

# 大型综合枢纽铁标大体积混凝土温控技术研究

孙文祺

上海建工集团股份有限公司 上海 200080

**【摘要】**：随着我国高铁网络渐趋密集，涉铁大型综合交通枢纽建设规模与标准不断提高。铁路标准在混凝土温控等核心指标上比国标更严格，超深基坑、高温汛期施工及高强混凝土应用，让温控防裂难度大幅增加。本文以东方枢纽上海东站为例，构建“机理剖析 - 指标解构 - 全链预控 - 动态调控 - 长效验证”的系统化技术管控体系。一是从铁路工程耐久性机理入手，深入解析铁标温控指标体系逻辑；二是建立基于原材料温度的出机温度预测模型，提前把控温控；三是研发融合智能管冷与季节性响应的动态温控技术；四是构建“施工期温控 - 长期性能验证 - 技术经济评价”综合效益模型，论证技术体系的先进性与推广价值。研究成果保障了工程大体积混凝土质量，形成可复制技术方法，为相关标准修订提供可靠依据。

**【关键词】**：铁路规范；大体积混凝土；温度控制；机理分析；智能管冷；耐久性

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.022

## 引言

我国交通基建成就斐然，“八横八纵”高铁网推进，大型综合交通枢纽建设火热。涉铁工程执行铁总企业标准，在大体积混凝土温控指标上严于国标和行标，体现铁路工程对结构性能的高要求。当前大体积混凝土温控研究多集中于水利大坝与普通超高层建筑底板，涉铁工程极端工况下系统性技术研究匮乏。本工程挑战典型，温控压力大。为此，文章从铁标与行标差异的耐久性机理着手，构建全链路技术管控体系，攻克铁标大体积混凝土温控难题，为同类工程及标准完善提供依据。

## 1 工程概况与重难点分析

### 1.1 工程概况

上海东站位于浦东新区祝桥镇，是集航空、国铁、市域铁、城市轨交于一体的世界级交通枢纽（图1）。基坑呈现“超大、超深、群坑套叠”特征，总面积近21万m<sup>2</sup>（图2），最大挖深28.95m。



图1 项目效果图

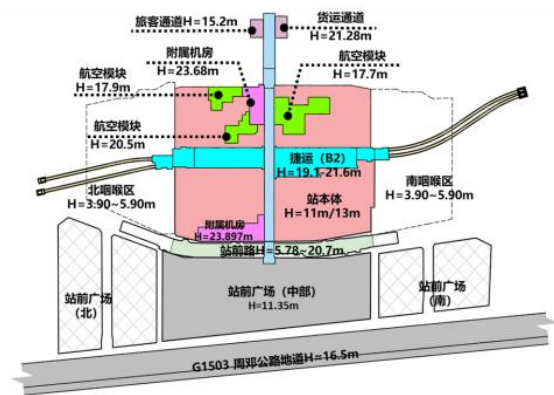


图2 上海东基坑平面图

本工程依据后浇带将底板共分为88块（图3），普遍厚度1.0m，承台及落深区厚度达3.0m~5.3m（图4）。施工周期横跨汛期及高温季节，温控环境极为不利。本文研究对象为参照铁标施工的底板、承台及部分高强混凝土大体积柱（C70）。

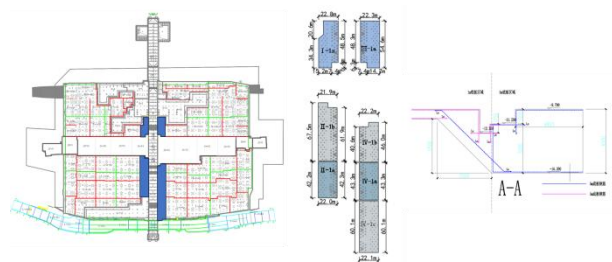


图3 上海东底板分块图

图4 21号线两侧5m厚底板

图5 1m/5m底板过渡节点

本文所述内容主要为参照铁标施工范围，即底板、承台、承轨层柱。

表1 典型大体积柱概况

序号	柱截面	一次浇筑高度	砼强度
1	2300X2300	5.3m	C60 (铁标)
2	2300X4800	5.3m	C60 (铁标)
3	2300X2700	5.3m	C70 (铁标)

