

抽水蓄能电站水工隧洞高压化学灌浆设备研究

张慧^{1,2}, 李珍^{1,2}, 陈亮^{1,2}, 梁垒^{1,2}, 邵晓妹^{1,2}

(1. 武汉长江科创科技发展有限公司, 武汉 430010;

2. 长江科学院, 武汉 430010)

摘要: 抽水蓄能电站水道系统的高压水工隧洞普遍存在围岩及混凝土缺陷, 其引起的失稳与破坏都将对工程造成重要甚至是灾难性的影响。针对抽水蓄能电站高压化学灌浆的需求, 研发基于抽水蓄能电站的高压化学灌浆泵。该泵采用 AVR 嵌入式系统进行全工况压力自动控制, 高压灌浆升压迅速稳定, 人性化操作界面, 有效发挥浆材作用, 施工效率高, 满足高压化学灌浆防渗补强的施工需求。

关键词: 抽水蓄能; 化学灌浆; 化学灌浆泵; 高压

中图分类号:

文献标志码: A

Research on high pressure chemical grouting pump of Pumped Storage Power Station

Zhanghui^{1,2}, Lizhen^{1,2}, Chenliang^{1,2}, Lianglei^{1,2}, Shaoxiaomei^{1,2}

(1. Wuhan Changjiang KeChuang Technology Development Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The surrounding rock and concrete defects are common in the high-pressure hydraulic tunnel of the water channel system of the pumped storage power station, and the instability and damage caused by them will have an important or even catastrophic impact on the project. According to the demand of high-pressure chemical grouting in pumped storage power station, the high-pressure chemical grouting pump based on pumped storage power station is developed. The pump adopts AVR embedded system for automatic pressure control under all working conditions, high-pressure grouting pressure rise is rapid and stable. The humanized operation interface of the pump can effectively play the role of slurry material and has high construction efficiency. The pump can meet the construction requirements of high-pressure chemical grouting for seepage prevention and reinforcement.

Key words: Pumped storage; Chemical grouting; Chemical grouting pump; High pressure

0 引言

随着我国抽水蓄能电站建设的蓬勃发展, 电站的防渗补强与长期安全稳定运行是目前迫切需要解决的关键技术难题^[1]。抽水蓄能电站地形地质条件和赋存环境较为复杂, 常遭遇破碎带、蚀变围岩等不良地质体, 不可避免的会遇到高水压力和高地应力的影响。以花岗岩岩性为主的围岩中一般存在蚀变带, 如广蓄、深蓄和清蓄等抽水蓄能电站的高压

水工隧洞围岩中, 岩体强度低, 围岩变形大, 渗透系数极低。电站运行中面临高水头的长期作用, 存在较大渗透破坏风险, 对水工建筑物的稳定和长期安全提出严峻挑战。

针对抽水蓄能电站水道系统的高压水工隧洞普遍存在围岩及混凝土缺陷, 采用常规的普通水泥、湿磨细水泥灌浆往往难以达到设计要求, 化学灌浆是更为适用的技术手段。然而, 在如此高的水头下, 对复杂岩体的防渗补强处理技术难度大幅增加, 传

统化学灌浆技术难以完全满足其处理需求,主要存在以下技术瓶颈:高压动水条件下灌浆材料难以胶结,扩散范围难以控制,对低渗性不良地质体浸润渗透能力差以及缺少与之配套的专业施工设备、规范化施工工艺等,亟待开发更为高效的抽水蓄能电站的复杂岩体防渗补强系列化产品。

