

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2010. 04. 013

南水北调江都三站进水流道改造施工关键技术

朱炳喜

(江苏省水利科学研究院,江苏 扬州 225002)

摘要 针对江都三站进水流道改造施工,研究 C25 粉煤灰自密实混凝土配合比设计、模板组合装配技术以及保证混凝土浇筑到位、防止产生裂缝、保证新老混凝土结合面黏结强度等技术措施,并将上述技术成果集成创新与组合,应用于江都三站进水流道改造。结果表明,混凝土强度、密实性、新老混凝土黏结以及流道混凝土表面平整度、流线等施工质量均满足要求,为类似工程改造施工提供有益的借鉴和参考。

关键词 进水流道改造 施工技术 江都三站

中图分类号 :TU528.53 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2010)04-0055-05

Key techniques in reconstruction of inlet conduits of Jiangdu No. 3 Pumping Station of South-to-North Water Diversion//
ZHU Bing-xi (*Jiangsu Hydraulic Engineering Institute, Yangzhou 225002, China*)

Abstract : In order to guide the reconstruction of inlet conduits of Jiangdu No. 3 Pumping Station, some technical measures were studied, including mix ratio of C25 self-compaction fly ash concrete, composite assembling of molding boards, exact placing of concrete for inlet conduits, crack resistance and enough bond strength on the interface between new and old concrete, etc. These techniques were innovated and combined and applied in the reconstruction of Jiangdu No. 3 Pumping Station. The results show that the concrete strength, compactness, the bond strength between new and old concrete, the construction quality of the smoothness of concrete surface and the streamline of concrete all satisfy the requirements. It will provide beneficial reference for similar projects.

Key words : reconstruction of inlet conduit ; construction technique ; Jiangdu No. 3 Pumping Station

江都三站是南水北调东线源头江都水利枢纽 4 座泵站之一,安装立式轴流泵 10 台套,装机总容量 16 000 kW,设计扬程 8 m,单机流量 13.5 m³/s。该站自 1969 年建成以来,单机运行时间约 95 000 h,共抽水 288.5 亿 m³。

江都三站采用堤后式泵房,为减少站身开挖深度,在国内泵站首次采用平面蜗壳钟形进水流道、虹吸式出水流道,流道主要尺寸 水泵叶轮中心高程至流道底部高度 $H=3\text{ m}$,流道进口至水泵叶轮中心长度 $L=9\text{ m}$,流道进口宽度 $B=5.4\text{ m}$,其相对于水泵叶轮中心直径 D_0 ($D_0=2.0\text{ m}$) 的相对值为 $H/D_0=1.5$, $B/D_0=2.7$, $L/D_0=4.5$ 。同时为方便施工,把弯管断面改为方形,并取消导水锥。该站建成后水泵有空蚀现象,机组有间歇性强烈振动和噪音,在低扬程大流量时更明显^[1]。模型试验中观察到有间歇性涡带进入水泵,引发机组振动。1970 年把流道后部用混凝土填补成圆弧形,但没有侧向收缩,形成半肘形流道;1978 年在流道后部吸水口下设置混凝土

中隔板用作消涡板,用块石混凝土充填两侧涡流区。改造后机组运行情况有所好转,但空蚀、声响及振动仍较大^[2]。

江都三站经过 30 余年高强度运行,主机泵老化严重,泵装置效率由原设计的 68% 降低为 50% 左右,南水北调东线工程实施后,江都三站年运行时间最高达 8 000 h,为此 2006—2008 年对江都三站实施改造,主要项目包括进水流道改造成肘形、机组更换等,进水流道采用自密实混凝土浇筑施工。

1 进水流道改造设计

进水流道经 2 次改造后成为宽度方向未作收缩的“半肘形”(图 1),侧后壁空间较大、平面方向收缩不合理,存在涡带,不能为水泵进口提供良好的流态,为彻底解决进水流道的问题,将其改造成完全肘形(图 2)。