### 1.2 铁标体系下温控难点与机理分析

项目技术难点在于铁标温控限值更严,以及工况与材料特性叠加形成的复杂热-力耦合场。与国标核心差异和耐久性机理表现如下:铁标构建系统性防裂体系,严格控制入模温度( $\leq 28^{\circ}\text{C}$ )、芯部温度( $\leq 65^{\circ}\text{C}$ )和里表温差( $\leq 20^{\circ}\text{C}$ )。芯部温度限值是抑制延迟钙矾石生成,混凝土内部高温会使早期钙矾石分解、后期重新结晶膨胀产生微裂缝,影响铁路结构动荷载耐久性,国标对此机理应对不足、限值宽泛。入模温度和里表温差的严格要求是为控制温度梯度,铁路结构断面复杂、约束度大,过高温梯度会产生表面或贯穿性裂缝,破坏结构整体性与防水性。

超薄底板与高强混凝土存在温控难题。5m厚底板无管冷措施时绝热温升超规; C60/C70大体积柱因胶凝材料用量大、水化放热集中,自收缩与温缩效应叠加,开裂风险高。需在降低绝热温升值和构建可控散热路径上实现技术突破。

表2 铁标温控与国标温控差对比表

项	内容	铁标	建设行业标准
原 材 料	水泥 (硅酸盐水泥/普通硅酸盐水泥)	比表面积 300-350 $\text{m}^2/\text{kg}$	比表面积 300-400 $\text{m}^2/\text{kg}$
		游离氧化钙 $\leq 1.0\%$	/
		熟料中铝酸三钙含量 $\leq 8.0\%$	/
	II级粉煤灰	氧化钙含量 $\leq 10\%$	/
		氯离子含量 $\leq 0.02\%$	/
	标准型高性能减水剂	含气量经1h变化量 $\leq 3\% \rightarrow /3\% \sim 6\% \rightarrow -1.5\% \sim +1.5\%$	/
		泌水率比 $\leq 20\%$	泌水率比 $\leq 60\%$
引气剂	收缩率比 $\leq 125\%$	收缩率比 $\leq 135\%$	

		28d 硬化混凝土气泡间距 $\leq 300 \mu\text{m}$	/
施 工	冬期施工启动	连续3d 低于 $5^{\circ}\text{C}$ 或最低气温低于 $0^{\circ}\text{C}$	连续5d 低于 $5^{\circ}\text{C}$ 或最低气温低于 $0^{\circ}\text{C}$
	入模温度	不宜高于 $28^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$
	温度控制	芯部温度不大于 $65^{\circ}\text{C}$	在入模温度基础上温升值不大于 $50^{\circ}\text{C}$
		芯部温度和表面温度,表面温度和环境温差不宜大于 $20^{\circ}\text{C}$	里表温差不宜大于 $25^{\circ}\text{C}$
拆模温度	新浇混凝土入模温度和已硬化部分表面温差不大于 $15^{\circ}\text{C}$ ,与新浇筑混凝土接触的已硬化混凝土、钢筋、模板等温度不应低于 $2^{\circ}\text{C}$ 。		
	芯部温度和表面温度,表面温度和环境温差不宜大于 $20^{\circ}\text{C}$ 。芯部温度开始降温前不得拆模,大风和气温急剧变化时不拆模	拆除表面保温覆盖时表面温度和环境温差不宜大于 $20^{\circ}\text{C}$	

## 2 全链路温度控制关键技术

为满足铁标严苛要求,我们构建了覆盖设计、预判、调控全过程的“四阶段”温控技术体系。

### 2.1 混凝土配合比设计与优化

本工程底板、承台、承轨层大体积柱均需用到铁标混凝土。项目混凝土配合比设计遵循设计-验证-审批-使用的原则,经第三方配合比验证合格后方可投入使用。所有使用原材料必须符合TB10424-2018《铁路混凝土工程施工质量验收标准》要求,尤其是本工程21号线两侧大体积柱,采用C70混凝土。

配合比设计是控温的第一道关口。我们摒弃单纯降低水泥用量的思路,建立了“低热、高抗裂、高耐久”协同优化设计方法:

(1) 胶凝材料体系的调控机理: 适量减少II型硅酸盐水泥含量,通过提高矿渣粉、粉煤灰等活性掺合料的比例,维持等效水胶比的情况下减少水泥含量,利用其二次水化反应慢、放热平缓的特性,在保证强度的同时“削峰”水化放热速率。

(2) 引入硅灰。由于C70混凝土在配置中为了控制发热采用了较低的水胶比,故增加了密度低、比表面积大、表面活

性高的硅灰,进而提高高性能混凝土的堆积密度,降低孔隙率,保障混凝土的强度利用<sup>[2]</sup>。其微集料填充效应和火山灰活性,补偿低水胶比带来的早期强度发展慢和界面过渡区薄弱等问题,实现强度-防裂-耐久的协调统一。

