

高抗渗清水混凝土反应槽施工技术优化与工程实践

孙万政

云南建投第四建设有限公司 云南 昆明 650501

摘要：磷酸反应槽作为湿法磷酸生产核心构筑物，长期处于高温、强腐蚀、高磨蚀工况，对混凝土抗渗性、密实度、表面平整度及结构耐久性要求极高。本文以云天化红磷分公司20万t/a磷酸工程反应槽为工程实例，针对大型矩形池体壁高体大、清水混凝土要求严、抗渗等级高、施工缝易渗漏、防腐基体质量控制难度大等技术难点，从钢筋定位、模板体系、止水构造、混凝土浇筑、精度控制等方面开展系统研究，形成一套适用于强腐蚀化工池体的成套施工技术。工程应用表明，优化后的工艺可有效保证混凝土密实性与抗渗性能，结构尺寸与外观质量满足防腐衬胶要求，可为同类工业特种混凝土构筑物施工提供技术借鉴。

关键词：磷酸反应槽；清水混凝土；高抗渗混凝土；施工缝

引言：湿法磷酸生产装置中的反应槽是集高温、强腐蚀、搅拌磨蚀于一体的特种核心构筑物，其结构质量直接决定装置运行安全性与使用寿命。随着大型化、集约化磷化工装置快速发展，反应槽呈现壁板增高、体量增大、精度要求提高、防腐条件更严苛的趋势，传统施工工艺易出现渗漏、蜂窝麻面、尺寸偏差超标、表面缺陷等问题，难以满足衬胶前基体质量要求。本文结合开远红磷20万t/a磷酸工程反应槽施工实践，围绕高抗渗、清水饰面、高精度成型、防渗漏、防腐适配五大控制目标，对模板体系、钢筋工程、施工缝止水、混凝土浇筑及过程质量控制进行优化，形成可复制、可推广的施工技术体系。

1 工程概况与技术难点

1.1 工程概况

红磷分公司20万t/a磷酸反应槽为现浇钢筋混凝土矩形池体结构，平面外包轴线尺寸18.06m×20.79m，壁板高度10.776m，设计抗渗等级P8，内壁按清水混凝土标准施工，成型后不做抹面，直接交付防腐衬胶。场地位于厂区密集建成区，建（构）筑物及地下管线复杂，施工约束条件多，对施工组织与工艺选择提出了较高要求。

1.2 设计控制指标

本工程对结构尺寸、外观质量及抗渗性能均提出了严格的控制标准：模板安装垂直度偏差不得超过6mm，截面内部尺寸偏差控制在±4mm范围内；混凝土表面平整度要求3mm/2m靠尺，每4m平面偏差不得超过9mm；成型后的混凝土结构严禁出现裂缝、蜂窝、孔洞、露筋、麻面、掉角等缺陷，且不得使用硬化剂及砂浆找平，必须保证基体原始密实面，以满足防腐衬胶的粘结要求。

1.3 关键技术难点

本工程施工面临多重技术挑战。其一，壁板高达10.776m，混凝土浇筑时产生的侧压力大，模板与支撑体系稳定性控制难度高。其二，混凝土需同时满足高抗渗、清水饰面、防腐基体三重要求，配合比设计与施工工艺需统筹兼顾。其三，斜底板、阴角圆弧、预埋件集中区域易出现振捣不密实问题，影响结构整体质量。其四，两道水平施工缝为渗漏薄弱部位，止水构造与施工质量要求严格，任何细节疏漏都可能导致渗漏隐患^[1]。

2 关键施工技术与优化措施

2.1 钢筋工程精准控制

为保证壁板双层钢筋间距与保护层厚度，防止浇筑过程中混凝土侧压力导致钢筋内倾移位，本工程在内外排钢筋之间设置S形支撑拉筋。该拉筋采用直径与主筋相当的钢筋弯制而成，两端分别与内外排主筋点焊固定，形成稳定的空间骨架结构，有效提升了钢筋笼的整体刚度与抗变形能力。保护层厚度控制是钢筋工程的关键环节，本工程采用1:2水泥砂浆预制垫块，垫块强度与混凝土强度基本匹配，避免了金属垫块可能引起的锈蚀风险。垫块按不超过1000mm间距梅花形布置，确保每一区域保护层均匀一致，从根本上杜绝露筋质量缺陷。对于预留孔洞与预埋插筋部位，严格按设计图纸进行空间定位，位置偏差控制在规范允许范围内，并在孔洞周边增设附加钢筋进行加强处理，有效分散了应力集中，避免局部开裂。全部钢筋绑扎完成后，须经监理单位逐项检查验收，合格后方可进入下道工序，确保钢筋工程全面满足结构受力与长期耐久性要求。

