

# 混凝土立柱自动水雾化喷雾养护研究及应用

陈剑华, 王立庄

中交路桥华南工程有限公司, 广东 中山  
Email: 2374048092@qq.com

收稿日期: 2021年5月3日; 录用日期: 2021年5月17日; 发布日期: 2021年5月31日

## 摘要

针对目前混凝土立柱自然养护和加热养护存在的不足, 设计开发了一种模块组合式设计的自动水雾化喷雾养护装置。基于水泥水化热产生导致的混凝土温度梯度发生规律, 计算了系统的用水量。以佛山地铁2号线林岳车辆段TOD综合开发项目中的混凝土立柱为作业对象, 详细介绍了该新型装备的结构构造、施工组织过程和应用特点, 试验对比测试显示自动水雾化喷雾封闭养护能缩短养护周期。此新型装备的成功研制与应用, 有效改善了混凝土立柱养护的施工速度和工艺水平, 降低了施工病害的发生。

## 关键词

混凝土立柱, 自动养护, 远程监控, 工作原理, 用水量, 施工组织

# Research and Application of Automatic Water Atomization Spray Curing for Concrete Columns

Jianhua Chen, Lizhuang Wang

Road & Bridge South Engineering Co., Ltd., Zhongshan Guangdong  
Email: 2374048092@qq.com

Received: May 3<sup>rd</sup>, 2021; accepted: May 17<sup>th</sup>, 2021; published: May 31<sup>st</sup>, 2021

## Abstract

In view of the shortcomings of natural maintenance and heating maintenance of concrete columns at present, a modular combined automatic spray atomization maintenance device is designed and developed. Based on the law of concrete temperature gradient caused by cement hydration heat, the water consumption of the system is calculated. Taking the concrete column in TOD compre-

hensive development project of Linyue depot of Foshan Metro Line 2 as the operation object, the structure, construction organization process and application characteristics of the new equipment are introduced in detail. The comparison test shows that the automatic water atomization spray curing can shorten the curing period. The successful development and application of this new equipment effectively improves the construction speed and technology level of concrete column maintenance, and reduces the occurrence of construction diseases.

## Keywords

Concrete Column, Automatic Maintenance, Remote Monitoring, Working Principle, Water Consumption, Construction Organization

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 概述

混凝土浇筑后, 在水泥水化作用下而逐渐凝结硬化, 达到设计所需的性能要求。良好的水化作用需具备合适的温湿度条件, 因而混凝土的养护非常重要。养护按施工工艺不同分为自然养护以及加热养护两种[1]。

自然养护指在自然条件下使混凝土在一段时间内保持湿润状态, 具有施工简单、能源消耗少的优点, 但养护耗时较长, 适合各种混凝土构造物养护。方法又分为洒水养护、覆膜滴灌养护、塑料薄膜覆盖养护、薄膜养生液养护等[2]。

加热养护指将混凝土预制件置于高温高湿条件下的养护, 该方法能使混凝土预制件强度加速增长, 短时间达到其设计性能, 加快模具周转速度, 但耗能大、结构复杂、成本较高。方法包括蒸汽养护、热模养护、太阳能加热养护三种。

目前房建工程现浇钢筋混凝土立柱, 基本采用塑料薄膜滴灌养护, 该方法的优点是水的用量较少, 不足是需专人依靠一定的设备, 人工覆盖塑料薄膜, 存在效率低、安全风险大、质量难以管控的问题, 从而产生混凝土结构裂缝、结构强度降低、耐久性变差等一系列质量问题。