(3) 外加剂的协同作用: 选用具备缓凝与控制放热速率功能的聚羧酸减水剂<sup>[1]</sup>。这种减水剂能够降低水泥水化时热量释放的速率,进而降低混凝土可达到的最高温度。从化学层面让水化反应进程更为平缓,为热量散失创造时间条件,防止热量在前期大量快速积累。

## 2.2 入模温度精准控制

混凝土温控需对全链路温度进行把控。在加工与运输阶段,原材料温度和运输温升是关键影响因素。其核心策略是降低原材料温度、把控出机温度,同时控制运输温升,以此满足降低入模温度的严格要求<sup>[4]</sup>。

混凝土初始出机温度受原材料加工时即时温度的影响,不同原材料在配合比中的质量权重和自身比热容存在差异,对出机温度的影响程度也不同。通过参考相关资料、剖析原材料影响出机温度的权重案例,明确了各类原材料温控的重点方向,温度影响程度由高到低依次为:粗骨料>水>细骨料>水泥>矿粉和粉煤灰<sup>[4]</sup>。有鉴于此,实施了精准预冷策略:

(1) 粗/细骨料降温: 经计算,骨料降温 2℃,出机温度约下降 0.5-1℃。

具体措施如下: ①加强运输与装卸管理: 上海东站铁标拌站的砂石主要依靠船运。在粗骨料始发和卸料处,采用强化喷淋的方式降温。搬运工作安排在夜间进行,避开每日 10 点-16 点的高温时段。运输过程中要增设并覆盖防雨帆布,禁止使用外场暴晒过的砂石直接制作混凝土<sup>[3]</sup>。②设置全封闭料棚: 在砂石料区域设置全封闭料棚,防止阳光直晒,并配备相应的物理降温措施。③5 安装喷雾系统: 在料棚内设置喷水雾系统来降温,沿料场顶棚牵拉钢丝绳安装喷雾供水设备,使用高压喷嘴喷雾,每小时至少喷雾 15 分钟<sup>[4]</sup>。



图 6 粗骨料卸点喷淋降温

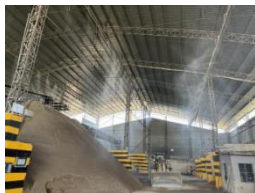


图 7 料棚喷雾降温

(2) 拌合用水: 拌合站设置独立的封闭式蓄水池,专门供应搅拌用水。在大棚顶部安装封闭保温大棚,同时在大棚上方搭建防护隔热设施,并配备喷淋设施,防止搅拌用水因阳光直射而升温。在进行混凝土拌合前,采购冰块投入拌合用水

池,将拌合用水温度控制在 5-10℃。实测表明,水温每降低 5℃,混凝土出机温度约下降 0.8-1.0℃。



图 8 采购冰块



图 9 拌合用水用冰块降温

(3) 粉料(胶凝材料): 东站铁标拌合站经过多次试验,确定了主要控制温度指标如下: 粉煤灰不大于 45℃,矿粉不大于 45℃,水泥不大于 55℃。

水泥、矿粉船运不足 3 天的需增加中间运储存转运仓,以便延长粉料降温时间。

在粉料罐体顶部安装喷淋装置,按确定的时长和频率对罐体喷水冷却,以降低温度。

对于粉煤灰,需与供应商共同协商,确定增加其在生产厂内的静置时间,从而降低粉煤灰温度。<sup>[3]</sup>



图 10 罐体喷淋降温

(4) 外加剂: 减水剂与引气剂需存于封闭空间,建议用桶装。在桶外安装空调,并增设封闭围挡,以降低外加剂温度。



图 11 外加剂置于空调房内

(5) 混凝土运输过程温度控制: ①为减少搅拌车罐体在阳光直射下温度上升,在罐体外包裹吸水帆布,出厂前充分淋水并保持湿润。②做好项目内外交通规划,保证搅拌车到达现场时不被长时间暴晒,通过高效调度使现场等待时间控制在 30 分钟以内。必要时,在上泵前进行第二次喷水降温。

通过全流程预先控制,高温季节混凝土入模温度成功控制在规范要求内。

### 2.3 动态温控与防裂技术

上海东站底板采用最厚达 5.3 米的铁标混凝土,其芯部温度高、水化热大。经数值仿真开展参数敏感性分析后发现,被动保温方式已难以满足需求,必须运用主动温控技术。为此,需在工艺试验中对相关参数进行验证。