江都三站进水流道改造保留原水泵座环、水泵流量和叶轮直径,转速从 250 r/min 降低为

214.3 r/min, nD 值从 500 降为 428.6, 中隔墩缩短 2 m, 喉管高度降为 1.8 m, 流道宽度从检修门槽后开始收缩, 改造后进水流道见图 3。

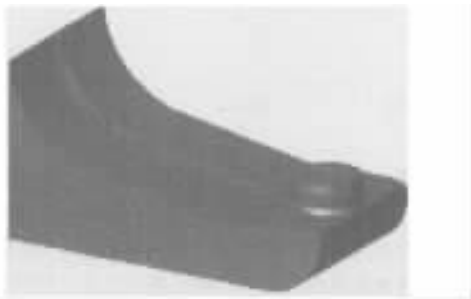


图 1 改造前进水流道透视图



图 2 改造后进水流道透视图

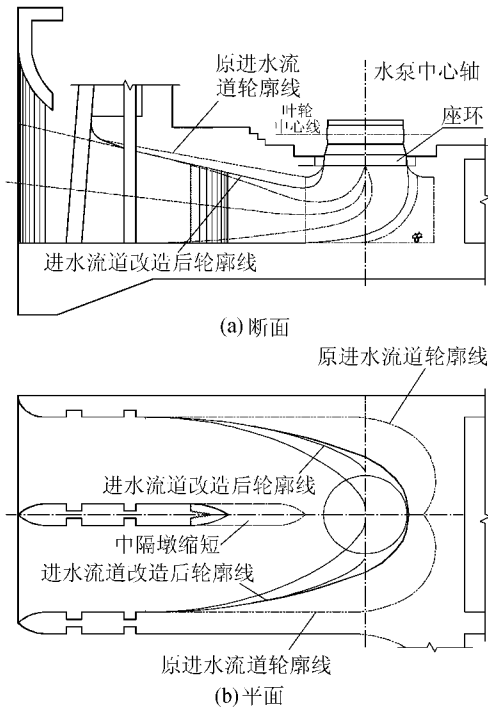


图 3 江都三站进水流道改造结构示意图
进水流道改造采用在原流道表面浇筑混凝土的方案, 拆除中隔板及部分块石混凝土, 原流道混凝土表面凿毛, 布置 $\varnothing 16 @ 200$ 钢筋网后浇筑 C25 混凝土。

2 进水流道改造施工技术

2.1 流道改造施工难点

江都三站进水流道改为肘形, 形体复杂, 空间狭小, 新浇混凝土为异型环形薄壁结构, 最薄处厚度小

于 0.1 m, 最厚处为 1.5 m, 钢筋密集, 肘形部位底部尺寸为 $2.2\text{ m} \times 3.5\text{ m} \sim 2.2\text{ m} \times 4.5\text{ m}$, 浇筑厚度为 0.1 ~ 0.3 m, 混凝土需从肘形流道的侧墙流入, 顶板部位浇筑面积从检修门槽到喉管处约 $4.8\text{ m} \times 3.5\text{ m}$, 厚度为 0.1 ~ 0.3 m。钢筋、模板安装后整个流道是封闭的, 流道结构特点决定除了顶板开洞口附近外, 流道底部、侧墙、顶板等部位浇筑时, 施工人员无法进入仓面浇筑振实混凝土, 传统施工方法与普通混凝土不能满足质量要求。

同时, 混凝土浇筑需研究以下技术措施 ①保证混凝土浇筑后不出现蜂窝、麻面, 一次到位, 内实外光 ②保证新老混凝土结合面黏结强度 ③保证混凝土上口与进水流道顶板之间不出现因新浇混凝土塑性收缩、沉降而产生缝隙 ④防止产生温度裂缝 ⑤保证混凝土线型、表面平整度。

