

现浇结构电阻丝加热法冬季施工技术

韩俊

(中交一航局第五工程有限公司)

摘要: 为加快某极寒地区厂房项目冬季施工进度和节约施工成本,采用预埋电阻丝加热的方法养护混凝土。基本原理是将电能转化成热能养护混凝土,在钢筋上绑扎绝缘、通电可发热的电阻丝,在完成混凝土浇筑后,供电系统为电阻丝通电,电阻丝将产生的热能传递给混凝土,使混凝土内部温度提高,为混凝土强度增长提供温度保障。该方法使极寒地区现浇混凝土达到正温养护的目标,对比传统冬季施工方法,既能保证混凝土质量,从根本上解决混凝土受冻问题,又能缩短冬季施工工期,还能大大降低冬季施工成本,同时也降低了冬季施工安全风险、环保风险,可为极寒地区冬季现浇结构混凝土施工提供参考。

关键词: 极寒地区;现浇结构;冬季施工;电阻丝加热;混凝土养护

0 引言

在我国黑龙江省、吉林省等地区冬季施工,面临极寒气温的条件下,只能花费巨大的施工成本,采取暖棚法、综合蓄热法等施工方法。这些方法也能取得一些成效,但综合效果欠佳,施工进度慢,成本高,质量也难以控制,故一些工程项目只能采取冬歇的办法,导致工期增长。面对抢险救灾等紧急性工程时,所耗费的人力、物力成本将成倍增长。东欧地区如俄罗斯、白俄罗斯、乌克兰等极寒地区,每年有近一半时间处于冬季施工期,平均气温 $-25\sim-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低可达 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为保证工程建设进度、质量,控制冬季施工成本,现浇结构电阻丝加热法技术在当地得以迅速推广。现浇结构电阻丝加热法养护混凝土技术,是一种创新的冬季施工技术,具有施工简单、成本低、安全环保、质量风险低等优点。多年来成功的施工案例验证了该技术的可行性和经济性,在极寒地区值得推广应用。

1 技术原理

根据水泥的特性,更适宜的养护温度会促进混凝土强度增长。在极寒的冬季,通过采取措施使混凝土养护条件改善,保证混凝土强度增长需要的最适宜温度,从混凝土内部直接采取加热措施,效果会更加直接和明显。电阻丝加热法的实质是通过接触方式将电阻丝产生的热量传递到混凝土中,敷设在钢筋上的电阻丝作为电阻加热器,为混凝土强度增长提供源源不断的热量,以保证

混凝土在适宜的温度条件下提高早期强度。混凝土浇筑前,将可发热的电阻丝绑扎在钢筋上,如同在混凝土内部铺设1层或多层“电热毯”。混凝土浇筑完成后,通电加热电阻丝,热量直接传递给混凝土,促使早期强度增长。为防止热量散失,混凝土上表面覆盖保温材料,其他截面的混凝土利用木模板自身对混凝土发挥保温作用。电阻丝加热原理见图1。

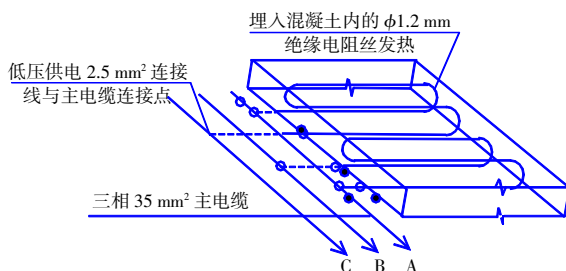


图1 电阻丝加热原理图

2 适用范围

根据白俄罗斯建筑标准与规范 СНИП 3.03.03—87《承重结构和围护结构》^[1]相关条文,采用现浇结构电阻丝加热法养护混凝土技术需同时满足以下条件:

1) 现浇柱、梁、桩承台、楼板、楼梯等构件。

2) 结构表面系数 $M=f/v=4\sim 10$ 的构件。

式中: f 为混凝土构件的冷却面面积, m^2 ; v 为混凝土构件的体积, m^3 ; M 为结构表面系数, m^{-1} 。

3) 室外气温范围 $-40\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

以白俄罗斯某厂房项目为例, 某一单体为钢筋混凝土框架结构, 共5层, 层高5.4 m, 现浇楼板长24 m, 宽18 m, 楼板面积 432 m^2 , 板厚200 mm, 楼板钢筋采用 $\phi 16@200$ 双层双向布置。

现浇楼板结构表面系数 $M=5\text{ m}^{-1}$, 白俄罗斯冬季室外平均气温为 $-25\sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。综上可知, 本工程现浇结构板满足电阻丝加热法适用范围。