2.2 清水混凝土模板体系优化

模板体系是保证清水混凝土成型质量的关键技术环节，其刚度、精度、表面特性直接影响最终外观效果。

本工程内模采用18mm厚无涂层光面木模板，严禁使用覆膜或涂层面板，原因在于覆膜层虽可提高脱模便利性，但会在混凝土表面形成光滑膜层，影响后续防腐衬胶的粘结性能。针对预留洞口、斜板上口及阴角圆弧等异形部位，采用定型化模板施工，阴角50mm圆弧采用Φ48钢管成型，通过预埋固定件确保位置准确，有效解决了直角部位应力集中与转角不圆润的问题。底板上500mm高度第一道施工段采用吊模施工工艺，在300mm、800mm高度设置两道对拉螺栓进行定位，保证了此关键部位的截面尺寸精度。模板拼缝必须严密平整，支设方正垂直，跨度大于4.0m的梁按2‰进行起拱处理，垂直度控制采用吊线与尺量双重检测手段，确保模板系统具有足够的刚度、强度和稳定性，能够承受混凝土浇筑产生的各项荷载而不发生变形^[2]。

2.3 施工缝止水构造强化

施工缝是混凝土池体结构渗漏的高风险部位，其止水构造设计直接决定工程防水成败。结合结构高度与施工组织可行性，本工程设置两道水平施工缝，分别位于底板上500mm及7.72m高度处，既满足分层施工需要，又避开了结构受力最不利断面。为彻底消除施工缝处的渗漏隐患，采用3mm厚、400mm宽钢板止水带，半埋式居中安装，沿池体周长闭合交圈，确保形成连续完整的止水屏障。遇预埋件及穿墙管件部位，采用满焊密封处理，焊缝饱满连续，经煤油渗透检验合格后方可隐蔽。止水带采用T形钢筋支架进行固定，支架间距900mm，确保止水带在混凝土浇筑过程中始终保持居中位置，不发生偏位或滑移。施工缝处混凝土浇筑前，必须清除表面浮浆与松散颗粒，充分湿润界面后铺设同配合比水泥砂浆，再行浇筑上层混凝土，确保新旧混凝土紧密结合，形成整体受力的防水体系。

2.4 对拉螺栓体系与加固设计

对拉螺栓是承受混凝土侧压力、控制壁板厚度的关键组件，其设计参数与施工质量直接关系到结构尺寸精度与外观效果。本工程采用Φ12对拉螺栓，按横向间距700mm、纵向间距500mm进行梅花形布置，经计算可满足10.776m高度混凝土浇筑产生的最大侧压力要求。螺栓中部设置定位片，精确控制内外模板间距，从而保证壁板厚度一致。拆模后的处理方式因部位而异：内壁螺栓沿混凝土根部割除，不做修补，以保证清水混凝土的原始饰面效果，同时避免修补材料与防腐衬胶粘结不良的问题；外壁螺栓头先做防腐处理，再采用水泥砂浆修补平整，既保证了耐久性，又维护了外观质量。对拉螺栓的紧固力控制需要适度，既要保证模板在浇筑过程中不

出现跑模、胀模现象，又要避免因过度紧固导致模板局部变形或混凝土表面产生压痕缺陷，这需要操作人员具有丰富的施工经验。

2.5 高抗渗混凝土浇筑控制

混凝土浇筑是决定结构质量的核心工序，本工程从供料保障、浇筑工艺、振捣技术到养护管理进行了全流程优化。为确保混凝土连续浇筑、避免产生冷缝，采用双套供料保障体系：以现场搅拌站与混凝土输送泵为主供方案，同时配置备用搅拌机与吊车料斗作为应急方案，确保主供系统故障时能迅速切换，浇筑过程不停歇。斜底板部位采用双层模板分段支设、随浇随封工艺，边浇筑边封闭上层模板，确保底板坡度、厚度及平整度满足设计要求。壁板采用分层对称浇筑工艺，分层厚度控制在500mm左右，两侧壁板均衡上升，有效减小单侧压力差，防止模板产生偏移变形。预埋件底部开设振捣孔与排气孔，便于混凝土顺利填充密实，防止底部空鼓、蜂窝。底板与壁板转角处采用滞后振捣工艺，即先振捣底板混凝土、待其初步沉缩后再振捣壁板根部，有效提高转角区域的混凝土密实度，消除最易发生渗漏的薄弱环节^[3]。混凝土浇筑完成后，及时进行覆盖保湿养护，养护时间不少于14天，确保水泥充分水化，混凝土强度和抗渗性能达到设计标准。

3 质量控制与实施效果

3.1 质量控制体系

本工程建立了覆盖施工全过程的质量控制体系，从源头把控到过程监管再到成品验收，形成了完整的管理闭环。该体系涵盖模板刚度监测、钢筋位置复核、混凝土坍落度检测及浇筑连续性管控等多个关键环节，确保每一道工序的质量都在受控范围内。施工准备阶段，项目技术负责人组织编制详细的施工方案和质量计划，针对高抗渗清水混凝土的特殊要求，逐项明确质量控制标准和检验方法。施工前进行多层次的技术交底，由项目经理向全体管理人员交底，再由施工员向班组交底，最后由班组长向操作工人交底，确保每一名作业人员都清楚本工序的质量标准与操作要点。施工过程中严格执行三检制，即自检、互检、交接检。每道工序完成后，由操作工人进行自检，确认合格后报请班组长进行互检，再提请质检员进行专职检查，经检查合格并签署记录后方可进入下道工序，有效防止了质量缺陷的传递和累积。对于止水带安装、混凝土浇筑等关键工序，实行监理旁站制度，监理工程师全程监督施工过程，发现偏差立即纠正，确保关键环节万无一失。混凝土养护期间，安排专人定期检查混凝土表面状况，测量养护温度与湿

