

DOI: 10.7672/sgjs2026030127

基于电固化的桩基混凝土养护控温效果研究*

曾根生¹, 刘翔云², 蒲凡², 王凯平³, 夏银飞³, 毛江鸿³, 刘焯³

(1. 南方电网能源发展研究院有限责任公司, 广东 广州 510663; 2. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 500643; 3. 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610065)

[摘要] 桩基混凝土内部中心区域水化放热高、温升大, 而外部边缘区与外界环境直接传热, 散热效率高、温升小, 导致内外温差较大, 易引发温度裂缝。传统养护方法难以精准控制混凝土内外温差且能耗较高, 为此提出基于三相电的混凝土电固化控温技术, 并开展高950mm、直径1200mm桩基电固化试验。研究表明, 电固化可将混凝土内外温差控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内, 有效抑制了温度裂缝的形成; 电固化3d混凝土强度达29.4MPa, 表明电固化技术在工程应用上具有实际可行性; 三相电使零线端电流输出降至0.4A, 3d电固化用电量仅为6.12kW·h, 较传统蒸汽养护方法节能减排。

[关键词] 桩基; 混凝土; 电固化; 温度; 裂缝

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0127-07

Research on Temperature Control Effect of Electric Curing for Pile Foundation Concrete

ZENG Gensheng¹, LIU Xiangyun², PU Fan², WANG Kaiping³, XIA Yinfei³,
MAO Jianghong³, LIU Ye³

(1. Energy Development Research Institute Co., Ltd., CSG, Guangzhou, Guangdong 510663, China; 2. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu, Sichuan 500643, China; 3. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: The inner core region of pile foundation concrete exhibits high heat release from hydration and significant temperature rise, while the outer edge zone directly exchanges heat with the external environment, resulting in high heat dissipation efficiency and minor temperature rise. This leads to a large temperature difference between the interior and exterior of concrete, which is prone to induce temperature cracks. Traditional curing methods struggle to precisely control the temperature difference between the interior and exterior of concrete and have high energy consumption. Thus, this paper proposes a temperature control electric curing technology for concrete based on three-phase electricity, and conducted electric curing tests on the pile foundation with a height of 950mm and a diameter of 1200mm. The research results show that electric curing can control the temperature difference between the interior and exterior of concrete within $\pm 2^{\circ}\text{C}$, effectively inhibiting the formation of temperature cracks. After 3d of electric curing, the concrete strength reaches 29.4MPa, indicating that electric curing technology has practical feasibility in engineering applications. Three-phase electricity reduces the neutral line current output to 0.4A, and the energy consumption for 3d of electric curing is only 6.12kW·h, achieving significant energy conservation and emission reduction compared with traditional steam curing methods.

Keywords: pile foundation; concrete; electric curing; temperature; cracks

* 国家自然科学基金(52378172); 四川省自然科学基金(2025ZNSFSC0418)

[作者简介] 曾根生, 高级工程师, E-mail: 369190264@qq.com

[通信作者] 毛江鸿, 教授, E-mail: jhmas@scu.edu.cn

[收稿日期] 2025-10-24

0 引言

随着我国西部大开发政策的持续深化, 基础设施建设需求增加, 桩基作为核心承载结构被广泛应

用于输电塔、桥梁等工程中^[1]。桩基截面尺寸较大、混凝土用量大,混凝土水化过程中内部会产生大量水化热,内部温度可达50℃以上^[2]。而外部保护层区域因与外界环境进行直接热交换,散热效率高,温度上升速度慢、变化幅度小。未经处理时,内外混凝土温差可达20℃以上,易引发温度裂缝,导致结构承载力降低^[3-4],加速混凝土碳化并发生钢筋锈蚀等耐久性问题,缩短桩基使用寿命。严酷环境下控制内外温差已成为桩基混凝土养护的关键攻关技术。

传统养护方法如蓄热法、暖棚法、蒸汽法等难以实现对混凝土温差的精准控制^[5-7],其中暖棚法混凝土内外温差可达15℃,且该方法易受环境干扰、占用空间大。蒸汽法通过高温蒸汽为混凝土养护提供温度,但热量损失大、能耗高^[8]。为此,本文提出采用电固化法解决桩基混凝土养护问题。电固化法原理是将交流电直接作用在桩基混凝土上,混凝土通电产生均匀的欧姆热,以此提高温度^[9-10]。得益于将混凝土自身作为电阻发热的特性,在降低能耗的同时可对混凝土养护温度进行精准调控^[11],实现内外温差的稳定控制。