3 施工工艺

3.1 施工流程

电阻丝加热法施工流程图见图2。

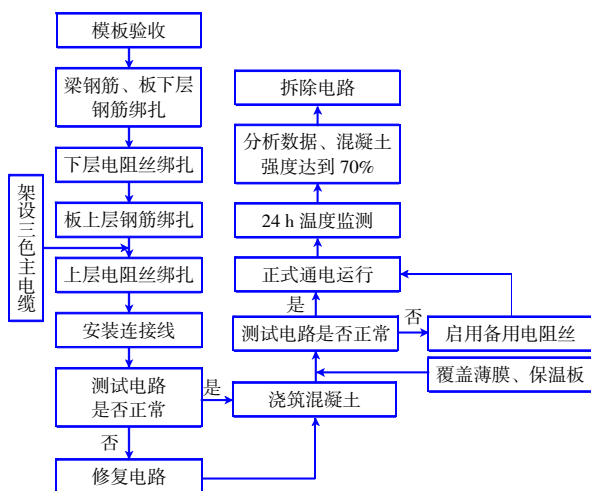


图2 电阻丝加热法施工流程图

3.2 施工准备

3.2.1 供热分区

考虑冬季混凝土浇筑的特殊性, 如果大面积浇筑完成后再进行通电加热养护, 势必会导致最先浇筑的混凝土由于自身温度流失而受冻, 故通常把楼板分成几个区域, 分区安装、分区浇筑、分区通电、分区养护, 这样可以确保每个区块混凝土在浇筑完成后第一时间开始通电养护。本工程将现浇楼板划分为4个独立供电单元, 每个单元尺寸为 $9\text{ m}\times 12\text{ m}$ 。

3.2.2 材料选型及设置

根据施工工况选用设备和材料, 对每个单元进行用电负荷计算, 确定最终材料设备的型号、规格和数量。选用白俄罗斯当地市场容量80 kV, 55~80 V 的低压变压器, $\phi 1.2\text{ mm}$ 的单股带绝缘皮的镍铁电阻丝, 2.5 mm^2 的单股铝芯电线作为连接线, 35 mm^2 的多股铝芯电缆作为主供电电缆, 楼板底模和侧模均为18 mm 厚胶合板, 保温层为50 mm 厚挤塑聚苯板, 混凝土表面覆盖聚乙烯薄膜

保湿。

根据白俄罗斯国家建筑标准与规范СНИП11.42—101《现浇结构电阻丝加热法工艺卡》^[2], 电阻丝绑扎间距为200 mm。变压器额定电压80 V, 单根电阻丝长36 m, 直径1.2 mm, 电阻 $0.999\text{ }\Omega/\text{m}$, 每个 $9\text{ m}\times 12\text{ m}$ 板单元安装36根电阻丝, 同时系数 k 取0.95, 功率因数取0.7。

单根电阻丝发热功率:

$$P_1 = U^2 / R = 80^2 / (36 \times 0.999) = 178.0\text{ W}$$

36根电阻丝总发热功率:

$$P_2 = P_1 \times 36 = 6\,406.4\text{ W}$$

变压器实际功率:

$$P_3 = 80 / (0.95 / 0.7) = 58.9\text{ kW}$$

楼板4个区域总实际消耗功率:

$$P_4 = 6\,406.4 \times 4 = 25.6\text{ kW}$$

因 $25.6\text{ kW} < 58.9\text{ kW}$, 故楼板4个区域用1台变压器即可。

3.3 电加热区域布置

为减少线路降压损失, 变压器距离加热区不超过25 m, 安装平稳、固定牢固, 加装防护栏。加热区设置工作区围栏, 安装警示装置和照明灯, 配置灭火器, 悬挂安全劳动保护标志, 将变压器接入供电网并在无负荷时对其进行试验, 同时检查临时照明和温度控制自动化系统的运行情况。

3.4 电阻丝安装

按照电阻丝布置图安装电阻丝, 双层单向布置。安装步骤为: 绑扎板下层钢筋→绑扎下层电阻丝→绑扎板上层钢筋→绑扎上层电阻丝→安装连接线→连接线接入主电缆→线路测试→浇筑混凝土→二次线路测试→调试电压→供热。为确保主电缆负荷均匀分配, 每根电阻丝与连接线接头用彩色绝缘胶区分, 颜色对应主电缆颜色, 连接方式为BB连接, AA连接, CC连接。电阻丝布置图见图3。

安装注意事项:

- 1) 电阻丝接线处外露混凝土长度不大于5 cm, 避免绝缘层局部高温融化;
- 2) 电阻丝安装不宜拉伸太紧, 防止浇筑混凝土时横向挤压拉伸断裂和振捣破坏;
- 3) 楼板边缘区域受外界气温影响较大, 更易散失热量, 500 mm 范围内加密安装, 间距为其他区域的1/2;
- 4) 接线处均需使用绝缘胶布包裹, 避免漏电

