

摩擦与润滑

## 锻造石墨喷雾自动配比系统设计

丁宵月, 张 南

(中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 针对计量泵由于本身结构和石墨溶液物理特性限制所导致的无法长时间正常使用及价格昂贵的问题, 设计了一种通过液位计以及折光仪判断浓度的锻造石墨喷雾自动配比系统, 利用液位计实现了墨与混合溶液的体积配比, 同时利用折光仪实时监控石墨溶液浓度。此设计能够排除人工配比干扰, 有效地避免了现有控制方式伴随的问题, 即使在长时间运行后也不会造成硬件损坏。并且利用配比后的浓度检测以及浓度微调功能, 将配比浓度完全控制在设定的浓度范围内。同时具有非常好的可兼容性, 便于衔接各种不同的喷雾系统。相较以往的配比系统更稳定、更实用、更具优势。

**关键词:** 锻造自动化; 石墨喷雾; 浓度控制; 自动配比; 液位计

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.028

**中图分类号:** TB472; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 03-0193-08

### Design on automatic proportioning system for graphite spray in forging

Ding Xiaoyue, Zhang Nan

(Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd. CAM, Beijing 100083, China)

**Abstract:** For the problems that the metering pump could not be used normally for a long time caused by the limitation of its structure and the physical properties of graphite solution and the expensive price of metering pump a graphite spray automatic proportioning system in forging that judged the concentration by liquid level sensor and refractometer was designed, namely, the liquid level sensor was used to realize the volume ratio of graphite and mixed solution, at the same time, the refractometer was used to monitor the concentration of graphite solution in real time. Then, this system could eliminate artificial proportioning interference, effectively avoid the problems associated with the existing control mode, and do not cause the hardware damage even after long-term operation. Furthermore, this system uses the concentration detection and concentration fine-tuning function after the proportioning to completely control the proportioning concentration within the set concentration range. At the same time, it has very good compatibility, which is convenient for connecting various spray systems. Compared with the previous proportioning system, it is more stable, more practical and more advantageous.

**Key words:** forging automation; graphite spray; concentration control; automatic proportioning; liquid level sensor

在锻件锻造成形的过程中, 石墨润滑剂的作用是隔离工件和模具表面, 防止金属粘连, 保证产品质量, 减少模具磨损。通过润滑可减小摩擦力和变形力, 使模具受力较小。同时, 润滑剂具有热绝缘性能, 可保护模具, 避免因热传导而使坯料变冷, 有助于工件脱模, 减少工件与模具的接触时间。随着锻造自动化水平的不断提高, 自动锻造喷雾润滑装置成为锻造自动化的重要一环, 在实现自动化的同时对其喷涂的稳定性和可靠性提出了越来越高的要求, 而每件产品在生产时喷涂的石墨浓度是否一致直接影响了喷涂的效果。因此, 石墨喷涂系统中

的自动石墨配比功能尤为重要。

### 1 自动石墨配比功能的作用

在以往较落后的锻造生产过程中, 石墨喷涂一般采用人工方式进行, 即操作人员以经验为标准, 利用传统的手动喷枪完成生产中的石墨喷涂过程。随着自动化生产线的普及, 自动喷涂系统已经相对成熟, 完全可以代替人工方式进行工作, 并且可以保证石墨的喷涂量以及喷涂节拍的一致性<sup>[1-2]</sup>。

但是, 在喷涂量与节拍一致性得到自动化保证的同时, 喷涂系统中石墨溶液的浓度比例调配在绝大部分情况下仍由人工完成。人工配比石墨溶液的制作方式是操作人员按照经验将定量原液与定量溶剂进行混合, 并通过手持浓度计来判断浓度情况。

收稿日期: 2022-04-03; 修订日期: 2022-07-10

作者简介: 丁宵月 (1986-), 男, 学士, 工程师

E-mail: berserker\_ding@163.com

这样很难保证每次配比的石墨溶液浓度的一致性,当浓度不一致时,即使是利用自动化喷涂设备,也无法保证批量生产时每件产品的喷涂效果的一致性。因此,自动喷涂系统中的自动配比功能应运而生。

自动配比功能通过将石墨原液与溶剂自动地定量混合,将配比过程中的人为因素排除掉,以此来保证多次配比后石墨浓度的一致性,更好地提高批量化生产的稳定性和可靠性<sup>[3-4]</sup>。

## 2 采用计量泵的自动配比系统

目前,国际上对于自动配比系统的设计均采用计量泵输送的方式,即通过计量泵的设置,将所需固定量的石墨以及固定量的溶剂分别加入混合罐中,再通过搅拌器将其搅拌均匀。

### 2.1 计量泵的简介

计量泵通过可调节行程的柱塞的往复运动来控制流量,随着柱塞在液缸内的往复运动,吸、排阀组交替启闭,液体被不断吸入和排出。在泵的吸入行程中,泵头液腔中形成负压,使进口阀打开,液体流入缸腔;在排出行程中,柱塞的移动在液体上增加了压力,使出口阀打开,将液体排出<sup>[5-6]</sup>。图 1 为计量泵的机构示意图。

