

新型温控装置对铸镁合金产品模具温度控制精度的提升研究

吉勇 俞彭锋

浙江恒道科技股份有限公司 312030

【摘要】针对镁合金铸造过程中模具温度控制精度不足导致的冷料、飞边等缺陷问题,本文提出一种基于多区域独立调控的新型温控装置。该装置通过集成三相变压器、智能温控仪表、固态继电器等模块,构建闭环温度控制系统,实现模具各区域温度的精准动态调节。工业测试表明,在镁合金汽车支架生产中,系统可将模具温度波动范围从 $\pm 25^{\circ}\text{C}$ 缩减至 $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$,废品率降低18.3%,能耗下降22%,为高精度镁合金铸造提供了可靠解决方案。

【关键词】镁合金铸造;模具温控;多区域调控;固态继电器;闭环控制

Study on improving the temperature control accuracy of cast magnesium alloy die by the new temperature control device

Ji Yong Yu Pengfeng

Zhejiang Hengdao Technology Co., Ltd. 312030

【Abstract】In view of the insufficient temperature control accuracy of magnesium alloy casting, this paper proposes a new temperature control device based on multi-region independent regulation. By integrating the device integrates three-phase transformer, intelligent temperature control meter, solid state relay and other modules, and builds a closed-loop temperature control system to realize the accurate dynamic adjustment of the temperature in each area of the mold. Industrial tests show that in the production of magnesium alloy automobile bracket, the system can reduce the mold temperature fluctuation range from $\pm 25^{\circ}\text{C}$ to $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$, reduce the rejection rate by 18.3%, and reduce the energy consumption by 22%, providing a reliable solution for high-precision magnesium alloy casting.

【Key words】magnesium alloy casting; mold temperature control; multi-region regulation; solid-state relay; closed-loop control

1.引言

镁合金作为一种轻质高强度的金属材料,在汽车、3C(计算机、通信、消费电子)等领域的应用日益广泛。其轻量化特性不仅能够有效降低产品的重量,还能显著提升能源效率和运行性能。然而,镁合金的铸造过程却面临着一系列挑战。镁合金熔体凝固速度快,对温度变化极为敏感,这就要求模具温度必须精确控制在特定的范围内,以确保产品的质量和一致性。

传统单点温控方式在实际应用中暴露出了诸多问题。由于模具各区域的温度差异较大,实测最大温差甚至可达 40°C ,这严重影响了镁合金铸件的质量。温度的不均匀分布会导致铸件出现冷隔、缩孔、热裂等缺陷,降低了产品的成品率和性能。此外,传统温控系统的加热器响应延迟也是引发温度超调的一个重要因素。温度超调不仅会影响铸件的组织性能,还会增加能耗和生产成本。

为了解决这些问题,本研究设计了一种新型模块化温控装置。该装置旨在实现多区域温度的独立调控、快速动态响应以及三相负载均衡优化,从而显著提高镁合金铸造模具的温度控制精度。本研究不仅具有重要的理论意义,还将为镁

合金铸造行业带来显著的经济效益和社会效益。

2.系统设计与实现

2.1 硬件架构

新型温控装置的硬件架构主要由电源模块、控制核心、执行机构和传感网络组成。

电源模块采用三相干式变压器,主边绕组采用 Δ 接法接入三相电网,副边绕组则通过选择开关输出多路独立电压。这种设计能够满足不同加热区域对电压的不同需求,从而实现更精细的温度控制。变压器容量为15kVA,能够确保系统在高负载下的稳定运行。

控制核心选用欧姆龙E5CC智能温控仪表。该仪表支持32区控制,集成了PID算法与自整定功能。通过实时比对设定值与实测值,温控仪表能够快速调整控制策略,确保模具温度始终保持在设定范围内。此外,温控仪表还具有高精度、高稳定性和易于操作等优点,为系统的温度控制提供了有力保障。

执行机构由固态继电器组和微型断路器组成。固态继电器负责通过相位角控制调整加热器功率,实现温度的精准调

节。与传统继电器相比，固态继电器具有响应速度快、无触点、寿命长等优点，能够显著提高系统的可靠性和稳定性。微型断路器则提供过载保护功能，当电流超限时能够在 0.1s 内切断电路，确保系统安全。

传感网络采用 K 型热电偶进行温度测量。热电偶具有高精度、高稳定性和广泛的测温范围等优点，能够满足镁合金铸造过程中对温度测量的高精度要求。分布式布置在模具各个加热区的热电偶能够实时监测模具温度，并将数据传输至温控仪表进行处理。为了提高温度测量的准确性和可靠性，每加热区配置了 2 个冗余测温点。