随着质量意识的提高, 很多科研工作者对混凝土构造物的养护进行了多方面研究, 如自动养护技术的施工应用、养护方式对混凝土性能影响等。2016年, 黄建等[3]试验比较了覆盖麻袋浇水、塑料薄膜包覆及薄膜养生液等养护方法对混凝土性能的影响研究, 试验表明塑料薄膜包覆养护质量最佳, 其形成的真空环境能防止水分过快蒸发, 不仅节约水资源, 且混凝土裂缝发育较少。2018年, 刘元杰等[4]研究了高铁挡砟墙混凝土的自动养护技术, 试验测试了混凝土强度的变化规律, 分析了自动养护技术的优缺点。2021年, 庄贺等[5]研究了高温环境下, 混凝土初始浇筑温度分别为 25℃、32℃和 38℃时各自采用浸水养护、湿粗麻布覆盖养护、涂水基凝固剂密封养护等三种方法对混凝土性能的影响。结果表明该条件下混凝土初始浇筑最佳温度为 32℃, 浸水养护凝固能产生最好的混凝土, 而湿粗麻布覆盖养护方法应优先于添加凝固剂养护的方法。2021年, 周杨春等[6]建立了混凝土构造物在水化热作用下的绝热温升数学模型, 通过有限元分析得出了水化热产生及变化规律。通过现场温度测, 立柱截面中心温度在浇筑 63 h 时出现 72℃的峰值, 然后温度缓慢降低, 最后通过混凝土性能测试得出了水化程度与早期性能的关系。

但整体而言对有关混凝土构造物养护的基础理论研究和自动养护技术开发深度还不足, 如何提高自

动化程度, 保证养护及时到位, 提升养护效果, 节约水资源是重点工作。因此, 研制一种适用于钢筋混凝土立柱的自动养护装备, 应用于中交路建林岳 TOD 项目部施工, 尤其在广东省大力提倡“两提两减”的大环境中显得尤为迫切。

## 2. 钢筋混凝土立柱自动水雾化喷雾养护系统结构原理简介

如图 1 所示, 钢筋混凝土立柱自动水雾化喷雾养护工艺原理是通过移动水箱、泵控供水装置、湿度传感器、输水管、水雾化喷雾装置、远程监控中心的自动监控系统等组成喷雾养护系统, 移动水箱的蓄水量能够保证连续喷淋作业条件, 设定湿度传感器的控制阈值, 开动喷雾养护系统电源, 喷雾养护系统进入自动工作状态。当养护罩内的湿度值低于设定值时, 数据采集系统采集数据通过无线传输方式传输至远程监控中心, 控制系统发出信号又通过无线传输至电控箱, 泵控供水装置从移动水箱内抽水送至输水管内, 输水管连接水雾化喷雾装置对需养护的混凝土面进行喷雾养护, 湿度传感器测试的实时数据达到预设阈值后, 电控箱关闭泵控供水装置开关停止喷雾。通过模块化设计, 养护系统适应于混凝土立柱高度在 5~15 m、截面直径或边长 0.8~1.2 m 范围变化。