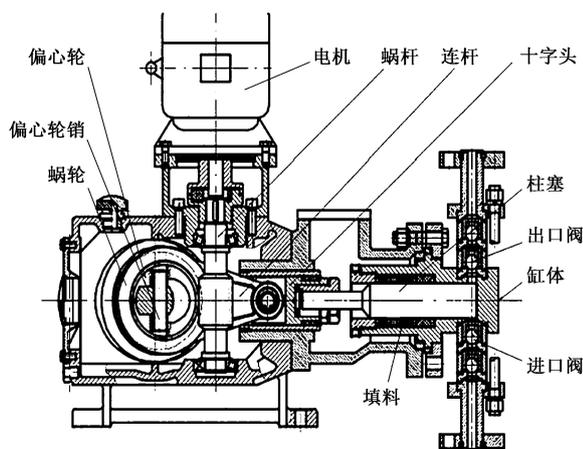


图 1 计量泵的机构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mechanism for metering pump

### 2.2 计量泵应用中的问题

在长期运行的生产过程中,即使是进口计量泵也会在不断的运行过程中逐渐失去计量精度或损坏,并最终导致石墨溶剂浓度的不可控。而这种不可控并非计量泵本身老化造成的,而是由石墨溶剂的物理特性以及计量泵的结构特点决定的。

首先,石墨溶剂是一种石墨颗粒的悬浮溶剂,

它本身是一种极其有效的研磨溶剂,而计量泵的定量输送功能主要由其内部的柱塞实现,当石墨溶剂通过计量泵时,注定会对柱塞本体进行研磨,因此在长时间的使用后,计量泵的定量输送功能必然会被破坏;其次,石墨溶剂有易挥发、易结晶的特性,这种物理特性注定系统在停止工作一段时间后,计量泵内部结构中会附着结晶后的石墨颗粒,而此结晶过程是完全不可逆的物理现象,从而导致整个配比系统在实际应用时,停止工作一段时间后,再次启动的过程中计量泵会受到不可逆的损坏<sup>[7-8]</sup>。

而计量泵本身由于精度高,售价昂贵,但是在整个配比系统中由于其重要的作用又不可或缺,导致其成为一个价格高昂的消耗品。所以,本文设计了一种不利用计量泵,而是通过液位计、折光仪以及一套可编程控制器(Programmable Logic Controller, PLC)控制逻辑来实现的自动配比系统。

## 3 非计量泵供液的自动配比系统

由于目前绝大部分自动配比系统受到计量泵本身结构与石墨溶液物理特性的限制,无法保证长时间的正常使用,所以,需要一种利用非计量泵计量方式的配比系统来更好地实现自动配比的功能。在系统中利用配比罐中的溶液液面高度来确定加入的溶液体积,通过加入石墨和水溶剂后的液面高度变化来计算石墨溶液的配比比例,并在一次配比后根据测量得到的石墨溶剂的实际浓度进行微调,使最终的配比浓度保持在系统设定的石墨浓度阈值内,由此来保证石墨浓度的稳定性和一致性。在此系统中,采用导向脉冲式液位计对配比罐中的液面高度进行测量,采用反射式折光仪对配比后的石墨溶液浓度进行测量,采用一套专用 PLC 程序对自动配比系统进行控制,下面对整个系统进行详细介绍。

### 3.1 导向脉冲式液位计

如图 2 所示,导向脉冲式液位计的原理是通过向导探针传递脉冲信号,并接收液面反射的脉冲信号,根据脉冲信号发出到返回的时间来检测液位。如果设检测距离为  $L$ ,从信号发出到返回的时间为  $T$ ,光速为  $C$ ,即可以通过式(1)求出检测距离。液位信号通过模拟量的形式直接通过 PLC 接收。

$$L = 1/2 \times TC \quad (1)$$

此种液位计具有抗污垢、抗波浪的特点,即使

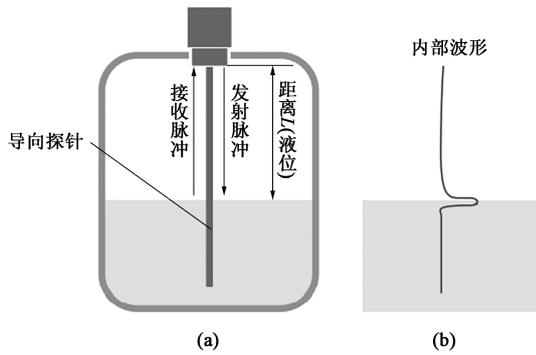


图 2 导向脉冲式液位计的原理图

(a) 工作方式 (b) 导向脉冲接触液面时的内部波形

Fig. 2 Principle diagrams of guiding pulse liquid level sensor

(a) Operating mode (b) Internal waveform of guide pulse when touching liquid level

