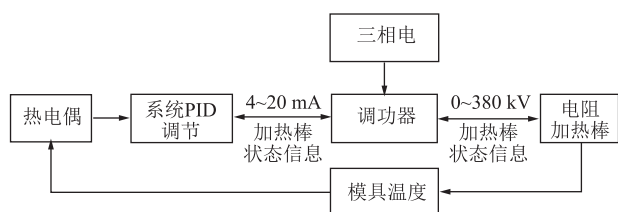


图 6 模具加热控温方式示意图

Fig. 6 Schematic diagram of heating and temperature control mode for mold

PID 控制算法的公式如下:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

式中: $u(t)$ 为 PID 控制器的输出信号; K_p 为比例增益; t 为采样周期, 为常数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数; $e(t)$ 为给定值与测量值之差。

模具加热控温系统的控制逻辑如图 7 所示, 通过模具内的热电偶实时测量和反馈模具的当前温度, 以多根热电偶检测温度均值为检测基准, 当实际温度远低于设定温度时, 控制系统控制调功器全功率输出, 当模具加热至接近设定温度时, 系统通过 PID 控制算法控制调功器以非线性方式逐渐降低输出功率, 实现模具的加热控温, 使模具实际温度稳定在设定的温度范围内, 有效补偿坯料成形过程中的表面降温。

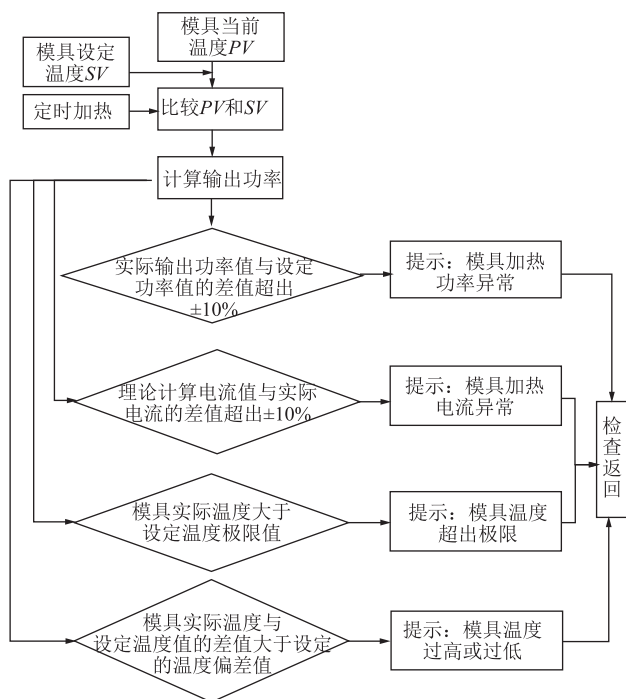


图 7 模具加热控温系统的控制逻辑图

Fig. 7 Control logic diagram of heating and temperature control system for mold

控制界面可设置“功率设定值”、“温度偏差值”和“温度极限值”, 并且显示当前的实际输出功率、输出电流和输出电压值。出现如下情况时, 会进行异常报警, 由人工排查问题, 以保证设备安全和工艺可靠。

(1) 当输出功率百分比达到 99.9%, 即满功率输出时, 若实际输出功率值和设定功率值的差值超出 $\pm 10\%$ 时, 系统发出“模具加热功率异常”报警。

(2) 当理论计算电流值和实际电流值的差值超出 $\pm 10\%$ 时, 系统发出“模具加热电流异常”报警。

(3) 当模具实际温度超出设定温度极限值时, 系统发出“模具温度超出极限”报警。

(4) 当模具实际温度和设定温度的差值超出设定的温度偏差值时, 系统发出“模具温度过高”或“模具温度过低”警示。

4 实验验证

利用上述铝合金楔横轧模具加热控温系统开发设计了 D46-100×800AL 型铝合金专用精密楔横轧机 (图 8), 其模具加热控温系统界面如图 9 所示, 该系统采用可视化人机交互界面, 能够控制并监控上下模具的温度状态, 模具温度范围为 $(200 \pm 25)^\circ\text{C}$ 。



图 8 D46-100×800AL 铝合金楔横轧机

Fig. 8 D46-100×800AL aluminum alloy cross wedge rolling mill

在该设备上生产了尺寸一致性好、表面质量高的铝合金楔横轧锻件产品 (图 10), 符合设计要求。表明该铝合金楔横轧模具加热控温系统设计合理, 达到了产业化应用的要求。