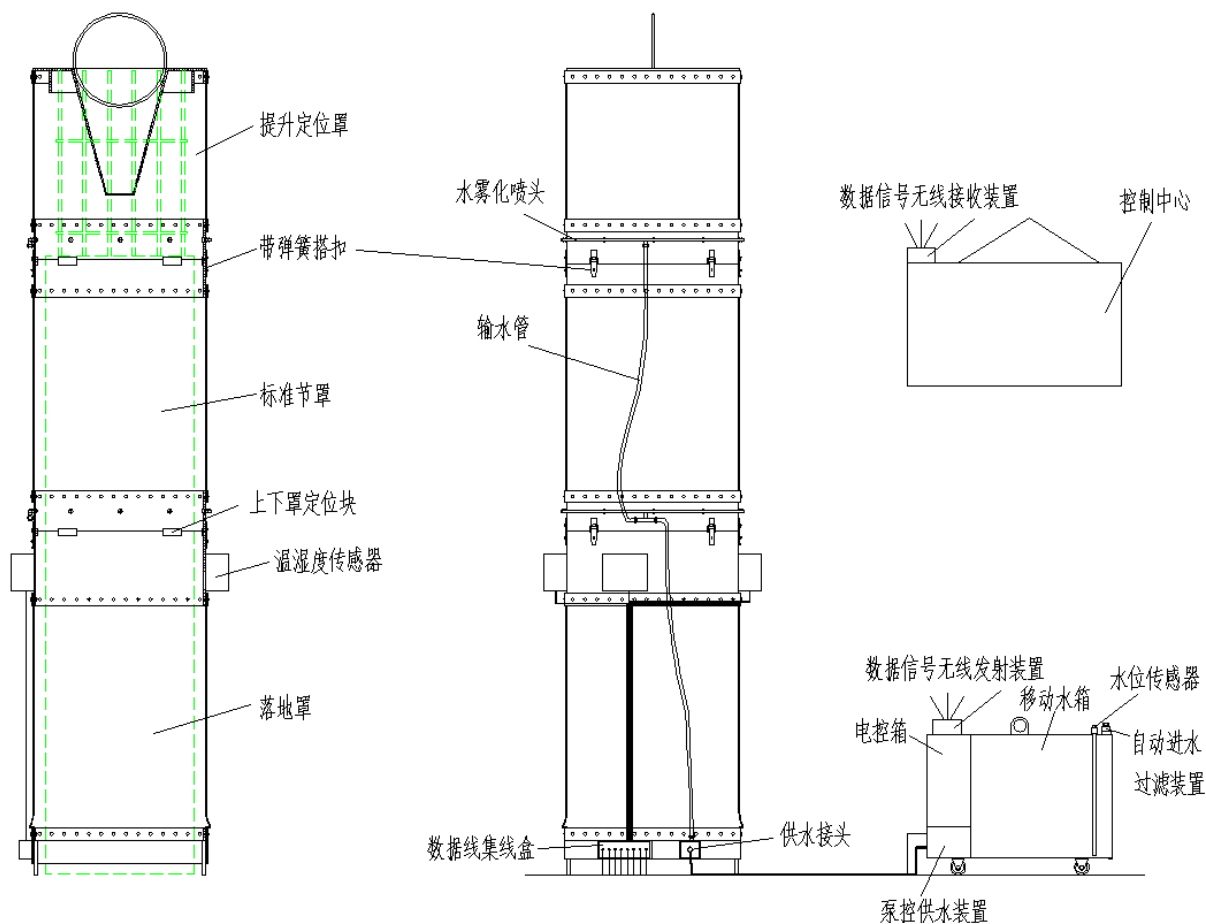


Figure 1. Structure principle of automatic water atomizing spray maintenance system for reinforced concrete column

图 1. 钢筋混凝土立柱自动水雾化喷雾养护系统结构原理图

## 3. 钢筋混凝土立柱自动水雾化喷雾养护系统用水量计算

泵控供水装置能同时满足 8 根立柱同时喷淋时的水量需求, 用水量与水泥水化热产生导致的混凝土

温度差即温度梯度密切相关。由于温度梯度引起的拉伸应力升高, 增加了开裂的可能性。

早期混凝土中的应力变化是一个复杂的过程, 不仅取决于热梯度, 还取决于其他因素, 包括弹性模量, 热膨胀系数( $CTE$ ), 收缩和蠕变以及混凝土中的约束条件等, 其计算表达式如下:

$$\sigma = K_c \cdot CTE \cdot E_{eff} \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为应力;  $K_c$  为约束系数;  $E_{eff}$  为考虑蠕变行为的有效弹性模量;  $\Delta T$  为温差。

公式表明, 在约束系数  $K_c$ 、考虑蠕变行为的有效弹性模量  $E_{eff}$  和热膨胀系数  $CTE$  一定的情况下, 混凝土的应力变化  $\sigma$  与温差即绝热温升呈线性密切相关。