通过对常规浇筑混凝土、焊接钢板作为模板、自密实混凝土、喷射混凝土等 4 个施工方案技术进行比较, 自密实混凝土方案能够满足混凝土密实性、表面平整度、流道线型等要求。

2.2 自密实微膨胀混凝土配制技术^[3]

2.2.1 原材料

42.5 级普通硅酸盐水泥, 标准稠度用水量为 28%, 安定性合格, 28 d 抗压强度为 49.6 MPa; I 级粉煤灰, $45\text{ }\mu\text{m}$ 筛余 10.3%, 需水量比为 93%, 烧失量为 4.6%, SO_3 质量分数为 2.5% 黄沙细度模数为 2.5, 含泥量为 1.2% $5 \sim 15\text{ mm}$ 连续级配碎石, 含泥量为 0.1%、针片状质量分数为 4.2% JM-SCC 自密实混凝土外加剂由江苏博特新材料有限公司生产。

2.2.2 混凝土配合比

水泥: 砂: 石: 粉煤灰: 水: JM-SCC 为 340: 791: 858: 120: 228: 45, 混凝土拌合物工作性指标要求达到 I 级^[4], 坍落度为 250 ~ 270 mm, 扩展度为 650 ~ 700 mm, L 形仪高度比 $H_2/H_1 \geq 0.8$, U 形仪高度差 $h \geq 30\text{ mm}$, 中边差小于 30 mm。

为提高外加剂的减水效果, JM-SCC 外加剂采用后掺法投料。

2.2.3 提高混凝土拌合物工作性措施

混凝土运至电机层后进行二次拌和, 混凝土从电机层通过滑槽进入水泵层后, 再通过串管入仓, 提高入仓混凝土均匀性, 防止产生离析。

在气温高于 10 ℃时浇筑混凝土, 采取将砂、石事先洒水湿润, 混凝土二次投料、外加剂后掺等措施, 降低混凝土坍落度损失, 提高混凝土拌合物工作性。

2.3 模板组合装配技术

模板只能通过水泵座环进入流道内安装。从检修门槽至原水泵座环下口顺水流方向将流道模板分成 6 节, 其中从检修门槽至原隔墩墩头为矩形断面,

分为3节,侧墙和顶板的模板采用竹胶板常规方法制作与安装;从原隔墩墩头至水泵座环下口肘形进水管模板在专用操作平台上按1:1放样,整体制作,但受原水泵座环直径的限制,肘形进水管模板不能整体进入流道,只能将其分成3节,每节分2~4块,其中座环下口一节分2块,其余2节分4块。模板主龙骨制作后拼装固定,模板板面采用厚1.25 cm和2.5 cm、宽2~5 cm的小木条,逐根钉在龙骨上,模板表面刨平后,涂刷由滑石粉、109胶和白水泥配制而成的聚合物水泥浆,目的是嵌填面板木条之间的缝隙,确保表面光滑,待聚合物水泥浆硬化后,用木砂纸打磨,然后表面刷清漆,再分块编号拆开。

2.4 保证混凝土浇筑到位措施

a. 设置进料口与观测口。在进水流道顶板设置1个进料口和2个观测口(兼辅助进料口),作为流道侧墙和底部混凝土进料口;在隔墩缩短部位的顶板上设置1个进料口,作为隔墩混凝土和顶板混凝土进料口;在胸墙检修门门楣上部设1个进料口、1个观测口,作为顶板和检修门门楣混凝土进料口。

b. 利用混凝土重力势能。从电机层到水泵层进料口设置滑槽,再通过串管入仓,将混凝土重力势能转变成动能,克服混凝土在仓内的流动阻力。

c. 保证混凝土最小浇筑厚度。顶板和肘形部位底部局部混凝土厚度不足0.1 m,为保证混凝土浇筑到位,将老混凝土凿深0.1 m,从而保证新浇混凝土能充满密实。

d. 在水泵座环底口模板侧面设置排浆、排气孔。首次浇筑的7号试验孔在水泵座环底口局部混凝土浇筑不到位,由于流道模板是密封的,混凝土中的气泡及浮浆不能排出,后续9个流道施工中在座环底口的模板侧面每隔0.2 m开边长为0.05 m的方形槽,作为排浆、排气孔,待混凝土浇至槽口处气泡和浮浆溢出后再封模,后续的9孔流道未再出现混凝土浇筑不到位现象。