5 结论

(1) 本文对铝合金楔横轧模具加热控温系统



图9 模具加热控温系统界面

Fig. 9 Interface of heating and temperature control system for mold



图10 铝合金楔横轧锻件

Fig. 10 Aluminum alloy cross wedge rolling forgings

进行了结构设计,解决了楔横轧模具和轧辊拆装及工作时加热棒和热电偶的导线连接及绕动问题。

(2) 本文设计优化了铝合金楔横轧模具加热测温元件的布局,通过在模具周向多点式布置加热棒和热电偶,提高了加热效率和温度的均匀性。

(3) 本文设计了基于PID控制算法的功率自适应模具温度补偿系统,利用热电偶的测温反馈和调功器的输出控制加热棒的加热功率,实现对模具温度的实时精确控制。

(4) 经生产验证,该铝合金楔横轧模具加热控温系统设计合理,锻件产品质量高,可用于对铝合金、钛合金等有色金属回转成形设备的开发。

参考文献:

- [1] 陈钰金,徐春国,任广升,等. L形铝合金控制臂预锻数值模拟及工艺优化 [A]. 第十二届全国塑性工程学术年会第四届全球华人塑性加工技术研讨会论文集 [C]. 重庆, 2011.
Chen Y J, Xu C G, Ren G S, et al. Numerical simulation and process optimization for pre-forging of L-shaped aluminum alloy controlling arm [A]. The 12th National Plastics Engineering Annual Conference & The 4th Global Chinese Plastic Processing Technology Seminar [C]. Chongqing, 2011.
- [2] 谢映光,梁满朝,王成磊,等. 铝合金控制臂锻造工艺及模具有限元模拟优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 7-13.
Xie Y G, Liang M C, Wang C L, et al. Optimization on forging process and die for aluminum alloy control arm using finite element

simulation [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 7-13.

- [3] 高丙坤. 汽车用铝合金控制臂热成形工艺与性能研究 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2021.
Gao B K. Hot Deformation Process and Performance of Aluminum Alloy Control Arm for Automobile [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group, 2021.
- [4] 胡正寰,杨翠苹,王宝雨. 我国轴类零件轧制技术进展 [J]. 机械工程学报, 2012, 48 (18): 7-12.
Hu Z H, Yang C P, Wang B Y. Development of part rolling technology in China [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48 (18): 7-12.
- [5] 闫华军,张超,路红岩,等. 工艺参数对楔横轧大断面多台阶轴拉细颈缩的影响 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (9): 100-107.
Yan H J, Zhang C, Lu H Y, et al. Effect of process parameters on thinning and necking of large section multi-step shaft in cross wedge rolling [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (9): 100-107.
- [6] 沈瑾霞. 空心轴带芯棒楔横轧成形与微观组织演变规律研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
Shen J X. Research on the Forming and Microstructure Evolution of Hollow Shaft by Wedge Rolling with Mandrel [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.
- [7] 邵长斌. 楔横轧机偏心调整中心距机构及相位差的研究 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2007.
Shao C B. Study of Phase Difference and Eccentric Mechanism for Adjusting the Center Distance [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group, 2007.
- [8] Behrens Bernd Arno, Stonis Malte, Blohm Thoms, et al. Investigating the effects of cross wedge rolling preforming operation and die forging with flash brakes on forging titanium hip implants [J]. International Journal of Material Forming, 2018, 11 (1): 67-76.
- [9] Tofil A, Tomczak J, Bulzak T. Numerical and experimental study on producing aluminum alloy 6061 shafts by cross wedge rolling using a universal rolling Mill [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2015, 60 (2): 801-807.
- [10] Pater Z, Tomczak J. Experimental tests for cross wedge rolling of forgings made from non-ferrous metal alloys [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2012, 57 (4): 919-928.
- [11] 赵中敏,张秋云,杨广才. PLC 控制系统设计 [J]. 机床电器, 2007, 34 (2): 37-40, 46.
Zhao Z M, Zhang Q Y, Yang G C. The design of PLC control system [J]. Machine Tool Electric Apparatus, 2007, 34 (2): 37-40, 46.
- [12] 倪伟,刘斌,侯志伟,等. 电气控制技术与 PLC [M]. 南京: 南京大学出版社, 2017.
Ni W, Liu B, Hou Z W, et al. Electrical Control Technology and PLC [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2017.