1 混凝土养护电固化技术

1.1 电固化基本原理

根据热力学中的比热容公式,混凝土从初始温度 T_0 升温至目标温度 T_f 时,所需的热量 Q 可由下式计算:

$$Q = cm_o(T_f - T_0) \quad (1)$$

式中: c 为混凝土比热容,一般认为20℃下混凝土比热容变化幅度小^[12-13]; m_o 为保护层混凝土质量。

根据热力学中的焦耳热定律可知,电固化混凝土产生的热量 W_E 可由下式计算:

$$W_E = I^2 R t_1 = \frac{U^2}{R} t_1 \quad (2)$$

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3)$$

式中: I 为混凝土内的电流; R 为混凝土电阻; t_1 为电固化通电加热时间; U 为混凝土两端电压; ρ 为电阻率,取值为230~4 482Ω·mm^[14]; l 为电流方向长度; A 为电流方向横截面面积。

上述公式解释了混凝土升温原理,但在实际应用层次,尤其是桩基混凝土电固化控温过程中,需考虑环境热交换作用的影响。如果使桩基混凝土内外温差接近零,外部保护层混凝土电固化产热量与寒冷环境下散热量差值对应的温度变化幅值需等于内部混凝土整体温度变化幅值。根据牛顿冷

却定律,对于温度高于周围环境的物质,由于热传递造成的热量散失 W_c 计算如下:

$$W_c = A_1 h (T_o - T_f) t_2 \quad (4)$$

式中: T_o 为外部保护层混凝土温度; T_f 为环境温度; A_1 为混凝土与外界环境接触的表面积; t_2 为外部保护层混凝土热传递散热时间; h 为混凝土对流传热系数,表示混凝土在单位接触面积下外界环境温度差为1℃时的传热功率,无风情况下C30混凝土对流传热系数一般为7.67W/(m²·℃)^[15]。

混凝土电固化控温分为升温阶段和控温阶段,升温阶段将外部保护层混凝土由入模温度提升至目标温度,控温阶段混凝土保持内外温差接近零。升温阶段仅发生在混凝土入模后的几小时内,外界环境对混凝土本身的温度影响小,可忽略热交换作用,混凝土升温所需的热量全部由电固化通电加热提供。因此,升温阶段热量平衡方程如下:

$$W_E = Q \quad (5)$$

升温阶段需求电压 U_1 计算如下:

$$U_1 = \sqrt{\frac{cm_o(T_f - T_0)}{t_1} R} \quad (6)$$

控温阶段需考虑外界环境温度的影响,保护层混凝土相对于内部区域水化放热量很小,可忽略。控温阶段电固化通电加热时间 t_1 与外部保护层混凝土热传递散热时间 t_2 相同。控温阶段热量平衡方程如下:

$$W_E - W_c = cm_i(T_i - T_o) \quad (7)$$

式中: T_i 为混凝土内部温度; m_i 为除保护层外内部混凝土质量。

控温阶段需求电压 U_k 计算如下:

$$U_k = \sqrt{Ah(T_o - T_f)R + \frac{cm_i(T_i - T_o)}{t_2} R} \quad (8)$$

1.2 三相电控制电固化输出电流基本原理

在混凝土构件电固化系统中,采用安全电压可有效规避触电风险,但较低的电压会导致电流需求显著增加。单相电加热模式下,电流需满足下式:

$$I_s = \frac{P}{U_s \cos\phi} \quad (9)$$

式中: P 为电固化加热功率; $\cos\phi$ 为功率因数,通常纯加热物体为1; I_s 为单相电电流; U_s 为混凝土构件两端单相电电压。

三相电加热模式下,电流需满足下式:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} U_1 \cos\phi} \quad (10)$$

式中: I_1 为三相电电流; U_1 为混凝土构件两端三相

电电压。

三相电电压与单相电电压的关系满足下式:

$$U_1 = \sqrt{3} U_s \quad (11)$$

三相电电流为单相电电流的 1/3。当加热功率需求较高时,如桩基混凝土养护功率可能需要达到 700W,且因混凝土初始电阻很小,此时的单相电电流将 >50A,导致导线截面面积需求过大。采用三相电极对称布置可通过功率的三相分散分配实现零线电流的降低,其核心原理如图 1 所示。