(1) 底板及承台水化热分析:大体积混凝土施工前,采用数值仿真的方法进行模拟和评估,通过对混凝土的温度和应力状态进行施工过程跟踪计算。采用有限元软件 midas Civil 针对上海东站底板浇筑过程进行水化热分析,考察底板大体积混凝土浇筑后温度场变化情况和收缩、徐变产生应力分布状态。

以环境温度 20℃,大底板 C40 混凝土配合比参数,相邻两块底板进行浇筑分析,结果如下:

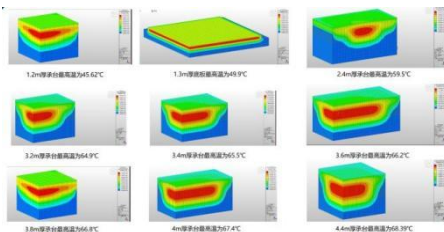


图 12 典型底板承台模拟最高温度

模拟采取的条件相较于实际施工条件,在温度控制方面更具有理想性,实际施工中环境温度更高,想达到铁标要求芯部温度不超过 65℃ 仍需采取进一步措施。

(2) 铁标大体积混凝土工艺试验:根据底板水化热分析计算,5m 厚底板约在第 10 天达到最高温度,总体最高温度达到 70℃ 以上,无法满足规范不大于 65℃ 的要求,为此考虑采取管冷控温措施。为印证数值仿真模拟的结果,同时测试管冷控温手段对铁标大体积混凝土施工的影响效果,采用工艺试验的方式,对比 5m 厚底板未设置冷却水管和设置冷却水管的差异。

水冷却循环系统由 1 水箱、2 循环水泵、3 稳压装置、4 温度计、5 压力表、6 回水管、7 冷却水管、8 进水管、9 溢流管和 10 温度计组成,水冷却循环系统运作示意图如下:

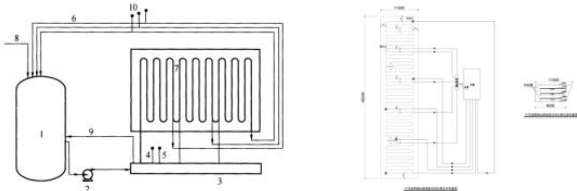


图 13 水冷却系统图 图 14 5m 厚底板冷却水管布置图

通水时间自砼覆盖冷却管开始,根据测温结果调节通水量直至停水。通水过程中严格控制通水量(0.8~1.0m/s),宁小勿大,避免由于通水量过大造成砼内部温度不均匀进而导致砼产生沿冷却水管径向的收缩裂缝。

根据测温记录,调节水冷却循环系统各项温差,控制要点如下:①控制进水水温与砼内部最高温度之差,温差宜为 15℃~20℃。水温过高时,通过水箱进/出水口之间的流动水,带走水箱内的热量;水温过低时,通过水箱加热棒及自动恒温控制设备,使得水温满足要求<sup>[5]</sup>。

②控制里表温差不大于 20℃,芯部温度不大于 65 摄氏度。温差大/温度过高,增加流量,温差小/温度正常,减小流量。

③控制降温幅度在 1.5℃/d~2.0℃/d。依据降温速率快慢,减小/增加水流量。在实际施工时,为了观测温控效果并控制降温速率,可参考测量进、出水口的水温。

冷却水管需在安装及启用期间,做好保护工作,从人防及物防角度出发,杜绝对冷却水循环系统造成破坏。



图 15 冷却水管现场安装示例

在底板及底板承台的冷却管使用完毕后,对冷却管道采用专用注浆机将浆体从管道一端压入另一端冒出浓浆,使整个冷却管道内的浆体饱满密实,浆体强度大于承台底板混凝土标号。

根据对两块分别放置了冷却管和未放置冷却管的底板进行测温对比分析,无管冷措施底板最高温度达到 74℃,大约在浇筑完成后第十天开始逐步降温;有管冷措施底板最高温度约 62℃,且大约在浇筑完成后第五天开始逐步降温。可知管冷措施对温控具有一定成效。