由于长时间停产导致感应部位上附着石墨结晶体，也不会发生误检测，并且容器内的搅拌旋桨使石墨溶液液面产生波浪，仍可稳定检测，不会发生误检测。从根本上解决了配比罐中液位的检测问题。

### 3.2 反射式折光仪

反射式折光仪的原理是利用光的折射现象以及折射率因浓度而变化的特性，令测量仪器内部的光源发出的光透过棱镜，穿过棱镜表面到达被测样品，反射后再次透过棱镜被传感器接收，然后将感光信号转换为折射率，根据折射率的变化确定浓度<sup>[9-10]</sup>。浓度信号通过模拟量的形式直接通过 PLC 接收。

折光仪普遍应用在制造饮料、药品等液体产品的工厂，产品原料要经过多道工序加工，如榨汁、过滤、蒸煮、稀释、调和和发酵等。而锻造中的石墨配比属于溶液的稀释过程，所以，可以利用折光仪来检测石墨溶液配比后的浓度<sup>[11-12]</sup>。

要注意的是，由于石墨溶液易结晶的物理特性，在使用折光仪的同时必须在液体管路中增加超声波或者高压水清洗功能。

### 3.3 液压部分设计

液压部分主要分为供液部分和配比部分。供液部分的液压原理图如图 3 所示，其主要负责石墨原液的储存、搅拌和输送，由原液桶、原液泵和搅拌器组成。在桶内有原液的情况下搅拌器不停旋转，保证石墨原液不会沉淀凝固，当配比功能启动时，原液泵由系统控制将石墨原液输送至配比罐中。

配比部分的液压原理图如图 4 所示。配比部分主要负责将系统设定比例的水与石墨原液混合搅拌均匀，由配比罐、进水管路、石墨原液管路、搅拌器、

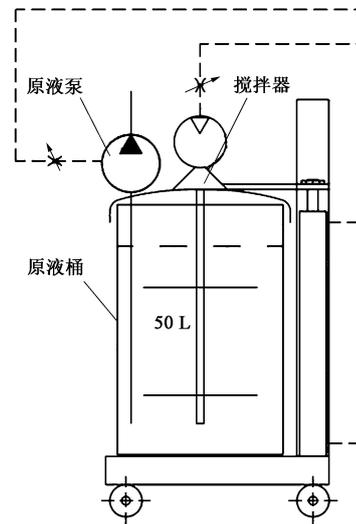


图 3 供液部分液压原理图

Fig. 3 Hydraulic principle diagram of liquid supply part

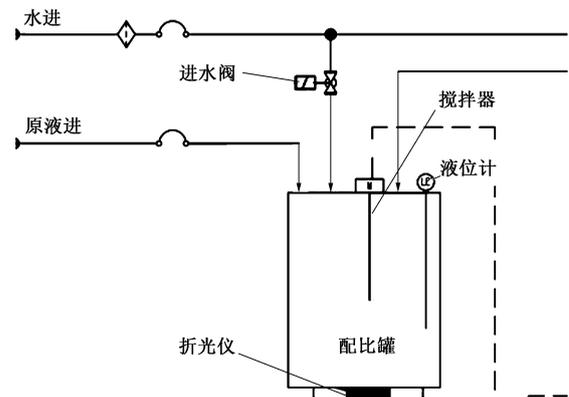


图 4 配比部分液压原理图

Fig. 4 Hydraulic principle diagram of proportion part

液位计以及折光仪组成。当系统开始自动配比时，系统根据液位的比例运算先后将水与石墨原液按照计算得到的液位高度输送至配比罐中，并通过搅拌器的不停搅拌达到均匀状态，在需要使用时，配比完成的溶液通过管路进入使用单元的储液罐中待使用。

### 3.4 电器硬件设计

控制系统电器部分采用西门子 1200 系列 CPU、模拟量输入模块、液位传感器、折光仪、24 V 继电器以及气压液压阀。模拟量输入部分的电器原理图如图 5 所示，液位计以及折光仪的电源与公共端分别接入电源 24 V 与 com 端，模拟量输出信号接入模拟量模块 AI2+与 AI3+输入端。

PLC 输出部分的电器原理图如图 6 所示，系统根据逻辑运算将水和石墨的输送以及搅拌器的启停通过 PLC 输出信号控制 24 V 继电器线圈 KA101、KA102、KA103、KA104 进行动作。