针对上述问题,项目组在新材料、新设备、新工艺等多个方面进行发明创新,如CW系高性能环氧树脂灌浆材料,CW100系新型化学灌浆泵等配套灌浆设备系统、不同工况水泥-化学复合灌浆施工工艺。本文介绍新设备的研究,即“全工况CW100系自控高压智能化学灌浆泵”。该泵针对抽水蓄能电站水工高压隧洞高压灌浆要求,满足水工建筑物地基及结构防渗补强的高压化学灌浆施工需求,灌浆压力10Mpa稳定控制,施工效率高。设备采用AVR嵌入式系统进行全工况压力自动控制,数字式彩色液晶屏显示,全工况压力自动控制,人性化操作界面,广泛适用于环氧树脂、聚氨酯等化学灌浆材料。满足现行化学灌浆施工规范技术要求,显著提高水工建筑物地基及结构防渗补强化学灌浆施工质量。

1 抽水蓄能电站概况

1.1 抽水蓄能电站

抽水蓄能电站利用负荷低谷时的电能将水抽至上水库,在负荷高峰时再放水至下水库发电,将电网负荷低谷时的多余电能,转变为电网负荷高峰时的高价值电能,在电力系统中发挥削峰、填谷、调频、调相、事故备用及启动等功能,在保障电网调峰的安全稳定和提高供电质量方面发挥重要作用^[2-3]。抽水蓄能技术向变速抽水蓄能和海水抽水蓄能方向发展^[4]。

1.2 复杂岩体

抽水蓄能电站受复杂技术、多变地形与地质条件的影响,建设难度大,建设周期长,施工环境复杂,其输水系统位于上、下水库间山体内,需兼顾抽水发电,机组淹没深,建设主体以洞室开挖支护为主,普遍存在围岩及混凝土缺陷,有破碎、裂隙、渗水现象^[5]。抽水蓄能电站的高压水道系统的渗漏问题包括:高水压力和高地应力影响导致高压隧洞出现大量渗漏;混凝土衬砌、高压固结灌浆带

等,增大渗流阻力,堵塞渗流通道。

对于抽水蓄能电站不良地质体,水泥-化学复合灌浆法更为适用^[6]。即先用水泥灌浆材料灌注,填充封堵大的裂隙及孔洞,为化学灌浆提供一个相对封闭、完整的受灌区域,同时提高错动带岩体的变形模量;再用化学灌浆材料施灌,利用化学浆液良好的渗透性和浸润性,填充水泥浆液难以达到的部位,并对微细裂隙和软弱断层岩体进行渗透固结,使地层形成一个密实、完整的受力体,达到加固和防渗的效果。被处理的岩体处在一定水压力作用下,灌浆工艺受到一定影响,涉及到灌浆压力、灌浆开灌条件、结束标准等参数设置,以及浆液的扩散范围和浆液在动水条件下的凝固性能,这些条件都影响到对不良地质体的防渗补强加固效果。需要针对被灌体岩性特征、水头压力、动水情况及浆液特性进行研究,寻找适用于下抽水蓄能电站不同不良地质体和灌浆工况的灌浆工艺参数和技术方案。高压化学灌浆补强处理提高抽水蓄能电站断层和破碎带防渗能力,增强岩体的均匀性、完整性和抗渗性,增加岩体的弹性模量。

2 化学灌浆概况

2.1 化学灌浆

化学灌浆是化学与工程相结合,解决地基和混凝土缺陷处理、防渗加固,保证工程的顺利进行或提高工程质量的一项工程技术,随着化学灌浆技术的发展和进步,现已成为现代工程中颇具特色且不可或缺的一项先进技术^[7]。目前我国化学灌浆技术不断创新,无公害、耐久性好、适应工程各种苛刻要求且价格低廉的化学灌浆浆材的开发、应用和推广。科创公司CW系列防渗补强、除险加固技术已成功应用于溪洛渡、向家坝、广东清蓄等重点水利水电工程,也可推广应用到交通、市政、建筑、桥梁和能源工程等行业,具有广阔的应用前景。

2.2 化学灌浆泵

化学灌浆设备是化学灌浆工程中的重要施工设备,其性能优劣、使用方法的正确与否,直接影响化学灌浆的质量^[8]。化学灌浆设备主要有制浆、储浆设备和化学灌浆泵,其中较为重要的是化学灌浆泵^[9]。从原始的简易手动泵,到机械传动、液压传