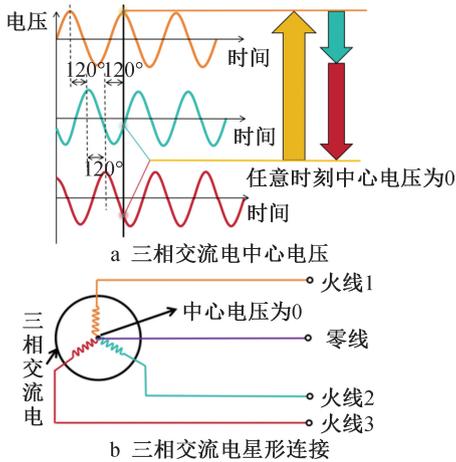


图 1 三相交流电控制输出电流原理

Fig. 1 Principle of three-phase AC controlled output current

将混凝土和钢筋笼构成的回路负载按图 1 三火线—零线的星形接法进行连接,使总功率由 3 个相位差 120°的交流相共同承担。在理想对称状态下,总功率被平均分配至三相,即各相承担的功率为总功率的 1/3,单一相线路的电流需求随功率分摊比例同步降低。同时,三相电流幅值相等、相位互差 120°,根据基尔霍夫电流定律,各相电流在公共节点处形成矢量和,由于三相电流的相位对称性,其矢量和在理论上为零,进一步降低了线路有效电流负荷。三相电极布置将单相系统的集中电流转化为三相分散电流,从根本上降低了单一线路的电流负荷,为 36V 安全电压下高功率应用场景提供了理论支撑。

2 桩基电固化试验

2.1 试验方案

依托实际工程,为验证混凝土通电升温养护效果和通电控制桩基混凝土内外温差的可行性,开展了高 950mm、直径 1 200mm 的混凝土桩电固化试验,试验方案及分组如表 1 所示。控温阶段混凝土中心温度基本控制在 50℃ 以下,混凝土内外温差控制在 ±2℃ 以内。

2.2 试验材料

试验材料包括 P·O 42.5R 级水泥、细度模数为 2.7 的机制砂、碎石等,混凝土强度设计值为 30MPa,配合比设计中水泥:水:细骨料:粗骨料为 248:152:827:1 074kg/m³。桩基混凝土强度按照 JGJ/T 23—2011《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》评估,采用回弹法测试构件混凝土强度,电固化 3d 时混凝土强度已达 29.4MPa。

2.3 电固化装置

桩基混凝土电固化参数可依据理论分析得到,混凝土桩浇筑与养护地点为某预制构件厂室外区域,浇筑期间的环境温度为 15~20℃,浇筑完成后在室外铺盖棉被隔热保温,对混凝土进行通电升温养护。温度测点与电极布置如图 2 所示。电固化系统包括混凝土电固化控温装置、混凝土温度测试装置,如图 3 所示。

电固化系统利用预铺设铁皮及钢筋笼作为通电电极,施加三相交流电实现混凝土的升温。为避免钢筋笼与铁皮电极接触,使用绝缘垫块隔离钢筋笼与外部电极,保证电流仅从铁皮电极流入、从钢筋笼电极流出。沿桩基混凝土外围周向均匀设置 9 个相邻间距 15cm 的电极,其中①~③号为连接变压器的加热组,④~⑨号为不连接变压器的对照组。桩体自上而下沿高度方向划分为 A 段(混凝土顶部区)、B 段(钢筋加密区)、C 段(钢筋稀疏区)和 D 段(混凝土底部区),A、B、C 段均沿横截面直径方向设置 4 个温度测点,依次布设在所在高度段中心、中心至边缘 1/2 半径处、钢筋表面、相邻钢筋间隙处,D 段仅在中心布设温度测点。在①,②号电极周向中间区域(标记为⑩号区域)布设相应位置的钢筋加

表 1 电固化试验方案及分组

Table 1 Electric curing test scheme and grouping

养护阶段	养护方式	保温手段	电压调整周期/h	养护目标	养护时间/h
电固化升温阶段	电固化	铺盖棉被	—	升温至 45℃	0~3.5
自然水化放热升温阶段	—	铺盖棉被	—	混凝土中心温度峰值 ≤80℃	3.5~38.0
电固化控温阶段	电固化	铺盖棉被	1	温差 ±2℃	38.0~72.0