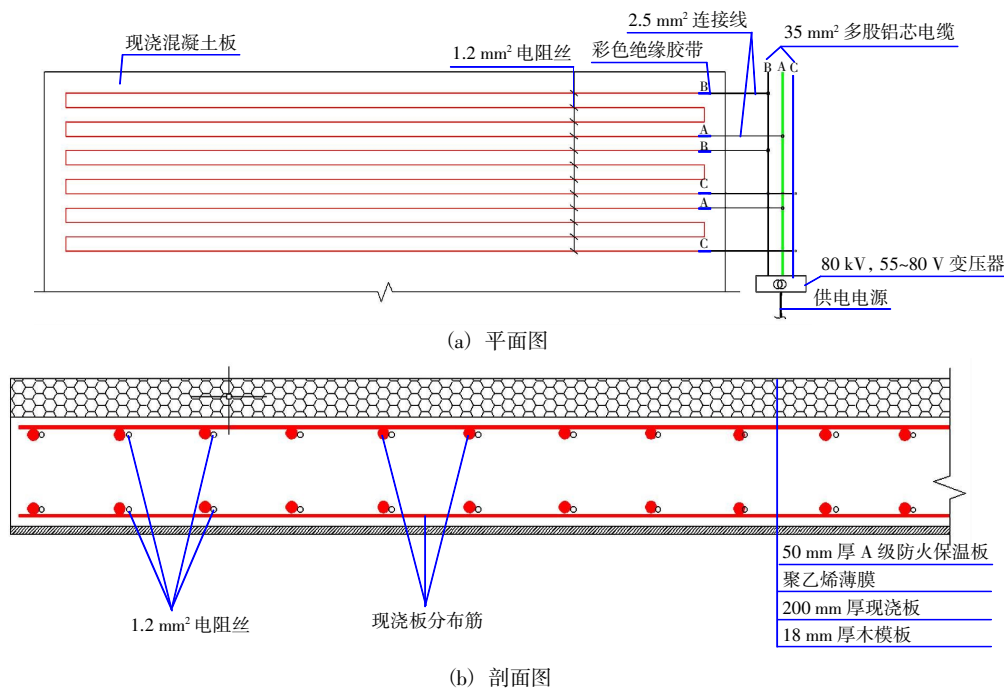


图 3 电阻丝布置图

造成短路, 从而影响电路正常运行。

3.5 闭合电路

混凝土浇筑过程中, 应提前与拌合站协调, 以保证不间断供料, 不间断浇筑。为防止极寒天气导致热量散失过快, 混凝土入模温度需控制在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。为确保对混凝土及时供热, 采取“分区安装、分区浇筑、分区通电、分区养护”的原则施工。完成第 1 块区域混凝土浇筑后, 进行试通电检查, 测试电路是否正常, 若存在个别电阻丝单元因混凝土振捣导致断开无法通电时, 应立即将提前预埋的备用电阻丝接入电路, 再进行电路系统调试, 调试完毕后, 正式开始通电运行。记录变压器电压档位、电阻丝通过电流平均值, 作为其他区域电路系统调试的参考值。正常通电加热后, 迅速按要求安装测温孔, 并安装热传感器, 启动温度监测系统。

3.6 温度监测

建立混凝土温度监测系统, 埋设电子传感器, 利用无线监测技术获得混凝土内部温度变化情况。供热养护 10 h 内, 每小时测量供电电路中的电流和电压; 供热养护 3 d 内, 恒温加热过程中温度监测频率 2 h/次, 升温过程中测温频率不低于 1 h/次; 供热养护 3~7 d 内, 每 8 h 测温 1 次; 超过 7 d, 每 12 h 测温一次。

考虑温度应力对混凝土的影响, 加热过程中,

温度变化速率控制在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 以内, 每小时提升 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右为宜, 最高温度控制在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 若超过 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 应及时断电并停止加热。当混凝土内部温度降低至 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 可以继续供电加热。分 2 个班组维护线路和测温工作, 检测电流强度和电路电压, 并进行记录。

观察主电缆和连接线连接处是否有电火花, 若有则表明该单元电阻丝线路可能短路, 建议剪断该单元与主电缆的连接, 避免因为短路而引起电流局部骤然增大而导致主电缆烧坏, 甚至引起火灾等安全事故。

3.7 混凝土强度评定

混凝土强度在加热结束时不得低于设计强度的 70%。根据 JGJ/T 104—2011《建筑工程冬期施工规程》^[3], 用成熟度法计算混凝土早期强度。采用计算法和图解法 2 种方法综合估算混凝土强度。基本原理是, 在相同配合比条件下, 混凝土成熟度和强度基本成正比。