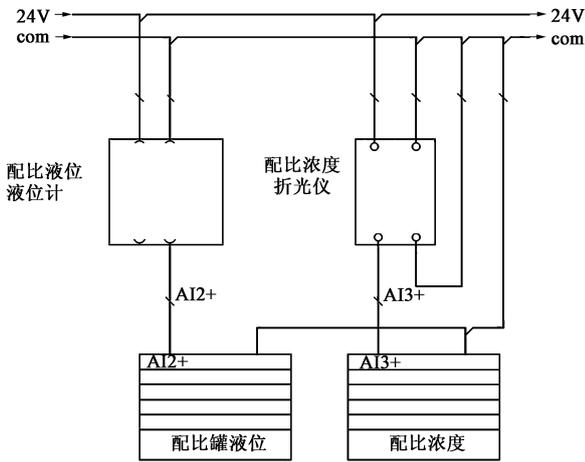


图 5 模拟量输入部分的电器原理图

Fig. 5 Electrical principle diagram of analog quantity input part

气压液阀部分的电器原理图如图 7 所示，系统中原液输送泵以及搅拌器均通过气阀提供的气压控制，配比罐进水通过电磁水阀直接控制。系统根据运算通过 PLC 控制相应继电器线圈 KA101、KA102、KA103、KA104 的动作，继电器触点吸合直接控制气阀与液阀 YV1、YV2、YV3、YV4 的动作。

### 3.5 软件设计

自动配比系统软件设计分为程序逻辑以及人机界面交互部分，本系统使用西门子博图 V16 软件对程序逻辑以及人机界面进行编写。

#### 3.5.1 程序逻辑的设计

首先，为了使系统具有可以接入不同喷雾系统的兼容性，并且能够简化整体系统的调试过程，此

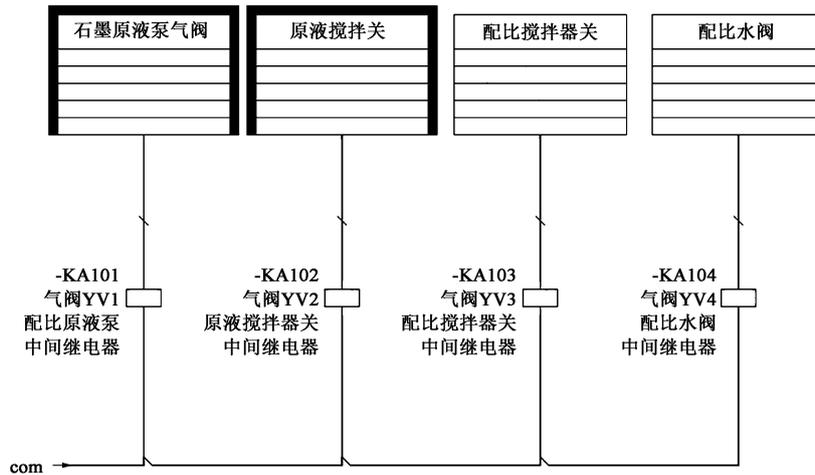


图 6 PLC 输出部分的电器原理图

Fig. 6 Electrical principle diagram of PLC output part

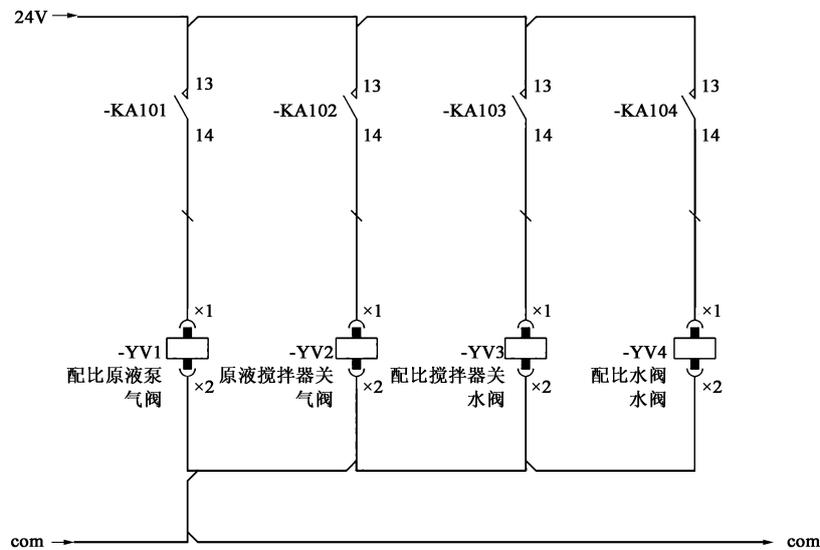


图 7 PLC 气压液阀电器原理图

Fig. 7 Electrical principle diagram of PLC pneumatic and hydraulic valve

设计将逻辑部分以功能块的方式尽量做到了标准化，如图 8 所示。



图 8 自动配比功能块

Fig. 8 Automatic matching function blocks

在程序中可以通过对功能块输入管脚以及输出管脚的定义来控制整个自动配比系统的动作、报警和状态输出等。

(1) 输入部分的核心控制管脚包括：石墨占比、水占比、折光仪输入、储液罐和配比罐的液位输入以及液位设定值。石墨和水的占比用来输入人机界面设置的比例参数；折光仪输入和液位计输入用来输入传感器信号，输入信号后功能块内部会进行标准化处理，将其转换为实际浓度百分比和实际液位值；储液罐和配比罐的各种液位设定值用来控制系统启动自动配比的时刻，以及在什么时候将配比罐中已经搅拌均匀的溶液输送至喷雾设备使用。