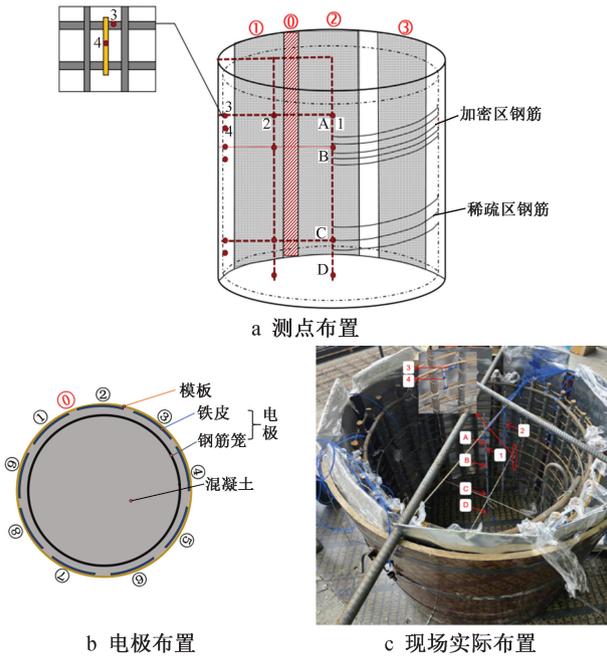


图 2 桩基温度测点及电极布置

Fig. 2 Temperature measuring points and electrode arrangement of pile foundation

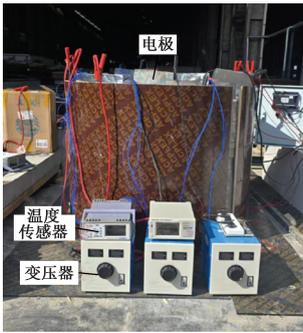


图 3 桩基电固化试验现场

Fig. 3 On-site of electric curing test for pile foundation

密区和稀疏区表面温度测点,并布设环境温度测点。

2.4 温度、电压和功率测试方案

2.4.1 温度

采用露点式热电偶进行温度测试,精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。温度数据采集采用 MODEL:EX3016 型多通道温度记录仪,采样频率为 1 次/min。

2.4.2 电压和功率

电固化过程采用 STG-5000VA 型单相调压器进行调压,采样频率为 1 次/h,电压、电流大小可由变压器直接读出。

3 电固化效果分析

3.1 混凝土温度

桩基混凝土电固化升温阶段温度变化曲线如图 4 所示,温度传感器安装位置编号由电极位置、高度段、测点位置组成,如 ②A-1 表示 ②号电极 A 段

(混凝土顶部区)中心测点。

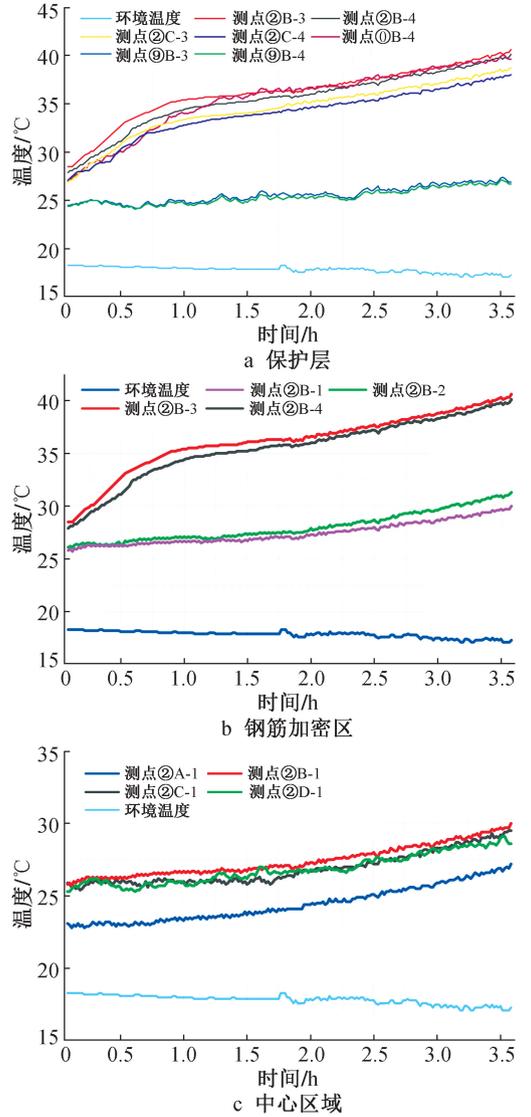


图 4 桩基混凝土电固化升温阶段温度变化曲线

Fig. 4 Temperature change curves of pile foundation concrete during the heating stage of electric curing