混凝土在水化过程中, 水化热量取决于混凝土的浇筑温度。较高的温度加快了胶凝材料水合反应的速度。文献[7]指出, 水泥的水化度与释放的热量成正比, 如方程式(2)所示:

$$a(t) = \frac{H(t)}{H_u} \quad (2)$$

式中:  $a(t)$  为水化度,  $H(t)$  为水泥释放的累积热量(J/g),  $H_u$  为根据水泥的胶凝特性计算的可用于反应的总热量(J/g), 可由公式(3)和(4)得出:

$$H_u = H_c p_c + 461 p_s + 1800 p_F p_{FC} \quad (3)$$

$$H_c = 500 p_1 + 260 p_2 + 866 p_3 + 420 p_4 + 624 p_5 + 1186 p_6 + 850 p_7 \quad (4)$$

式中:  $H_c$  为水泥的总水化热(J/g);  $p_c$  为胶凝材料中水泥的百分比;  $p_F$  为胶凝材料中粉煤灰的百分比;  $p_{FC}$  为粉煤灰中氧化钙的百分比;  $p_s$  为胶凝材料中矿渣的百分比;  $p_{sf}$  为胶凝材料中硅粉的百分比;  $p_x$  为水泥中  $x$  成分的百分比(分别为  $C_3S$ 、 $C_2S$ 、 $C_3A$ 、 $C_4AF$ 、 $SO_3$ 、 $CaO$ 、 $MgO$ )。

通过拟合公式(3)(4)的计算化累积热量, 最后得到下式:

$$H(t) = \frac{m_s}{m_{cm}} c_p T(t) \quad (5)$$

式中:  $m_s$  为混凝土试样的质量;  $m_{cm}$  为样品中胶凝材料的质量;  $T(t)$  为理论计算绝热温升。

因此, 送水量可根据下列公式确定:

$$V_{H(t)} = \frac{8Q}{3.1416d^2} \quad (6)$$

$$Q = \sqrt{\frac{H}{SL}} \quad (7)$$

$$H = \frac{P}{\rho g} \quad (8)$$

$$S = 10.3 \times \frac{n^2}{d^{5.33}} \quad (9)$$

式中:  $Q$  为流量, 以  $m^3/s$  为单位;  $d$  为输水管内径, 以  $m$  为单位;  $H$  为管道两端水头差, 以  $m$  为单位;  $S$  为管道摩阻系数;  $L$  为输水管道长度, 以  $m$  为单位;  $P$  为管道两端压强差;  $\rho$  为液体密度;  $g$  为重力加速度;  $n$  为管内壁糙率。

#### 4. 施工组织应用

钢筋混凝土立柱自动水雾化喷雾养护已在佛山地铁2号线林岳车辆段TOD综合开发项目中得到应用, 其施工组织过程如下:

1) 用汽车吊或塔吊吊钩钩住提升定位罩的吊环慢慢提升, 待提升定位罩罩身底部即将脱离标准节罩时, 找准方位定位, 然后利用带弹簧搭扣将提升定位罩和标准节罩扣上并锁紧, 通过螺纹接头将提升定位罩和标准节罩上的水雾化喷头连接紧密密封。

2) 汽车吊或塔吊继续提升, 待标准节罩罩身底部即将脱落地罩时, 找准方位定位, 然后利用带弹簧搭扣将标准节罩和落地罩扣上并锁紧, 通过螺纹接头将标准节罩上的水雾化喷头和落地罩上的供水接头连接紧密密封。

3) 用专用数据线将温湿度传感器和数据线集线盒的接头接好。

4) 汽车吊或塔吊继续起吊将养护罩整体提升, 自待养护钢筋混凝土立柱的顶部慢慢放下, 提升定位罩的定位锥体将自适应钢筋笼形状定位, 将养护罩托起并将钢筋混凝土立柱整体罩住。