2.2 工作流程

新型温控装置的工作流程主要包括温度采集、信号处理、功率调节和安全保护四个步骤。

在温度采集阶段，热电偶实时监测模具 6 个分区的温度，并将数据传输至温控仪表。温控仪表接收到温度数据后，进行信号处理。通过比对设定值与实测值，温控仪表根据 PID 算法生成 PWM（脉冲宽度调制）控制信号。

在功率调节阶段，固态继电器接收到 PWM 信号后，通过相位角控制调整加热器功率。通过不断调节加热器功率，系统能够实现模具温度的精准控制。当模具温度接近设定值时，系统会降低加热器功率，以避免温度超调；当模具温度低于设定值时，则会增加加热器功率，以加快升温速度。

在安全保护方面，微型断路器在电流超限时能够在 0.1s 内切断电路，防止设备损坏和火灾等安全事故的发生。此外，系统还设置了过温保护和短路保护等功能，进一步提高了系统的安全性和可靠性。

3. 关键技术创新

3.1 三相负载均衡策略

通过选择开关动态切换变压器副边绕组接线方式，实现三相负载均衡。具体分为两种模式：

模式 I（Y 型接法）：适用于低功率需求阶段，如预热期或保温期，可有效降低三相不平衡度。

模式 II（ Δ 型接法）：满足快速升温期的大电流需求，确保加热器能够迅速达到设定功率。

实测结果表明，该策略可将三相不平衡度从 15% 降至 3% 以下，显著提高系统的稳定性和效率。

3.2 多模态 PID 控制

温控仪表内置三种控制策略，以适应不同的工作阶段：

预热期：采用模糊 PID 控制，具有强抗干扰能力，能够快速响应温度变化。

稳态期：采用自适应 PID 控制，根据实时温度数据自动调整 PID 参数，实现超调量 < 1% 的精准控制。

异常工况：进入安全模式，强制降功率 50%，以保护模具和加热器免受损坏。

3.3 热惯量补偿算法

针对镁合金模具的热响应特性，建立温度-功率传递函数模型，采用前馈补偿消除加热延迟影响。通过该算法，系统能够实现 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的动态跟踪精度，显著提高温度控制的稳定性和准确性。

4. 实验验证

4.1 测试条件

模具：汽车转向支架（尺寸 $600 \times 400 \times 150\text{mm}$ ）。

材料：AZ91D 镁合金。

对比组：传统电阻炉加热系统。

4.2 性能数据对比

指标	传统系统	本装置	提升幅度
温度均匀性（ $^{\circ}\text{C}$ ）	± 25	± 3.5	86%
达到设定温度时间（min）	28	12	57%
单件能耗（ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ）	4.7	3.6	23%
月均废品率	11.2%	0.9%	92%

对比组采用传统电阻炉加热系统。该系统采用单点温控方式，温度均匀性较差，且加热器响应延迟较大。通过与传统电阻炉加热系统的对比，可以更加直观地评估新型温控装置的性能和效果。

实验结果表明，新型温控装置在温度均匀性、达到设定温度时间、单件能耗和月均废品率等方面均优于传统系统。具体而言，新型温控装置的温度均匀性为 $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$ ，相比传统系统的 $\pm 25^{\circ}\text{C}$ 有了显著提高；达到设定温度时间从 28 分钟缩短至 12 分钟，提高了生产效率；单件能耗从 $4.7\text{kW} \cdot \text{h}$ 降低至 $3.6\text{kW} \cdot \text{h}$ ，降低了能耗成本；月均废品率从 11.2% 降低至 0.9%，显著提高了产品质量和一致性。

4.3 典型应用案例

某新能源汽车零部件厂应用本系统后，取得了显著成效：

模具温度控制精度：提升至 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ （原 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ ），显著提高了产品的尺寸精度和表面质量。

产品孔隙率：从 3.1% 降至 0.7%，产品性能得到显著提升。

年节约废品处理成本：约 180 万元，经济效益显著。

5. 系统优势与详细分析

5.1 系统稳定性与可靠性

新型温控装置通过多区域独立调控和闭环温度控制系统，显著提高了模具温度的稳定性。传统系统中，由于单点温控的局限性，模具各区域温度差异较大，容易导致产品出

现冷料、飞边等缺陷。而新型温控装置采用分布式布置的热电偶和智能温控仪表,实现了对模具各区域的精准温度控制。通过实时采集和处理温度数据,系统能够根据模具温度的变化情况及时调整加热器功率,从而确保模具温度始终保持在设定范围内。这种多区域独立调控的方式有效消除了温度差异,提高了产品的质量和一致性。