由图 4 可知,电固化升温阶段桩基混凝土升温效果明显,不仅可快速提升桩体温度,且通过布设局部电极能够实现桩体整体加热,同时钢筋密度、电极位置、桩体轴向及径向位置等因素明显影响了桩体温度分布与升温效率。对于保护层混凝土温度变化,对比加热组测点 ②B-3, ②B-4 与对照组测点 ⑨B-3, ⑨B-4 测温数据可知,3.5h 之内桩基保护层混凝土在电场作用下温度上升约 12.5°C ,而自然水化放热处仅上升约 2.5°C ,这表明电固化升温效果良好。对比钢筋加密区测点 ②B-3, ②B-4 与钢筋稀疏区测点 ②C-3, ②C-4 可知,钢筋加密区升温效果好于钢筋稀疏区,钢筋加密区升温幅度始终大于

钢筋稀疏区升温幅度,这是因为钢筋的存在会导致混凝土空间电流密度分布不均^[16-17],加密区钢筋分布更密集,电流密度更大,升温更明显。此外,通过对比测点②B-4、①B-4测温曲线可知,电极中间的混凝土起始温度较电极布置处低,但加热1.5h后二者温度基本持平,说明2片电极加热产生的热量可快速传递至电极中间,证明了通过布局局部电极加热混凝土桩的方法可行性。

图4b反映了桩基混凝土钢筋加密区由内到外的温度变化,可知初始3h内桩基混凝土中心区域因水化放热仅升温约5℃,而保护层混凝土因通电加热升温约15℃,混凝土表面即使相较于内部中心区域释放大量的水化热,电固化依然有良好的升温效果。

图4c反映了桩基混凝土中心区域自上而下的温度变化,可知测点②B-1、②C-1、②D-1温度相近,且均高于测点②A-1温度,温差约为3℃,主要原因是测点②A-1靠近混凝土桩表面,受到环境热传递影响大,散热较多^[18]。测点②D-1虽位于混凝土桩边缘,但桩底部与地面接触,地基土比热容大,热量传递需更长的时间,且下部土体流动性差,无法像空气那样通过对流带走热量,使下部混凝土热量难以快速扩散,进而导致热量在下部混凝土边缘积累,温度较高。

桩基混凝土电固化控温效果如图5所示,由图5可知,电固化技术具备优异的控温效果,可精准调控桩体内部温差并维持温度稳定,各项温度指标均符合规范要求。

由图5a环境温度曲线可知,环境温度昼夜变化范围为15~20℃。电固化升温阶段结束后大部分测点温度持续攀升至约48℃,这是因为桩基混凝土自身开始进行水化放热。停止加热后由于保护层在混凝土外部始终与外界环境进行热交换,温度下降至合适温度。在试验进行38h后重新进行通电加热控制温差,通过调整电压的方式,基本可控制保护层混凝土温度在45℃的合适区间,符合GB/T 51028—2015《大体积混凝土温度测控技术规范》要求。对比测点②B-3、②B-4、①B-3、①B-4温度可知,未加热的保护层混凝土温度在72h内持续下降,与中心区域混凝土温差约8℃。

由图5b可知,电固化升温阶段结束时保护层混凝土温度超过中心区域混凝土温度约10℃。停止加热后随着水化放热的进行,中心区域混凝土温度快速上升,38h自然水化结束时中心区域混凝土温度反超保护层混凝土温度约5℃,后续的电固化控温有效缓解了温差波动。电固化可使桩基混凝土