动、发展到电控系统和微机系统，再到大数据物联网系统，化学灌浆泵一直持续改进创新，不断满足现代工程对化学灌浆压力和流量的增长需求，为工程建设作出贡献。

由董建军，尹作仿等人研制发明的 HGB-1(2)型化学灌浆泵^[10]，泵体动作通过液压系统流量及压力的调节进行控制，泵体结构合理，使用方便，易清洗，为后续新型灌浆泵的研制提供了较为重要的参考价值。

由李珍，魏涛等人提出以步进电机为驱动的新型灌浆泵^[11]，利用步进电机带动丝杠螺母转动，驱动丝杠连同活塞直线运动，设备可操作及可控性强，适用于环氧树脂和聚氨酯的化学灌浆材料的基岩和裂缝施工，在化学灌浆领域得到广泛使用。

2.3 化学灌浆泵特点

化学灌浆泵包括泵体结构、密封管路系统、传动与控制、调速器、稳压系统。化学灌浆泵呈现以下特点：

(1) 密封性。由于化学灌浆材料具有腐蚀性，化学灌浆泵泵体采用全密封管路系统，有利于人身安全和环境保护。

(2) 易清洗。化学灌浆作业完成后需要使用清洗剂对化学灌浆设备进行清洗，同时管路接头可快速安全拆卸，维修方便，移动快捷。

(3) 安全性。化学灌浆泵工作性能安全稳定，噪音小，输出管路系统采用逆止阀，保证化学灌浆材料只能单向流而不能往回流，化学灌浆材料无泄漏、保护环境。

(4) 多品种。根据压力、流量和温度等参数，合理的匹配化学灌浆泵设备，使化学灌浆泵能更好满足施工需要，适应不同需求。

3 高压化学灌浆泵研究

现有的化学灌浆泵设备灌浆泵输出压力集中在低压区，且最高压力达不到抽水蓄能电站施工需求。且现有化学灌浆泵整机重，机器不便携，移动式作业、倾斜工作面使用不方便。由于化学灌浆持续时间长，高压工况下弹性元件疲劳失准，压力表故障率高，灌浆结束后造成压力表不能回零等情况。目前化学灌浆泵产品无法满足抽水蓄能电站施工各种

高压工况需求，因此抽水蓄能电站高压化学灌浆泵的研发势在必行。

3.1 高压化学灌浆泵

抽水蓄能电站高压化学灌浆泵采用专用驱动器驱动伺服电机，专用驱动器是化学灌浆泵的传动核心，伺服电机是动力源，驱动单缸柱塞泵，带动偏心轮通过曲柄连杆带动柱塞泵的往复运动，通过进出口钢球与阀座的配合运动，从而完成化学灌浆材料的吸入和输出过程。泵头连接油浆分离器，数显压力表，油压分离器保证压力表的精度和稳定性，数显压力表显示实时压力。泵头分为进浆和出浆两部分，不断吸入和输出化学灌浆材料。泵头部分的进口阀连接吸料管，进口阀内装有单向导通的钢球与阀座，泵头吸入化学灌浆材料，液压泵体的出浆压力和流量满足工程要求。开关电源控制设备的开关运行，压力调节增加和减少压力预定值。化学灌浆泵的硬件框图如图 1 所示。