同时,新型温控装置采用了固态继电器和微型断路器等高质量元器件,确保了系统的可靠性和安全性。固态继电器具有响应速度快、无触点、寿命长等优点,能够有效避免传统继电器因触点磨损而引发的故障。微型断路器则提供了过载保护功能,当电流超限时能够迅速切断电路,防止设备损坏和火灾等安全事故的发生。这些高质量元器件的应用进一步提高了系统的稳定性和可靠性。

5.2 节能效果与经济效益

新型温控装置通过三相负载均衡策略和热惯量补偿算法,显著提高了系统的能效。三相负载均衡策略通过动态切换变压器副边绕组接线方式,实现了三相电流的均衡分配。在低功率需求阶段,系统采用 Y 型接法,可有效降低三相不平衡度,减少线路损耗和设备发热量;在高功率需求阶段,则采用 Δ 型接法,确保加热器能够迅速达到设定功率,提高升温速度。这种三相负载均衡策略不仅提高了系统的稳定性,还降低了能耗成本。

热惯量补偿算法则通过前馈补偿消除加热延迟影响,提高了温度控制的准确性和稳定性。通过该算法,系统能够实现 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的动态跟踪精度,减少了不必要的能量浪费。这种热惯量补偿算法的应用进一步提高了系统的能效和经济效益。

实验数据表明,新型温控装置相比传统系统单件能耗降低了 23%,月均废品率降低了 92%。以某新能源汽车零部件厂为例,该厂在应用新型温控装置后实现了年节约废品处理成本约 180 万元的经济效益。此外,由于产品质量的提升和生产效率的提高,该厂还获得了更多的订单和市场份额,进一步提升了企业的竞争力。这些成效充分证明了新型温控装置在节能效果和经济效益方面的优势。

参考文献

- [1]李中华.一种高精度智能温控装置的研究[J].计算机测量与控制,2003,11(7).
- [2]蒋栋林.热流道全封闭温控装置在环保设备的应用[J].设备管理与维修,2021(22).
- [3]陶德馨,严云福,董达善,张德文.工程机械手册:港口机械[M].清华大学出版社有限公司,2017.
- [4]李洋,马立峰,姜正义,等.镁合金温控轧辊的温度场[J].稀有金属材料与工程,2019,48(7).
- [5]胡雄心,彭廷红,潘柏松,等.基于纯滞后补偿技术的镁合金熔炉温控系统设计与实现[J].机械设计与制造,2011(3).

5.3 可扩展性与智能化发展

新型温控装置具有良好的可扩展性和智能化发展潜力。目前,装置已经支持 32 区控制,可以满足大多数镁合金铸造模具的温度控制需求。未来,随着技术的不断进步和市场需求的变化,装置可以进一步扩展控制区域数量,提高温度控制的精度和范围。

同时,装置还可以与其他智能化设备和技术进行集成和融合,如基于数字孪生的温度场预测技术、碳化硅功率器件的高频驱动方案等。这些技术的应用将进一步提升装置的性能和功能,为镁合金铸造行业带来更多的创新和发展机遇。

6.结论与展望

本文设计的新型温控装置通过多区域独立调控、三相负载优化及智能控制算法,显著提升了镁合金铸造模具的温度控制精度。实验结果表明,该装置在温度均匀性、达到设定温度时间、单件能耗和月均废品率等方面均优于传统系统,为高精度镁合金铸造提供了可靠解决方案。

未来研究方向包括:

基于数字孪生的温度场预测技术:利用数字孪生技术建立模具温度场的虚拟模型,通过实时监测和数据分析预测模具温度变化趋势,为温控装置提供更精准的控制策略。

碳化硅功率器件的高频驱动方案:碳化硅功率器件具有高频、高效、耐高温等优点,将其应用于温控装置中可以进一步提高系统的响应速度和能效。

与压铸机主控系统的深度集成:将温控装置与压铸机主控系统进行深度集成,实现信息共享和协同控制,提高生产过程的自动化和智能化水平。

综上所述,新型温控装置在镁合金铸造行业具有广泛的应用前景和发展潜力。随着技术的不断进步和市场需求的变化,相信该装置将为镁合金铸造行业带来更多的创新和发展机遇。