度,观察早期裂缝情况,发现问题及时采取覆盖、洒水等处理措施。通过这一严密的质量控制体系,本工程实现了从原材料进场到成品交付的全链条质量可追溯,为最终优良的工程质量奠定了坚实基础。

3.2 实施效果

工程完工后,委托具备资质的第三方检测机构对反应槽结构进行了全面系统的检测评估,检测内容涵盖混凝土强度、抗渗等级、结构尺寸、垂直度、平整度及外观质量等多个方面。检测结果表明:混凝土实体强度满足设计强度等级要求,标准养护试块及同条件养护试块强度均达到设计值的110%以上;抗渗等级达到P8标准,加压渗透试验中无一试件出现渗水现象。施工完成后进行的试水试验,池体蓄水至设计最高水位,持续观测48小时,池壁、池底及施工缝处均无渗漏现象,止水构造效果良好。结构尺寸方面,经全站仪和钢尺逐段测量,池体平面尺寸、壁板厚度、标高等各项指标全部达到设计控制标准,偏差均控制在规范允许范围内。垂直度检测最大偏差6mm,满足设计要求;平整度检测最大偏差3mm,优于规范要求。清水混凝土外观质量良好,整体色泽均匀一致,无明显的色差和接缝痕迹,表面密实平整,无明显蜂窝、麻面、孔洞等缺陷。移交防腐喷砂处理后,仅局部发现少量轻微缺陷,经专业修补后即完全满足衬胶施工要求,防腐单位对基体质量给予了高度评价。整体施工质量达到预期目标,充分验证了本工程所采用施工技术的可行性与可靠性。

4 工程反思与技术改进方向

4.1 局部质量缺陷分析

尽管本工程取得了较好的实施效果,但在施工过程中仍发现一些不足之处。局部区域出现轻微蜂窝麻面,分析原因为振捣操作不够规范、振捣点位布设不够合理,部分操作人员对高抗渗混凝土的振捣特性掌握不够熟练。阴角圆弧局部存在不平整现象,主要由于现场制作的圆弧模板拼缝不够严密,成型顺直度有待提高。此外,个别预埋件周边存在轻微气孔,说明该部位振捣排气不够充分^[4]。

4.2 针对性改进措施

针对上述问题,后续工程应采取以下改进措施:强

化班前技术交底,将振捣点位责任落实到人,制作可视化振捣点位图,提高班组操作标准化水平;阴角圆弧部位改用工厂定制圆弧定型模板,替代现场制作模板,提升拼缝严密性与成型顺直度;进一步优化泵送节奏与分层厚度控制,将分层厚度由500mm调整为400mm,减少混凝土离析风险,提高混凝土均匀性与密实度;在预埋件周边增设辅助振捣点,确保排气充分、填充密实。

4.3 质量持续提升方向

从本工程实践中认识到,高抗渗清水混凝土施工质量的持续提升需要从技术与管理的两个维度同步推进。技术层面应进一步研究低水化热、高抗裂混凝土配合比设计,减少早期收缩裂缝;管理层面应建立更加精细化的工序验收标准,推行可视化施工管理,将质量控制关口前移至每道工序的操作层面。通过持续的技术创新与管理优化,不断提高特种混凝土构筑物的施工质量水平。

结束语

大型磷酸反应槽属于典型的高抗渗、高精度、强腐蚀环境特种构筑物,施工控制核心在于防渗、密实、平整、无缺陷。通过优化模板体系、强化止水构造、采用双路保供浇筑工艺、实施全过程精度控制,可有效解决高壁板、大体积、清水混凝土、防腐基体等多重技术难题。工程实践证明,本工程形成的成套施工技术可靠性高、经济性好、适用性强,对化工、冶金、电力等领域大型耐腐蚀混凝土池体施工具有重要参考价值与推广意义。随着工业建筑对混凝土工程质量要求的不断提高,精细化的施工工艺与严格的质量控制体系将成为保障特种构筑物长期安全运行的关键。

参考文献

- [1]张亚宽.清水混凝土质量控制措施[J].浙江建筑,2024,41(4):55-58.
- [2]程曦.清水混凝土墙结构节点设计[J].建筑结构,2026,56(2):117-120.
- [3]徐杰.清水混凝土配合比稳定性分析[J].佛山陶瓷,2025,35(2):18-20.
- [4]陈亿强,廖志毅,魏能文,等.清水混凝土配合比稳定性研究[J].工程建设与设计,2024(20):169-171.