5) 汽车吊或塔吊吊钩脱离, 同工艺流程安装另外钢筋混凝土立柱养护罩, 最多 8 套。

6) 将自来水通过软水管接至移动水箱的自动进水过滤装置进水口; 连接落地罩供水接头和泵控供水装置接头, 水管连接 1 号出水口接 1 号养护罩, 2 号出水口接 2 号养护罩, 以此类推, 不能错接, 如图 2 所示; 连接数据线集线盒和电控箱的接头, 先将水箱数据线接头插头端连接至第一个养护罩进线口, 拧紧螺帽, 再由出线口连接至下一个养护罩的进线口, 以此类推, 最后一个养护罩的出线口不用连接; 最后将水箱电源线连接至 220 V 电源。固定数据信号无线接收、发射装置, 如图 3 所示。打开控制中心的控制软件进行系统调试: 数据能否通过无线相互联通、移动水箱能否自动进水和停水、高扬程水泵能否启动、雾化喷头能否雾化喷水雾。

7) 打开系统自动运行。由系统主界面点击监控显示框进入监控主界面(图 4), 系统将显示当前混凝土立柱在养护罩内的温湿度状态, 系统能实现参数化全自动远程控制和离线数据回放分析。



Figure 2. Connection of water supply pipe and data line

图 2. 供水管及数据线连接



Figure 3. Wireless data signal receiving and transmitting device

图 3. 数据信号无线接收、发射装置

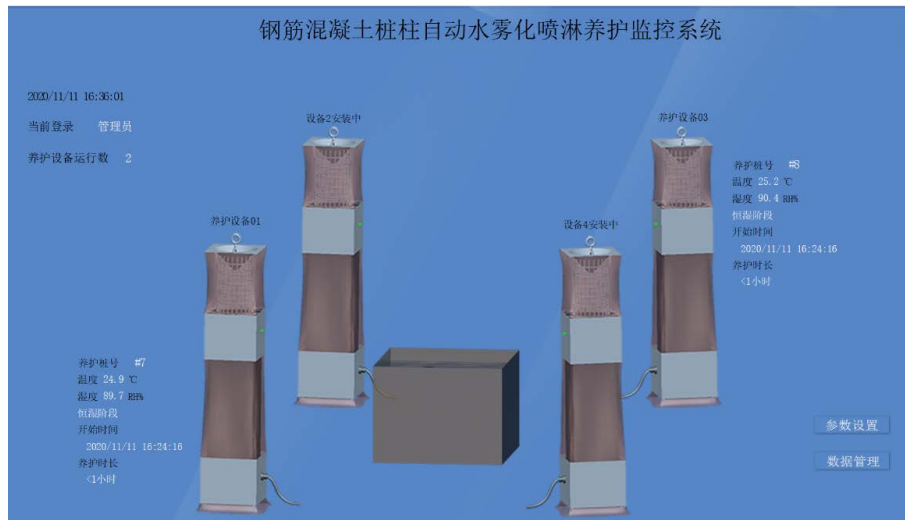


Figure 4. Monitoring main interface  
图 4. 监控主界面

### 5. 工程对比研究

针对佛山地铁 2 号线林岳车辆段 TOD 综合开发项目所施工的 C50 钢筋混凝土立柱，本研究针对不同的养护方式下混凝土抗压强度进行对比测试实验，验证自动水雾化喷雾养护的施工效果。施工现场混凝土立柱的混凝土配合比设计如表 1 所示。

Table 1. Concrete mix design (kg/m<sup>3</sup>)  
表 1. 混凝土配合比设计(kg/m<sup>3</sup>)