e. 控制混凝土均衡上升,通过观测孔观测,如果进水流道顶板上的2个观测口与进料口混凝土高差大于0.2 m时,则改在观测口灌注混凝土,以保持混凝土浇筑面能均衡上升。

f. 控制混凝土浇筑速度,保证混凝土有足够的流动时间充满整个空间,各孔流道混凝土浇筑时间在10 h左右。

2.5 提高混凝土黏结强度措施

a. 加强老混凝土凿除面清理。老混凝土表面凿毛后露出新鲜表面,增加老混凝土表面糙度及接触面积,凿毛后清除表面碎屑、松动石子及杂物,并用高压水冲洗干净。

b. 植筋。设计使用 $\varnothing 16 @ 300$ 锚筋,其中50%的锚筋用药卷锚固剂锚固,锚固长度为0.45 m,锚筋

拉拔试验拉拔力为68.4~69.6 kN,拉拔强度均大于屈服强度;另50%的锚筋与泵墩内钢筋焊接。在锚筋达到屈服强度时可增加新老混凝土拉拔力0.57 MPa。

c. 混凝土增压技术。混凝土浇筑高度达到1.9 m后,在进料口和观测口设边长为0.4 m的方形增压管,高度为1.5 m。从增压管内的混凝土高度可以判断顶板混凝土是否浇筑到位,通过向增压管内加入混凝土,可将混凝土产生的泌水、浮浆从座环下口模板方形槽中压出,混凝土初凝之前往往会沉降,由于增压管内混凝土高出仓内混凝土1.5~2.0 m,新浇混凝土发生塑性收缩、沉降后可及时补充混凝土,从而避免新浇混凝土与原进水流道顶板之间出现缝隙。

d. 设置静停等待期。在仓内混凝土浇筑至喉管部位后,静停等待2~3 h,再继续浇筑混凝土,以便让仓内混凝土自然沉降,防止混凝土沉降收缩。

2.6 混凝土防裂技术

2.6.1 防止温度裂缝

a. 使用微膨胀型外加剂。JM-SCC外加剂中含有微膨胀功能组分,膨胀剂的水化作用使混凝土在早期产生大量钙矾石,混凝土产生微膨胀,能够有效补偿混凝土的收缩,提高混凝土体积稳定性。

参照GBJ 82—1985《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》,试件成型14 d湿养护阶段混凝土膨胀率为 $66.7 \times 10^{-6} \sim 129 \times 10^{-6}$,然后转入干养护,30 d干养护后膨胀率为 $60.6 \times 10^{-6} \sim 115 \times 10^{-6}$ 。

b. 降低水泥用量。混凝土中掺入粉煤灰替代部分水泥,降低混凝土水化热,同时粉煤灰火山灰活性、微集料效应又可提高混凝土后期强度,优质粉煤灰形态效应提高了混凝土拌合物的和易性。

c. 浇筑时期有利于混凝土防裂。进水流道施工主要在冬春季节施工,混凝土浇筑时机有利于防裂。

d. 自密实混凝土拉压强度比为0.076,比普通混凝土略大,混凝土的韧性略有改善,抗裂性有所提高。

e. 加强混凝土养护。早期持续湿养护对混凝土微膨胀功能的发挥至关重要,尽管流道新浇混凝土不受环境气候影响,所处环境湿度较大,对混凝土防裂有利,施工过程中仍保持持续浇水湿养护14 d。