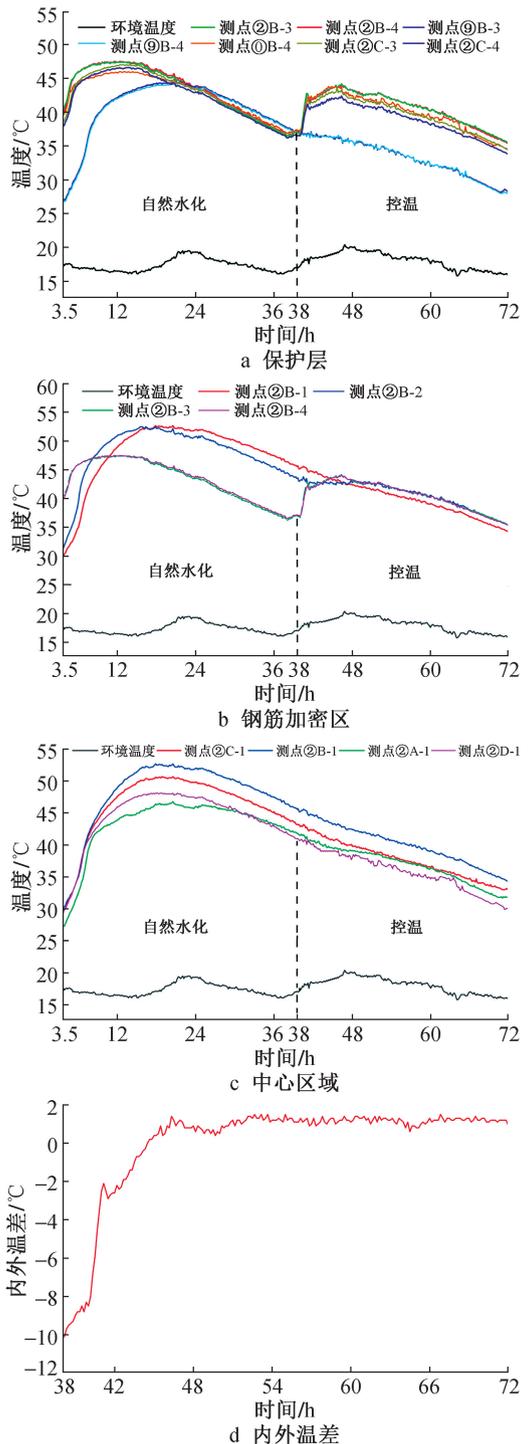


图5 桩基混凝土自然水化和电固化控温阶段温度变化曲线

Fig. 5 Temperature change curves of pile foundation concrete during natural hydration and temperature controlled stage of electric curing

在室外环境下3d内成型温度为30~55℃。

由图5c可知,自然水化阶段桩基混凝土中心区域温度由高到低分别为钢筋加密区、钢筋稀疏区、桩基底部、桩基顶部。钢筋加密区温度大于钢筋稀疏区的原因是相较于钢筋稀疏区,钢筋加密区向内

表 2 桩基电固化过程三相交流电电压与电流

Table 2 Three-phase AC voltage and current during pile foundation electric curing

电压情况	火线 1		火线 2		火线 3		零线电流/A
	电压/V	电流/A	电压/V	电流/A	电压/V	电流/A	
三相电压相同	18.9	17.69	17.7	17.25	17.1	18.69	0.4
三相电压不同	18.9	17.69	12.0	11.76	3.0	2.94	10.4
两相电压相同	18.9	17.69	12.0	11.76	12.0	11.77	6.3

传递的热量更多。桩基顶部温度最低的原因是该测区靠近混凝土桩边缘,受环境热传递的影响大。

图 5d 反映了二次通电加热且调整电压时混凝土内外温差变化,可知电固化控温可将保护层和中心区域混凝土温差调控至 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内,满足规范要求。

3.2 三相交流电电压与电流

取升温 1h 后的三相交流电进行测量,结果如表 2 所示。在电固化过程中,为保证各相升温效果一致,需控制每相电压、电流相等。由表 2 可知,三相电压相同时,各相电流可经钢筋笼相互抵消,零线端电流输出降至 0.4A。如果采用单相电,为保证相同的升温功率,火线与零线电流均为 53A。三相电压不同时,由于各相间电流大小不完全相同,各相间电流不能完全抵消,导致电流流向零线端的大小为 10.4A。两相电压相同时,由于火线 1 电流较大,输出电流大于火线 2,3,也不能完全抵消电流,导致电流流向零线端的大小为 6.3A。综上所述,三相交流电应用于电固化技术可有效避免零线电流汇聚,降低安全风险。

3.3 能耗

试验采用 3 台调压器进行控温,并分别记录 3 台调压器电压和功率,对电压依次编号为 U_1, U_2, U_3 ,对功率依次编号为 P_1, P_2, P_3 。桩基混凝土电固化过程的电压和功率如图 6 所示。由图 6 可知,电固化升温阶段变压器给电极施加了平均 15V 电压,此时变压器实际显示电流为 13.4A,因此桩基混凝土初始电阻小,仅为 1.12Ω ,此阶段变压器平均功率达 201W,仅需通电加热 3.5h 即可达到目标温度 45°C 。随后停止加热,由桩基混凝土自然水化放热。控温阶段通过调整电压的方法实现电固化,在 38h 时进行了保护层控温加热,此时变压器平均功率达 80W,可使外部保护层混凝土温度在 4h 内上升到接近内部中心区域温度。随后降低功率至 25W 进行小温差控制,随着水化反应的进行,混凝土电阻持续增大^[19-20],为尽可能维持 25W 发热功率不变,变压器电压需随时间不断升高。42h 后的电固化小温差控制过程最高电压为 11.0V,平均功率为 32.1W。