混凝土	水/水泥	水	水泥	粉煤灰	石子	沙子	减水剂
C50 普通混凝土	0.43	206	487	-	1193	563	3.89

图 5 为分别采用自动水雾化喷雾封闭养护及工程常用覆膜滴灌养护立柱抗压强度随养龄期的变化规律。

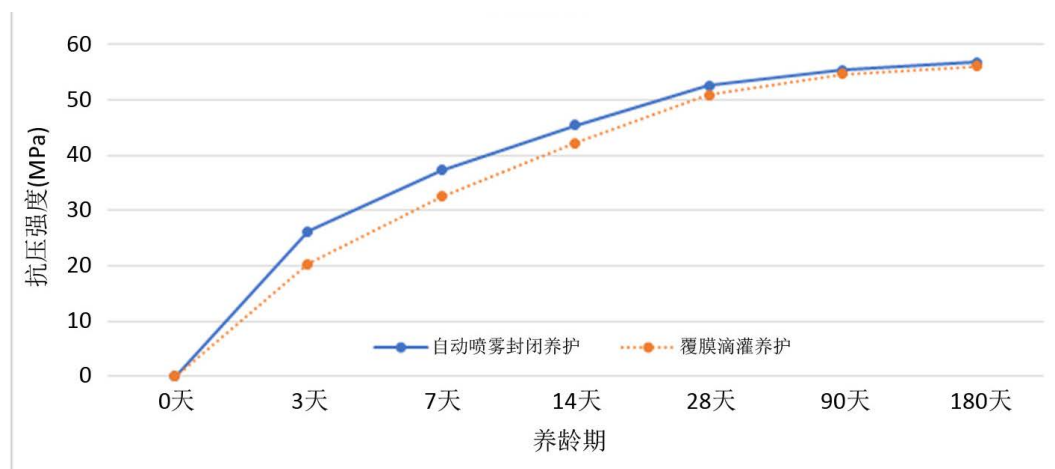


Figure 5. Variation of column compressive strength with time under different curing methods  
图 5. 不同养护方式下立柱抗压强度随时间的变化图

图 5 结果显示, 在自动水雾化喷雾恒湿控制封闭养护模式下的混凝土立柱前期强度增长很快, 3 天龄期抗压强度达到 26.2 Mpa, 比覆膜滴灌养护的立柱高 5.9 Mpa; 7 天龄期抗压强度达到 39.3 Mpa, 比覆膜滴灌养护的立柱高 5.4 Mpa; 14 天龄期抗压强度达到 47.5 Mpa, 比覆膜滴灌养护的立柱高 4.7 Mpa, 说明自动水雾化喷雾封闭养护能缩短养护周期。但到后期, 普通养护强度增长加快, 与自动水雾化喷雾恒湿控制封闭养护差距很小并接近一致。

## 6. 结论

钢筋混凝土立柱自动水雾化喷雾养护是一种全新技术, 模块化设计的养护罩能实现对一定范围内不同高度、不同截面尺寸的立柱进行养护。养护罩体一次组装能连续重复使用, 操作简单, 安装拆卸方便快捷。相对封闭的养护罩能减少水分的蒸发, 节约水资源。参数化设置及全自动远程控制, 无须日常的人工辅助养护, 提高了工作效率, 加快了养护进程。实时的温湿度监控和自动喷雾养护处理, 混凝土养护效果好, 减小了立柱表面裂纹发生率, 达到了现场使用要求, 值得推广应用。

## 参考文献

- [1] 金浏, 张仁波, 杜修力, 等. 温度对混凝土结构力学性能影响的研究进展[J]. 土木工程学报, 2021, 54(3): 1-18.
- [2] 张华, 段华勇, 周兴政. 水泥混凝土养护对混凝土性能影响的研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(4): 4-7.
- [3] 黄建. 高层建筑混凝土墙体养护技术探究[J]. 现代工业经济和信息化, 2016, 6(19): 46-47.
- [4] 刘元杰. 自动养护系统在高寒区高铁挡砟墙混凝土养护中的应用[J]. 四川建筑, 2018, 38(3): 212-213.
- [5] 庄贺, 周杨春. 浇筑温度和养护凝固方式对水泥混凝土性能的影响[J]. 土木工程, 2021, 10(3): 188-194.
- [6] 周杨春, 庄贺. 混凝土立柱早期性能演变规律研究[J]. 工程技术与管理, 2021, 5(2): 60-62.
- [7] Schindler, A.K. and Folliard, K.J. (2005) Heat of Hydration Models for Cementitious Materials. *ACI Materials Journal*, 102, 24-33. <https://doi.org/10.14359/14246>