2.6.2 防止沉降收缩裂缝

肘形部位侧墙、隔墩墩头混凝土因沉降和塑性收缩,其与顶板接触部位易产生沉降收缩裂缝。防止沉降收缩裂缝主要技术措施有设置静停等待期、顶板混凝土增压技术、控制混凝土均衡上升、放慢浇筑速度使混凝土有足够的沉降时间等。

3 流道改造施工

流道改造分期实施,未改造机组仍能保持正常

运行,不采用站前筑坝施工方案,在检修门槽内安装检修门挡水,抽空进水流道,进行流道改造。

流道改造施工顺序为:安装检修门→抽水→测量放样→老混凝土凿除及凿毛→清渣、冲洗→锚筋→钢筋安装→埋件安装→模板安装与固定→混凝土浇筑→养护→拆模→质量检查验收。

流道老混凝土、浆砌块石、进水流道隔墩等主要采用风镐拆除,对局部混凝土厚度小于 0.1 m 的进水流道顶板、底板,凿深至 0.1 m 以上,混凝土凿除面经清理后要求无松动石子、无碎屑,对老混凝土需要表面凿毛处理的,人工表面凿毛露出新鲜混凝土面。在安装模板之前对混凝土结合面按隐蔽工程验收要求进行检查验收。

50% 的锚筋采用风钻钻孔,深度为 45 cm,采用中国矿业大学生产的药卷锚固剂锚固,另 50% 锚筋在凿除原泵墩等部位钢筋保护层后与原钢筋焊接。

模板先期制作,模板安装以水泵座环中心为控制点,从座环下口开始安装模板,将模板制作的尺寸误差在检修门槽处进行处理,模板之间的缝隙用聚合物水泥浆处理。肘形进水管部位模板通过埋设在底板上的直径为 28 mm 的锚筋固定。

钢筋先逐根加工成相应形状,并逐一编号,再在现场安装。

混凝土现场自拌,采用强制式搅拌机,混凝土浇筑过程中重点检查原材料的计量、混凝土坍落度、扩展度等情况,拌制混凝土时严格按照试验室配料单配料,原材料均按质量法计量。为降低混凝土坍落度损失,将砂、石事先洒水湿润,外加剂后掺,投料顺序:细集料→水泥→掺合料→部分水→外加剂→粗集料→剩余的水。

混凝土用翻斗车运至电机层,由于坍落度和扩展度较大,翻斗车运至现场后混凝土略有离析,在电机层采用人工二次拌和。混凝土自电机层经滑槽至水泵层后,进入主进料口,并通过串管入仓。

混凝土浇筑顺序总体上由低往高,水平分层,逐层上升,肘形部位混凝土浇筑过程中控制均衡上升。各观测口、主进料口之间混凝土高差大于 0.2 m 时,改换灌注混凝土入口,以保持混凝土浇筑面的均衡上升。浇筑过程中适当放慢混凝土浇筑速度,保证混凝土有足够的流动时间充满整个空间,在仓内混凝土浇筑至喉管部位静停等待 2~3 h,各孔进水流道改造施工混凝土浇筑时间在 10 h 左右。混凝土浇筑结束 1 h 后再向所有增压管内灌注 1~1.5 m 混凝土。

4 混凝土质量

4.1 混凝土拌合物工作性

10 孔进水流道混凝土拌合物工作性检测结果:坍落度为 240~270 mm,扩散度为 620~720 mm,J 环

扩展度为 600~700 mm,U 形仪高度差为 0~22 mm,L 形仪高度比为 0.88~0.98(H_2/H_1)。

4.2 混凝土强度

共成型 13 组试块,平均抗压强度为 35.7 MPa;混凝土回弹强度推定值为 23.9~34.6 MPa(龄期 15~20 d),混凝土强度满足设计 C25 要求。

混凝土劈裂抗拉强度为 3.24 MPa,与直径 16 mm 的 II 级钢筋握裹强度为 4.2 MPa。

4.3 外观质量

除首次浇筑的 7 号试验孔原水泵座环下口 10 cm 高度范围内混凝土不到位需修补外,其余 9 孔流道混凝土浇筑到位,无蜂窝、露筋、裂缝等缺陷。流道经过 2~3 年运行检查混凝土无剥落。