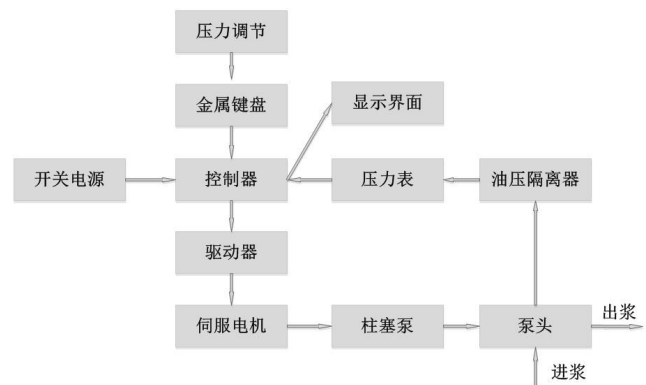


图 1 硬件框图

Fig.1 Hardware block diagram

选用 AVR 单片机，植入 PID 算法，由电源模块、PWM 调速模块和 A/D 模块构成。电源模块负责电源供给，PWM 调速模块实现驱动器调速，A/D 模块负责传感器数据的输入和输出。AVR 单片机产生 PWM 周期信号，其脉宽可控可调，并增加了光耦抗干扰设计，使 PWM 精确可靠性高。温度传感器和压力传感器的采样数据通过 A/D 模块发送至单片机，单片机同时控制彩色显示屏，金属键盘和蜂鸣报警器。本项目的硬件电路结构图如图 2 所示。

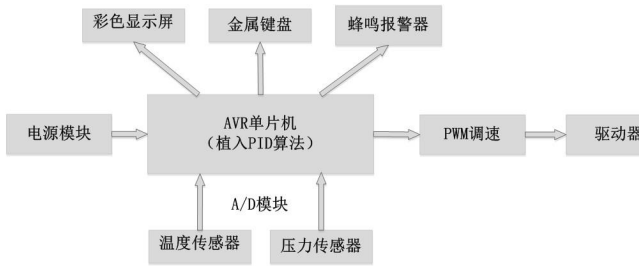


图2 控制系统框图

Fig.2 Control system block diagram

PWM 是一种脉冲宽度调制信号，利用微处理器的数字输出来对模拟电路进行控制。AVR 单片机的 PWM 脉冲调节控制驱动器芯片内功率开关管的导通与关断，从而控制驱动器。驱动器驱动伺服电机。单片机的键盘模拟量输入端口输入信号，或者人工操作调速旋钮电机的设定值。设定值传输给单片机后，单片机中编程实现的参数自整定模糊 PID 控制器开始起作用。控制器依据上位机传输过来的设定转速和接近开关反馈的当前转速，依据模糊 PID 控制原理进行调速。模糊 PID 控制算法内置植入在 AVR 单片机内。单片机的控制流程图如下图 3 所示。

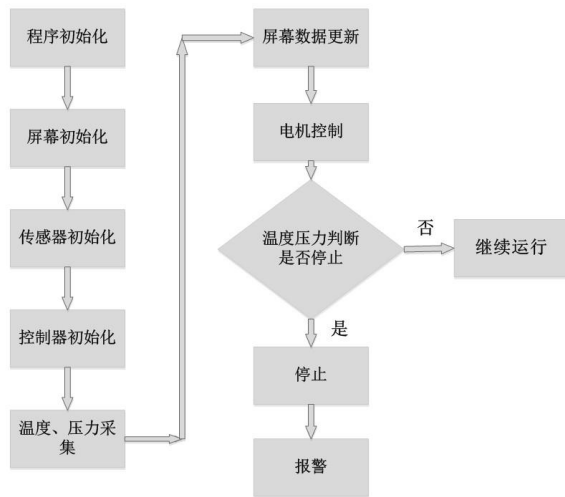


图3 单片机流程图

Fig.3 Single chip flow chart

模糊 PID 控制主要包括以下几个关键步骤：

- ① 模糊 PID 参数智能控制器的输入输出量；
- ② 模糊 PID 参数智能控制器输入量模糊化；
- ③ 确定语言变量和隶属函数；

- ④ 建立模糊规则表；
- ⑤ 输出量的清晰化；
- ⑥ 参数整定后的模糊 PID 参数智能控制。

3.2 高压化学灌浆泵施工

抽水蓄能电站高压化学灌浆施工流程：施工准备——灌浆平台搭设及验收——孔位放线——设备调试——钻孔——钻孔冲洗——钻孔验收、埋管制作验收——吹风、埋管——灌浆泵调试、管路连接——简易压水试验——灌浆材料配制——化学灌浆——灌浆结束——管壁阀门拆管——质量检查——场地清理。