(2) 输出部分的核心控制管脚包括：原液泵输出、补液阀、配比水阀以及配比实际液位和实际浓度百分比。原液泵、补液阀、水阀分别控制系统中带动电磁阀动作的继电器；实际液位与实际浓度则作为标准化后的实际值输出至人机界面。

在整个功能块中，系统根据设定石墨与水的比例进行的运算是整个自动配比系统的核心。功能块内部配比运算程序梯形图如下。

(1) 首先，将配比罐中配比完成的溶液输送至喷雾机构的补液程序，如图 9 所示，当系统中储液罐的实际液位低于开始补液的设定液位，并且配比罐的实际液位高于配比结束的设定液位时，配比补液信号置位，泵站配比罐中已配比完成的石墨溶液会被输送至喷雾机构中，直至储液罐中的实际液位高于完成补液的设定液位值时，补液停止。

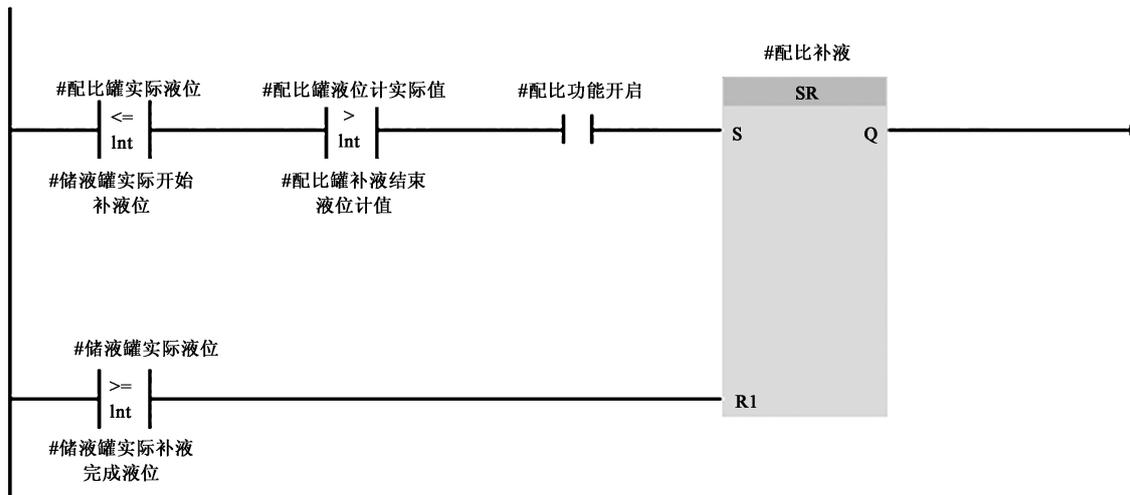


图 9 补液程序

Fig. 9 Fluid infusion program

(2) 当完成一次配比罐向喷雾机构补液之后，系统开始计算实现目标浓度需向配比罐中加入的石

墨原液高度，计算程序如图 10 所示，先通过配比补液结束的信号启动自动配比过程，同时计算出配比

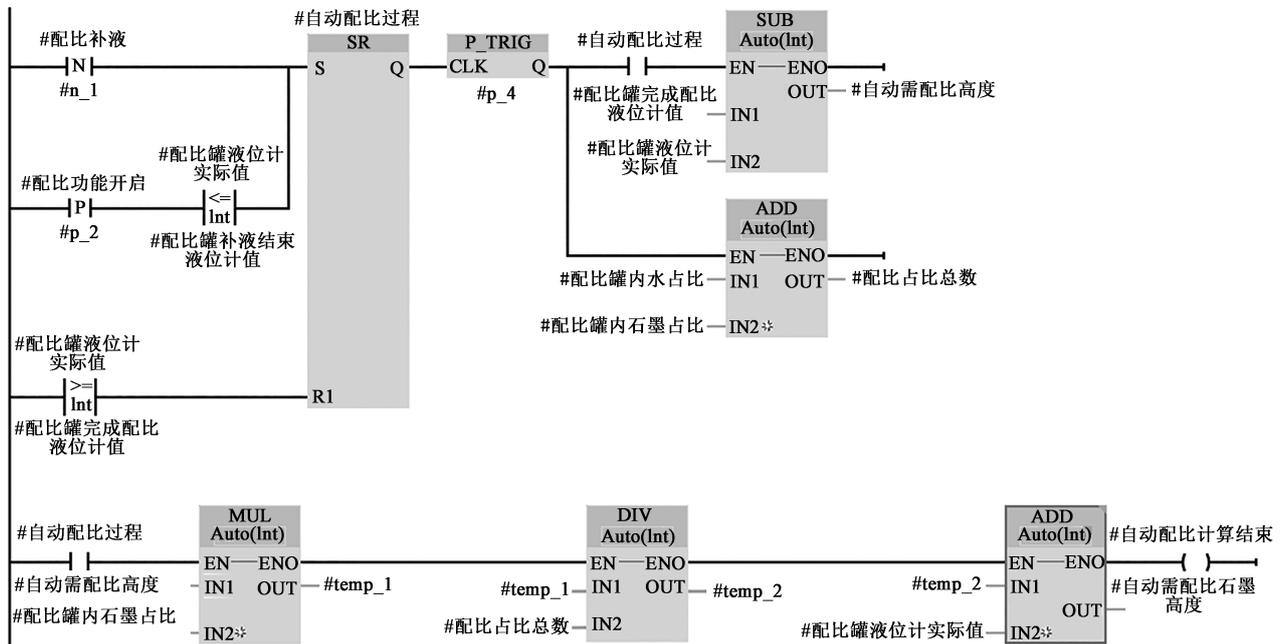


图 10 运算程序

Fig. 10 Operation programs

罐中需要补充的液位高度以及水和石墨加在一起的总占比。然后根据已知的需配比的液位高度与石墨和整体溶液的占比关系，通过简单的乘除法运算可以得到在配比罐中需要加入的石墨原液的液位高度。