制作 10 组混凝土标准试块进行标准养护, 测得 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 标准养护条件下各龄期强度见表 1, 混凝土浇筑后测得构件的温度值见表 2。

表 1 混凝土标准养护试件各龄期试验强度值

标准养护龄期/d	1	2	3	7
抗压强度/MPa	4.1	11.2	15.3	21.7

表2 混凝土浇筑后温度监测记录

从浇筑起算的时间/h	0	2	4	6	8	10	12	38
温度/℃	15	20	25	29	31	35	38	38

1) 计算法

混凝土自浇筑起至 38 h 时的强度计算步骤为：

根据表 1 标准养护试件 1~7 d 龄期强度值，通过回归分析，合成曲线方程：

$$f=29.459e^{-\frac{1.989}{d}} \quad (1)$$

式中： f 为抗压强度，MPa； d 为养护龄期，d； e 为自然对数底数，取 2.72。

根据 JGJ/T 104—2011《建筑工程冬期施工规程》^[3]和表 2 实测混凝土养护温度数据，由式(2)计算混凝土已达到的等效龄期(相当于 20℃标准养护的时间)。

$$t=\sum \alpha_T \cdot t_T \quad (2)$$

式中： t 为等效龄期，h； α_T 为温度为 T ℃的等效系数； t_T 为温度为 T ℃的持续时间，h。

经计算得出： $t=3.25$ d；

将等效龄期 t 代替 d 代入式(1)得混凝土抗压强度值为：

$$f=29.459e^{-\frac{1.989}{3.25}}=16.0 \text{ MPa}$$

2) 图解法

根据表 1 标准养护试件各龄期强度数据绘制龄期-强度曲线如图 4 所示。

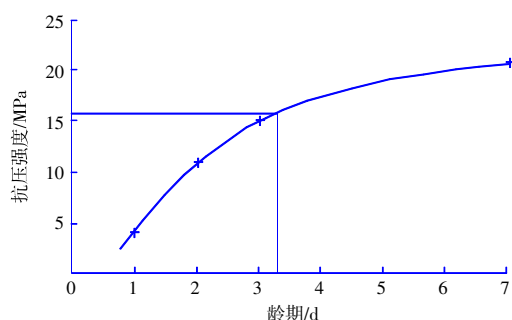


图4 混凝土龄期-强度曲线

按 JGJ/T 104—2011《建筑工程冬期施工规程》^[3]和表 2 实测混凝土养护温度数据，计算等效龄期

$t=3.25$ d。

以等效龄期 t 作为龄期，在图 4 中找到相应的点，对应强度值为 16.0 MPa。

综上所述，应用计算法和图解法计算混凝土自浇筑起至 38 h 时的强度均为 16.0 MPa，2 种方法相互验证，故可采用此方法对该工程混凝土强度进行评定。

4 安全、质量保证措施

极寒地区现浇结构混凝土养护相比正常条件下自然温度养护难度更大，模板、钢筋、电路系统、混凝土各专业施工需紧密配合，特别是电路系统细部节点繁杂、连接点多、重要性高、危险性较大，保证电路系统连接质量、安全尤为重要。施工过程中采取的主要措施包括：根据工艺规程对电加热设备调试、运行进行检查，根据计算数据对电加热过程温度、电流强度和电压进行检查，严格控制工序验收。通电过程中、停止前对混凝土强度值进行测定和验证，掌握混凝土强度增长情况，以确定停止供热时间。按照施工方案和技术交底要求对电路系统进行安装、调试、运行、维护，全过程配备橡胶绝缘鞋和绝缘手套。电气设备以及所有金属导电部分均设置可靠的接地，接通电源之前严格检查回路的电阻，其数值不能超过 4 Ω。

5 结语

白俄罗斯某厂房项目现浇混凝土养护通过采用电阻丝加热法的冬季施工技术，取得了良好的经济效益和社会效益，圆满完成了各项指标，并节约冬季施工成本 50 余万元，缩短工期 40 d，同时也获得了 2018—2019 年度国家优质工程奖。该技术的成功应用，解决了极寒地区施工混凝土养护问题，为后续项目冬季施工起到了技术指导作用。我国部分地区冬季温度极低、跨越时间长，电阻丝加热法养护混凝土冬季施工技术在这些区域有着广阔的前景，值得研究和推广应用。

参考文献：

- [1] СНИП3.03.03—87, 承重结构和围护结构[S].
- [2] СНИП11.42—101, 现浇结构电阻丝加热法工艺卡[S].
- [3] JGJ/T 104—2011, 建筑工程冬期施工规程[S].