4.4 混凝土匀质性

a. 各孔流道侧墙、肘形底部、顶板等不同部位混凝土回弹强度最大与最小值之差在 1.6~4.8 MPa 之间,回弹强度均方差为 4.1 MPa,说明混凝土实体强度均质性较好。

b. 对 8 号孔侧墙、肘形底部钻芯取样 3 块,芯样直径为 100 mm,钻孔深度为 100 mm,观察芯样侧面石子较均匀,表面砂浆层厚度为 4~14 mm,说明流道混凝土均质性较好。

4.5 新老混凝土结合性能

a. 流道顶板、肘形部位底部等厚度较薄部位采用敲击法检测^[5],即用小锤敲击混凝土表面,各处发出的声音响度基本一致,没有不均匀或空鼓声。

b. 混凝土回弹值可判断薄层混凝土新老结合面黏结质量,回弹值大于 30 即说明新老混凝土有良好的黏结,使用中不会发生脱落破坏^[6]。现场检测结果表明,混凝土回弹值均在 30 以上。

c. 根据《江都三站安全检测报告》,泵墩混凝土芯样平均强度为 33.4 MPa,流道改造混凝土 28 d 平均强度为 35.7 MPa,后期强度还会增长,流道混凝土强度高于泵墩,有利于提高新老混凝土结合面的强度。

d. 经检测,新老混凝土黏结劈裂抗拉强度为 1.14 MPa,黏结劈裂抗拉强度结合系数为 0.433;新老混凝土黏结抗折强度为 2.36 MPa,黏结抗折强度结合系数为 0.562。说明新老混凝土黏结强度达到老混凝土的 50% 左右,与普通混凝土新老黏结强度基本一致或略有增大,通过设置锚筋增加新老混凝土拉拔力 0.57 MPa。

4.6 结构尺寸与表面平整度

共检测 188 点,测点合格率为 90.1%,结构尺寸与表面平整度满足设计及规范要求。

4.7 混凝土抗冻、抗渗性

混凝土抗冻试验达到 F50,抗渗等级达到 W8。

4.8 机组运行情况

10 孔进水流道改造后,均投入运行,经过 3~

4 年运行,10 台机组运行平稳,没有原机组运行时振动等现象,噪音降低,水泵装置效率大幅度提高,机组试运行验收时测试水泵填料函部位,测试仪显示的垂直振动读数为 0.003 ~ 0.009 mm,水平振动读数为 0.003 ~ 0.007 mm,满足《泵站技术规范》的要求。

5 结 论

江都三站进水流道改造应用自密实微膨胀混凝土配制与浇筑施工技术、复杂流道模板组合装配技术、流道环形薄壁厚薄不均混凝土防裂技术、保证新老混凝土黏结技术,通过采取混凝土增压、浇筑过程中设置静停等待期、利用混凝土势能与动能的转变等技术和措施,确保混凝土浇筑到位,防止混凝土产生沉降收缩裂缝和温度裂缝。采用二次拌和、二次投料、外加剂后掺等施工工艺,提高自密实混凝土拌合物的均质性,防止坍塌度损失。通过多项技术的组合应用,多成果集成创新,保证流道混凝土密实度、表面平整度、流道流线。江都三站进水流道成功

(上接第 21 页)