(3) 当计算出需要加入的石墨的液位高度后，系统根据液位变化控制石墨原液泵以及进水阀的动作，输出控制程序如图 11 所示，运算程序完成后启动石墨原液泵，向配比罐中加入石墨原液，当石墨原液加至之前计算得到的需补充的石墨高度时，关闭石墨泵，同时打开配比水阀，向配比罐中加入水直至液面到达配比完成的设定液位时关闭。这样一次自动配比的过程就完成了。

由于每次配比启动均在刚刚向储液罐补液之后，所以在配比过程结束后，系统有足够的时间通过配比罐中的搅拌器不断搅拌，令配比溶液变得均匀。而当石墨溶液逐渐均匀后，配比罐下方安装的折光仪的输出也会逐渐趋于稳定，这样就可以在每次自动配比的过程中检测所配石墨溶液的浓度，通过人机界面的显示可以随时观察配比系统的运行状态。

根据折光仪稳定后的检测数值，系统可以判断本次自动配比结果是否满足初期的浓度设定要求，如偏差超出稳定范围可以通过程序逻辑再次进行微调处理，使系统配比的最终浓度更加接近设定值，浓度微调程序如图 12 所示。当折光仪的信号稳定后，比较系统实际浓度与标准浓度（通过系统设定的喷雾所需的浓度）的上限和下限的关系，当实际

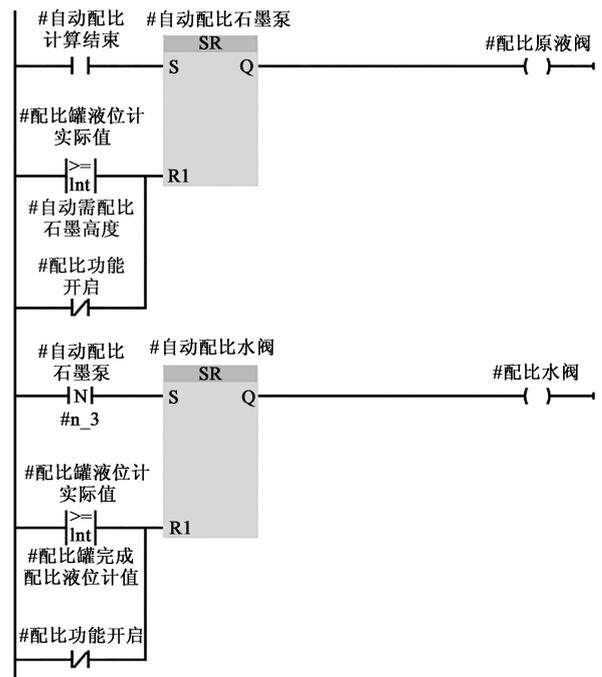


图 11 输出控制程序

Fig. 11 Output control program

浓度大于标准浓度上限超过 3 min，说明系统石墨的加入量偏多，此时向配比罐中加水 1 s，搅拌 3 min 后如果实际浓度仍超过标准浓度上限，那么继续向配比罐中加水 1 s，直至配比浓度低于标准浓度上限；同理，当实际浓度小于标准浓度下限超过 3 min，说明系统中水的加入量偏多，此时向配比罐