通过积分计算功率曲线与时间轴包围的面积,

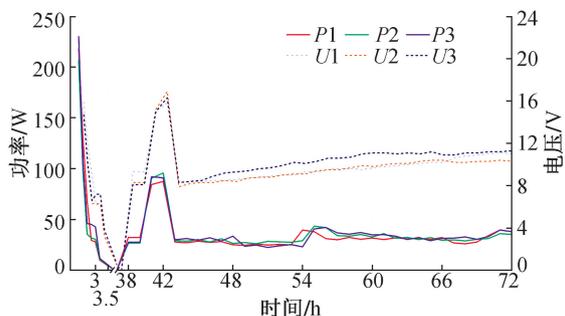


图 6 桩基混凝土电固化电压和功率变化曲线

Fig. 6 Voltage and power change curves of pile foundation concrete during electric curing

整个电固化过程共消耗电量 $6.12\text{kW}\cdot\text{h}$,即 3d 养护能耗为 $5.67\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,约为传统蒸汽养护混凝土能耗 $163.27\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 的 3.5%,节能效果较好。此外,整个电固化过程电压低于 36V 的安全电压。

4 结语

1) 电固化可使桩基混凝土保护层和内部中心区域温差控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内,实现了桩基混凝土养护过程中内外区域温度基本一致,可降低温度应力,防止温度裂缝的生成。

2) 电固化可使桩基混凝土在室外环境下成型温度为 $30\sim 55^{\circ}\text{C}$,且混凝土 3d 强度达 29.4MPa ,实现了桩基混凝土强度的快速形成,同时 3d 电固化用电量仅为 $6.12\text{kW}\cdot\text{h}$,相较传统蒸汽养护方法降低了碳排放。

3) 采用三相电方式进行混凝土电固化可降低电流,减小电固化过程导线截面面积,降低施工成本,且可避免大电流导致的用电安全问题。

参考文献:

- [1] 徐彬,邱俊霞,周方成,等. 输电塔主材角钢 GFRP 双侧加固后承载性能模拟研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(20): 144-148.
XU B, QIU J X, ZHOU F C, et al. Simulation research on bearing performance of transmission tower main member steel angles after GFRP bilateral reinforced[J]. Construction technology, 2024, 53(20): 144-148.
- [2] 祁帅,冯鑫鑫,李程飞,等. 大体积混凝土结构施工智能温控系统研究与应用[J]. 建筑施工, 2025, 47(9): 1365-1368, 1378.