化学灌浆泵启动检查：接交流 220V 电源，进浆管连接泵头下部进浆部件，并与搅拌桶连接，出浆管连接泵头出口出浆部件，并与灌浆孔口管连接。化学灌浆泵应进行空载试运转，当设备运转正常进行压水试验，模拟化学灌浆工况，在搅拌桶内装水并连接管路，观察各管路无漏浆情况，设备正常无报警后正式进行化学灌浆。

施工启动化学灌浆泵，利用环氧浆液将孔内积水进一步赶出，直至回浆管口有持续纯浆排出，关闭回浆阀继续灌浆。观察孔口返水情况，判断孔内是否有漏浆情况发生。灌浆压力宜读取压力波动的中值，波动范围应不大于灌浆压力的 20%，灌浆压力的最大值也应予以记录。摆动范围应作记录，并有专人看守压力表，不得超压。灌浆压力记录以孔口压力为准。化学灌浆过程以逐级升压为原则，每段灌浆压力结合现场实际情况确定。化学灌浆过程中，灌浆压力达到设计压力值后，化学灌浆注入率不大于结束值，再继续灌注 30min 进行闭浆待凝，才可结束灌浆。

设备清洗：先用水对进回浆管路带压冲洗干净，再用丙酮清洗管道接头及阻塞器，灌浆泵泵头用丙酮冲洗干净后，加上润滑油。若出现管道堵塞，将丙酮打入管道内循环清洗。

4 结论

我国抽水蓄能电站机遇和挑战并存，正不断创新工作思路和方法，加快数字化、智能化、信息化升级，推进抽水蓄能电站建设安全健康发展。抽水蓄能电站水道系统的高压水工隧洞普遍存在围岩及

混凝土缺陷, 基于抽水蓄能电站水工隧洞高压化学灌浆需求, 研发CW100系高压化学灌浆泵, 采用AVR嵌入式系统进行全工况压力自动控制, 高压灌浆升压迅速稳定, 人性化操作界面, 施工效率高, 满足高压化学灌浆防渗补强的施工需求, 显著提高防渗补强化学灌浆施工质量。

参考文献:

- [1] 刘欣. 抽水蓄能电站建设发展探讨[C]. 中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会. 抽水蓄能电站工程建设文集 2019. 中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会: 中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会, 2019: 48-50.
- [2] 张健, 郑源. 抽水蓄能技术[M]. 河海大学出版社, 2011: 1-45.
- [3] 李浩良, 孙华平. 抽水蓄能电站运行与管理[M]. 浙江大学出版化, 2013: 2-21.
- [4] 陆佑楣, 潘家铮. 抽水蓄能电站[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1992.
- [5] 潘家铮, 何璟. 中国抽水蓄能电站建设[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000. 3.
- [6] 汪在芹. 高水头下不良地质体防渗补强技术研究与应用[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(5): 1-5, 26.
- [7] 蒋硕忠. 我国化学灌浆技术发展展望[J]. 长江科学院院报, 2003(5): 26-28, 35.
- [8] 蒋硕忠, 邓敬森. 中国化学灌浆的现状与未来[M]. 武汉: 长江出版社, 2005.
- [9] 张锦标. 高压大流量轴向柱塞式化学灌浆泵的设计研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [10] 董建军, 尹作仿. HGB-1(2)型化学灌浆设备的研制[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(6): 15-17.
- [11] 李珍, 魏涛, 柏国奈等. 步进电机驱动化学灌浆泵[P]. 2010-07-14.