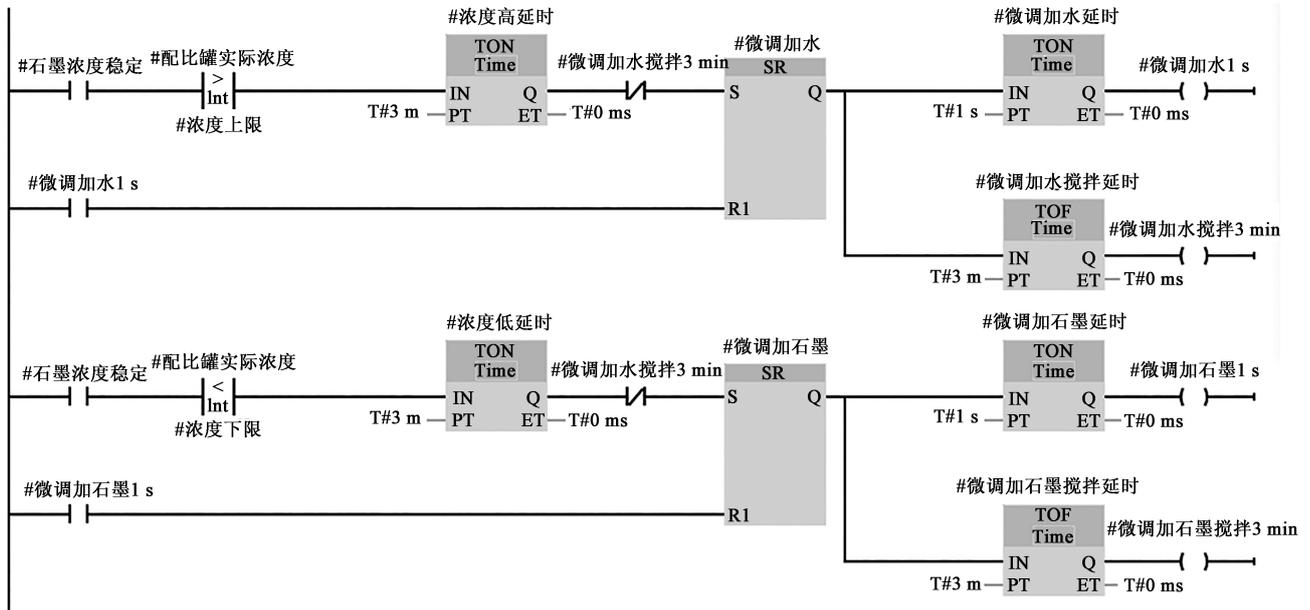


图 12 浓度微调程序

Fig. 12 Fine-tuning program of concentration

中加石墨原液 1 s，搅拌 3 min 后，如果实际浓度仍小于标准浓度下限，那么继续向配比罐中加石墨原液 1 s，直至配比浓度高于标准浓度下限。利用此功能，可以在实际配比过程中不停地进行配比微调，使自动配比的石墨浓度无限接近于标准浓度阈值，并且可以避免由于长时间搅拌而出现的溶液挥发而造成的浓度不准确的问题。

### 3.5.2 人机界面的设计

为了能够更加直观地查看配比系统的状态以及设定部分参数，系统配有专用的人机交互界面，如图 13 和图 14 所示。图 13 为配比罐的状态界面，从界面中可以看出石墨与水的比例设定、配比罐以及储液罐的实际液位、从配比罐输送至储液罐的石墨

溶液的浓度百分比，通过此界面可以直观地看到配比罐的整体状态。图 14 为配比参数的设定界面，可以直接通过点击界面设定系统所需的所有参数。

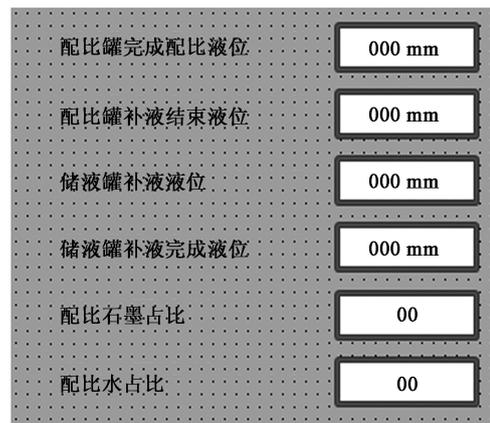


图 14 配比参数设定界面

Fig. 14 Setting interface of proportioning parameters

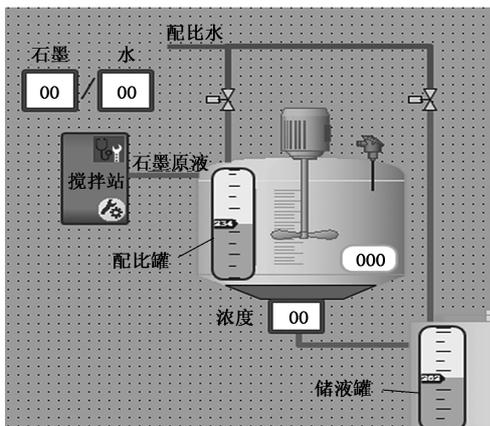


图 13 配比罐的状态界面

Fig. 13 State interface of proportioning tank

### 3.5.3 系统优势

此系统通过液位计测量液面高度和折光仪检测浓度的控制方式完全替代计量泵计量传输的方式，从根本上解决了计量泵价格高、容易损坏的缺陷。在实际应用中通过液位计高度来计算浓度的方式已经基本可以保证自动配比浓度的稳定性，同时加入折光仪检测及微调补偿的功能使整套系统能够将溶液挥发以及液位波动带来的误差减至最小。使自动配比浓度完全控制在设定的浓度区间内，保证了实际生产中整个喷雾系统的稳定性。