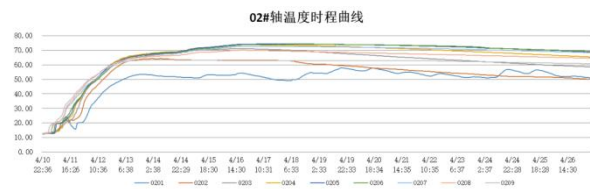


图 16 无冷却管措施底板温度时程曲线

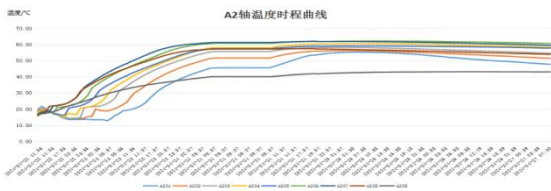


图 17 有冷却管措施底板温度时程曲线

(3) 智能温控系统研发：在科研项目中，我们将传统冷却水管升级为智能温控系统<sup>[6]</sup>。采用“利旧+新增”模式：保留并复用现有执行部件，同步新增核心智能控制系统模块。不再沿用以往“定时定量”的粗放调控方式，而是构建了基于实时监测数据的反馈控制逻辑——当芯部温度或温差接近预设警戒线时，系统可自动调节水流量及水箱温度，实现“削峰减差”的精准温控目标。目前，该成果已在项目中成功落地并投入使用。



图 18 混凝土冷却测温集成装置

(4) 季节性施工技术措施：施工时要密切留意天气预报，了解近期及本周因大风、大雨导致的气温反复情况，及时调整浇筑与养护策略。比如，现场曾出现高温时洒水养护，随后气温骤降的情况。由于前期保温层被洒水，保温效果降低，气温骤降时降温速率过快，此时需立即将保温层更换为干燥的保温

层进行覆盖。

### 3 综合效益评价

为验证本技术体系长效性，构建“即时温控-短期力学性能-中期耐久性-长期经济性”综合评价模型。在耐久性提升方面，芯部温度降至 62°C 时，能有效避开延迟钙矾石分解的温度阈值（约 70°C），从机理上保障混凝土长期耐久性。依据 TB/T 3275-2018 规定，芯部温度  $\leq 65^\circ\text{C}$  的大体积混凝土，其抗裂与耐久性能获规范认可。待后续具备耐久性专项检测条件，将对有/无管冷对比区块钻芯取样，开展 RCM 氯离子扩散系数和电通量试验，定量评估温控措施对耐久性的实际提升程度。从技术经济角度看，投入适度的施工期温控成本，可确保温控达标、实现裂缝防控，保障工期优化和长期耐久性。与温控不到位引发的裂缝修补、结构加固以及耐久性不达标等全生命周期经济损失风险相比，本技术体系综合效益显著。

### 4 结语

最后我们总结本文的核心：（1）构建铁标大体积混凝土温控指标体系应用逻辑。从铁路工程耐久性需求入手，系统对比铁标与建设行业标准在入模温度、芯部温度、里表温差、拆模条件等方面的差异，明确以“芯部温度  $\leq 65^\circ\text{C}$ 、里表温差  $\leq 20^\circ\text{C}$ ”为核心的控制指标体系，为涉铁工程大体积混凝土施工提供技术管理基准。（2）构建基于水化热调控的混凝土配合比优化方案。通过调整胶凝材料组成，减少水泥用量、增加矿渣粉和粉煤灰掺量，使用缓凝型聚羧酸减水剂来平缓水化放热速率，适量添加硅灰保证高强混凝土的密实性，达成“低热、高抗裂、高耐久”的协同优化，从材料根源降低温控难度。（3）提出全链路的原材料温度控制措施。对粗/细骨料、拌合用水、胶凝材料、外加剂等原材料，在储存、运输、上料等各个环节采取有针对性的降温手段，加强混凝土运输过程中的防晒和快速调度，有效控制高温季节混凝土的入模温度，使其满足铁标  $5^\circ\text{C} \sim 28^\circ\text{C}$  的严格标准。（4）研发基于反馈控制的管冷智能温控技术。针对 5m 厚底板等温控难题，设置冷却水循环系统，根据实时测温数据自动调节通水流量和水温，全面实现铁标温控指标。

### 参考文献：

[1] 雷红仙,黄萍.混凝土聚羧酸减水剂的种类及功能研究现状分析[S].公路交通科技(应用技术版),2019,15(08):55-58.  
 [2] 李申振,杨勇,周栋梁,等.接枝聚醚型超塑化剂的合成及其在水泥硅灰体系中的应用研究[S].新型建筑材料,2024,51(05):128-132.  
 [3] 马洪涛,钢结构劲性柱样板工艺试验技术分析[S].城市建筑空间-2024-12-25.  
 [4] 杨绍斌,苏怀平,张洪,大体积混凝土入模温度控制研究[S].中国港湾建设-2013-08-25.  
 [5] 潘盾,冷却水系统在大体积混凝土温度控制中的研究与应用[S].建筑施工-2025-06-25.  
 [6] 谢士德,超高层商业综合体施工中大体积混凝土质量监控措施[S].《建设监理》-2019-12-20.