- QI S, FENG X X, LI C F, et al. Study and application of intelligent temperature control system for mass concrete structure construction [J]. *Building construction*, 2025, 47 (9): 1365-1368, 1378.
- [3] 赵文斌, 赵永鹏, 刘建勋. 低温、大温差地区预制混凝土箱梁养护制度研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2020(8): 38-42.
- ZHAO W B, ZHAO Y P, LIU J X. Study on steam maintenance technology of precast concrete box girder at low temperature and large temperature difference area[J]. *China concrete and cement products*, 2020(8): 38-42.
- [4] SHOUKRY S N, WILLIAM G W, DOWNIE B, et al. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete [J]. *Construction and building materials*, 2011, 25(2): 688-696.
- [5] 皮进勇. 高寒地区水工混凝土冬季施工关键技术及质量控制[J]. *水泥*, 2025(9): 149-151.
- PI J Y. Key technologies and quality control for water engineering concrete construction in cold regions in winter[J]. *Cement*, 2025(9): 149-151.
- [6] 陈芝琦, 王世平, 谢洪栋, 等. 智能混凝土喷淋养护系统及工程应用研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2024, 53(22): 60-64.
- CHEN Z Q, WANG S P, XIE H D, et al. Research on intelligent concrete spray curing system and engineering application [J]. *Construction technology*, 2024, 53(22): 60-64.
- [7] 肖强, 姚丽敏. 船闸底板大体积混凝土裂缝控制技术研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(5): 127-131.
- XIAO Q, YAO L M. Control technology for cracking of large volume concrete in bottom slab of ship lock [J]. *Construction technology*, 2025, 54(5): 127-131.
- [8] ZEYAD A M, TAYEH B A, ADESINA A, et al. Review on effect of steam curing on behavior of concrete [J]. *Cleaner materials*, 2022, 3: 100042.
- [9] YANG Z H, XIE Y J, HE J H, et al. Experimental investigation on mechanical strength and microstructure of cement paste by electric curing with different voltage and frequency [J]. *Construction and building materials*, 2021, 299: 123615.
- [10] WADHWA S S, SRIVASTAVA L K, GAUTAM D K, et al. Direct electric curing of in-situ concrete [J]. *Batiment international, building research and practice*, 1987, 15: 97-101.
- [11] WILSON J G, GUPTA N K. Equipment for the investigation of the accelerated curing of concrete using direct electrical conduction [J]. *Measurement*, 2004, 35(3): 243-250.
- [12] 张冉, 张秀崧, 童富果, 等. 温度对混凝土比热容的影响试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2021, 19(2): 203-207.
- ZHANG R, ZHANG X S, TONG F G, et al. Experimental study on the influence of temperature on specific heat capacity of concrete [J]. *Journal of water resources and architectural engineering*, 2021, 19(2): 203-207.
- [13] HONORIO T, BARY B, BENBOUDJEMA F. Thermal properties of cement-based materials: multiscale estimations at early-age [J]. *Cement and concrete composites*, 2018, 87: 205-219.
- [14] PIRO N S, MOHAMMED A S, HAMAD S M. Electrical resistivity measurement, piezoresistivity behavior and compressive strength of concrete: a comprehensive review [J]. *Materials today communications*, 2023, 36: 106573.
- [15] TIAN Z, DUAN B D, NIU X L, et al. Establishment and experimental validation of a dynamic heat transfer model for concrete radiant cooling slab based on reaction coefficient method [J]. *Energy and buildings*, 2014, 82: 330-340.
- [16] ARYA C, SAIDSHAWQI Q, VASSIE P R W. Factors influencing electrochemical removal of chloride from concrete [J]. *Cement and concrete research*, 1996, 26(6): 851-860.
- [17] XIA J, LI T, FANG J X, et al. Numerical simulation of steel corrosion in chloride contaminated concrete [J]. *Construction and building materials*, 2019, 228: 116745.
- [18] 李耀翔. 大体积混凝土施工温控难题及应对策略[J]. *中国水泥*, 2025(5): 89-91.
- LI Y X. Problems and countermeasures of temperature control in mass concrete construction [J]. *China cement*, 2025(5): 89-91.
- [19] 路新瀛, 郭保林, 邵新鹏, 等. 混凝土耐久性在线监测(I): 混凝土电阻变化[J]. *混凝土世界*, 2015(8): 48-53.
- LU X Y, GUO B L, SHAO X P, et al. On-line monitoring of concrete durability (I): Concrete resistance change [J]. *China concrete*, 2015(8): 48-53.
- [20] 张蕊, 李金龙, 邓稚川, 等. 直接电养护对混凝土性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2023(4): 54-58.
- ZHANG R, LI J L, DENG Z C, et al. Effect of direct electric curing on properties of concrete [J]. *China concrete and cement products*, 2023(4): 54-58.

(上接第 78 页)

- [11] 范未鹏. 软岩隧道开挖围岩变形与受力特征研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(9): 123-127.
- FAN W P. Study on deformation and stress characteristic of surrounding rock in soft rock tunnel excavation [J]. *Construction technology*, 2025, 54(9): 123-127.
- [12] 罗彦斌, 陈建勋. 黏弹性条件下大跨度公路黄土隧道二次衬砌施作时机[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(5): 86-95.
- LUO Y B, CHEN J X. Construction time of secondary lining of large span loess tunnel under viscoelasticity condition [J]. *Journal of Chang'an University (natural science edition)*, 2021, 41(5): 86-95.
- [13] 傅鹤林, 赵一博, 王立志, 等. 基于 PSO-SVR 算法的悬臂式掘进机工作性能预测[J]. *铁道工程学报*, 2024, 41(9): 92-98.
- FU H L, ZHAO Y B, WANG L Z, et al. Performance prediction of roadheader by PSO-SVR algorithm [J]. *Journal of railway engineering society*, 2024, 41(9): 92-98.
- [14] 王耀龙, 梁庆, 尹帆. 软岩大变形公路隧道施工控制技术[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(9): 135-139.
- WANG Y L, LIANG Q, YIN F. Construction control technology of soft rock large deformation highway tunnel [J]. *Construction technology*, 2025, 54(9): 135-139.
- [15] 王宁. 山岭长大隧道机械化施工及适应性改造技术研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(4): 60-66.
- WANG N. Research on mechanized construction and adaptive transformation technology of mountain long tunnel [J]. *Construction technology*, 2025, 54(4): 60-66.