系统通过标准化的程序块编程方式,使其能够标准化衔接各种喷雾系统,通过人机界面可以更加直观地观测整个系统的状态以及设定系统所需的参数。

## 4 结语

自动锻造喷雾装置目前已成为锻造自动化的关键装置,而自动配比系统亦是目前锻造喷雾自动化的技术难点之一。设计合理、运行稳定的自动配比系统能够很好地提高锻造自动化的稳定性。本文提出的自动配比系统在排除了人工因素导致的配比浓度误差的同时,有效地避免了当下配比系统易损坏而无法长期保证精度的问题;配合了当今锻造厂的维护能力以及生产习惯,更加适合我国锻造产业的生产特点和使用需求。

随着不断的实验和改进,此自动配比系统已经比以往市面大部分系统有了长足的进步,相信随着技术的进步和研究的继续深入,此自动配比系统能够越来越较好地应用于锻造自动喷雾中。

### 参考文献:

- [1] 乔宁宁,王佳琪. 锻造对热锻模具钢高温性能的影响 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 19-24.  
Qiao N N, Wang J Q. Influence of forging on high temperature properties for hot forging die steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 19-24.
- [2] 刘成杰. 脱模剂自动喷涂机在齿轮精锻生产线中的应用 [J]. 金属加工, 2013, 19 (9): 14-15.  
Liu C J. Application of release agent automatic spray machine in gear forging production line [J]. MW Metal Forming, 2013, 19 (9): 14-15.
- [3] 柴光远,王晓丽. 基于模糊控制的乳化液自动配比系统 [J]. 机床与液压, 2004, 6 (3): 73-74.  
Chai G Y, Wang X L. The automatic mixing system of emulsion based on fuzzy control [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2004, 6 (3): 73-74.
- [4] 赵四海,王琦,刘志强. 国内乳化液浓度检测与自动配比技术研究进展 [J]. 工矿自动化, 2012, 38 (8): 30-35.  
Zhao S H, Wang Q, Liu Z Q. Research progress of detection and automatic matching technique for emulsion concentration [J]. Journal of Mine Automation, 2012, 38 (8): 30-35.
- [5] 唐凯. 定量泵的研究与应用 [J]. 信息技术, 2007, 10: 153-156.  
Tang K. Research and application of ration pump [J]. Information Technology, 2007, 10: 153-156.
- [6] 彭勇刚,韦巍. 伺服电动机直接驱动定量泵液压系统在精密注塑中的应用及其控制策略 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (2): 173-179.  
Peng Y G, Wei W. Application and control strategy of servo motor driven constant pump hydraulic system in precision injection molding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (2): 173-179.
- [7] 安海骄,张璋. 柱塞式计量泵校准方法的研究 [J]. 自动化与仪表, 2021, 36 (7): 69-71, 95.  
An H J, Zhang Z. Research of calibration method for flow of plunger metering pump [J]. Automation & Instrumentation, 2021, 36 (7): 69-71, 95.
- [8] 覃科人,孙杰,金珊,等. 对影响计量泵精度和耐磨性因素的理论研究 [J]. 石油化工应用, 2007, (4): 24-26.  
Qin K R, Sun J, Jin S, et al. Theoretical study of the influence the metering pump precision and the wear resistant factor [J]. Petrochemical Industry Application, 2007, (4): 24-26.
- [9] 刘香斌,吴月艳. 高精度数字折光仪 [J]. 计量科学与技术, 2007, (10): 9-10.  
Liu X B, Wu Y Y. High precision digital refractometer [J]. Metrology Science and Technology, 2007, (10): 9-10.
- [10] 莫莉萍,李忠彦,秦贯丰,等. 自动折光仪光学系统设计 [J]. 分析仪器, 1997, (4): 40-43.  
Mo L P, Li Z Y, Qin G F, et al. Design of optical system of an automatic refractometer [J]. Analytical Instrumentation, 1997, (4): 40-43.
- [11] 张克俭. 折光仪在测定水性介质浓度上的应用 [J]. 机械工人, 2005, (11): 30-32.  
Zhang K J. Application of refractometer in determination of water medium concentration [J]. MW Metal Forming, 2005, (11): 30-32.
- [12] 袁桂明. 智能型数字折光仪的设计与实现 [J]. 海峡科学, 2007, (2): 58-59  
Yuan G M. Design and realization of intelligent digital refractometer [J]. Straits Science, 2007, (2): 58-59