的高浓度射流水体垂直进入浅水中的流态进行数值模拟,得到了不同水深和来流下的流态分布和浓度分布,证明了射流区、冲击区以及异重流区的存在,与试验结果吻合。

b. 浅水环境中,在环境流速较小时,射流撞击壁面形成的反射流会向射流孔口上游入侵,因此在已有流动分区的基础上,还存在 1 个上游入侵区,入侵长度随环境流速的增大而减小,水深对其的影响相对较小。

c. 环境流速的增大会增大射流触底点向下游的移动距离,触底点浓度也略有减小。相同来流条件下,触底点位置随水深的增加而下移,浓度随水深的增加而减小。

d. 流态分析显示,射流以较大动量撞击水体底面,形成的壁面反射流在下游方向形成动量较强的附壁射流,在较短距离内收缩和膨胀,紊动掺混剧烈,水深较浅时容易形成全水深掺混;比较而言,碰撞较弱时形成的附壁射流弱,无上游入侵,横断面会形成特别的水滴状浓度分布。

e. 水体底面上水平方向的最大浓度分布显示,同一水深下,环境流速对触底点上游段浓度线影响较大,对触底点下游浓度分布线影响较小。环境流速一定时,水深对触底点上游的入侵段影响很小,对下游最大浓度分布有一定程度影响,其大致影响趋势是水深越小,水体底面浓度越大。

改造为国内外大型泵站流道改造提供了新的施工技术和工艺,也为过密配筋、薄壁、复杂形体等振捣困难的部位应用自密实混凝土施工技术提供实例。

参考文献:

- [1] 沈日迈. 江都排灌站[M]. 3 版. 北京: 中国水利电力出版社, 1986: 101-106.
- [2] 汤正军, 雍成林. 江都三站综合技术改造初探[J]. 水利水电科技进展, 1999, 19(4): 59-61.
- [3] 朱炳喜, 邵林, 彭志芳, 等. 自密实混凝土在结构中的应用质量控制[J]. 施工技术, 2008(增刊): 47-49.
- [4] CCES02—2004 自密实混凝土设计与施工指南[S].
- [5] JTJ/T 271—99 港口工程混凝土黏结修补技术规程[S].
- [6] 朱炳喜, 徐荣俊. 江苏省水闸混凝土构件维修加固施工技术[C]//杨克, 陈改新. 混凝土工程耐久性研究和应用研讨会论文集. 成都: 西南交通大学出版社, 2006: 323-326.

(收稿日期: 2009-12-09 编辑: 方宇彤)

参考文献:

- [1] 张燕, 王道增, 樊靖郁. 流动环境中高浓度射流扩散实验研究[J]. 应用数学和力学, 2002, 23(12): 1276-1282.
- [2] 李樟苏, 程和森, 曹更新, 等. 利用放射性示踪沙定量观测长江口北槽航道抛泥区底沙运动[J]. 海洋工程, 1994, 11(2): 59-67.
- [3] YU T S, LI C W. Instantaneous discharge of buoyant fluid in cross-flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 12: 1161-1176.
- [4] NAKASUJI K, TAMAI M, MUROTA A. Dynamic behaviors of sand clouds in water [C]//International Conference on Physics: Modeling of Transport and Dispersion. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1990, 8: 1-6.
- [5] 王长海, 丁红, 邱桔斐. 抛泥扩散淤积分布计算[J]. 水道港口, 2007, 28(2): 86-90.
- [6] 陈祖华, 王光谦, 王志石. 河口抛泥数学模型及应用[J]. 水利水运工程学报, 2003(1): 44-48.
- [7] 徐宏明. 疏浚土扩散数学模型及其应用[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(2): 34-37.
- [8] 吴修广, 季大闰, 史英标, 等. 港池和航道疏浚过程中悬浮泥沙扩散输移的数值模拟[J]. 水运工程, 2006(8): 87-91.
- [9] 吴华林, 严以新, 周宜林. 抛泥运动研究述评及展望[J]. 泥沙研究, 2008(5): 76-80.
- [10] 槐文信, 方神光. 静止环境中阻力圆盘浮力射流特性的研究: 数学模型及计算方法的验证[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 549-554.
- [11] 樊靖郁, 张燕, 王道增. 动水中含污染物冲击射流横向高浓度聚集区的形成机理和特性分析[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 623-627.

(收稿日期: 2009-08-18 编辑: 骆超)