

北京市第九水厂二、三期工程介绍

钟亮洁 刘益萱

(北京市市政工程设计研究总院)

第九水厂是北京市最大的地表水厂，该水厂是一座水处理技术先进、设备完善、自动控制水平较高、出水水质好的现代化大型水厂。水厂设计总规模为 150 万 m^3/d ，分三期建设，每期规模均为 50 万 m^3/d 。一期工程于 1990 年建成投产；二期工程于 1995 年建成投产；三期工程于 1999 年投产 25 万 m^3/d ，2000 年已全部建成投产。

一、工程概况

第九水厂二、三期均以密云水库为水源，在水库潮河库区九松山副坝以东约 400m 处新建岩塞爆破取水口取水，规模为 100 万 m^3/d 。库水由直径 3.5m，长 3km 隧道输水至密云取水站。取水站位于高程 110m 的山坡梯地上。站内建有调流阀室，加氯间等生产设施，调流阀室内安装流量控制阀，根据流量要求及水库水位变化，自动调节流量并消能。库水调流后经预氯化处理，由直径 2.6m，长 33km 输水管（其中 32km 为球墨铸铁管，其余为钢管）及 2 根直径 2.2m，长 41.4km 的钢制输水管自流输送至净配水厂。净配水厂位于市区北郊，高程 47.8km。库水在厂内经净化处理及氯氨消毒后加压送至城区管网。

第九水厂全部建成投产后，供水量占全市供水量的 50% 左右，对首都供水起重要的保障作用。在设计中采用多项新技术、新设备，力求做到安全可靠、高质量、低能耗，以确保首都供水高水质、高安全度。

二、水质情况

1. 原水水质

密云水库是多年调节水库，总库容为 43.75 亿 m^3 ，汛限制水位为 151m，库底高程约为 107m，新建取水口高程为 117m。该库多年平均来水量为 10.40 亿 m^3 ，在流域范围内植被较好，污染源较少。据多年来取水口附近不同深度水质观测资料，水温变化在 0.2 ~ 26℃，平均 17℃ 左右，在取水口处约为 9 ~ 13℃；浊度经常在 4NTU 以下，最高浊度为 22NTU；色度为 5 ~ 15 度；嗅阈值为 4 ~ 20，个别出现过 40，平均值约 7 ~ 8；水中的微生物对水处理有影响的是藻类，藻类高潮期达到 729 万个/L，平均为 247.4 万个/L，在藻类中以硅藻、绿藻为主，各占 66%，33%，属寡污型藻类；水中未检出 5 项毒物及苯并芘。水库属清洁水库，属二级地面水水源。

一期工程从密云水库的调节水库——怀柔水库取水，故怀柔水库系二、三期工程的第二水源。当二、三期输水系统出现故障或维修时，利用密怀引水渠输水至怀柔水库，再由一期已建成的怀柔取水加压输水到净配水厂二、三期工程。怀柔水库库容 1.44 亿 m^3 ，该库污染指数稍高于密云水库，但均属清洁水库，除浊度较高外，水质基本与密云水库相同。

2. 净化后水质要求

为满足北京市作为首都的特殊要求和考虑到北京市长期使用地下水的历史状况，净化后水质除满足饮用水卫生标准外，还要求浊度一般不大于 0.5NTU，特殊情况不大于 2NTU；色度不大于 5 度，嗅阈值不大于 4。

三、工艺流程选择

根据上述原水水质情况，水处理的主要项目是浊度、色度、臭和味及藻类。考虑北京市的特殊地位对水质的高要求，并依据试验及一期运行经验，二、三期均采用常规处理加深度处理工艺，即混凝、沉淀、过滤、炭吸附处理工艺。为节省药剂，在设计中考虑了根据原水水质变化采用直接过滤或常规处理的灵活性。在原水浊度低于 5NTU，可跨越沉淀池直接过滤，在原水浊度高于 5NTU 时及藻类高潮期采用常规处理。工艺流程见图 1。

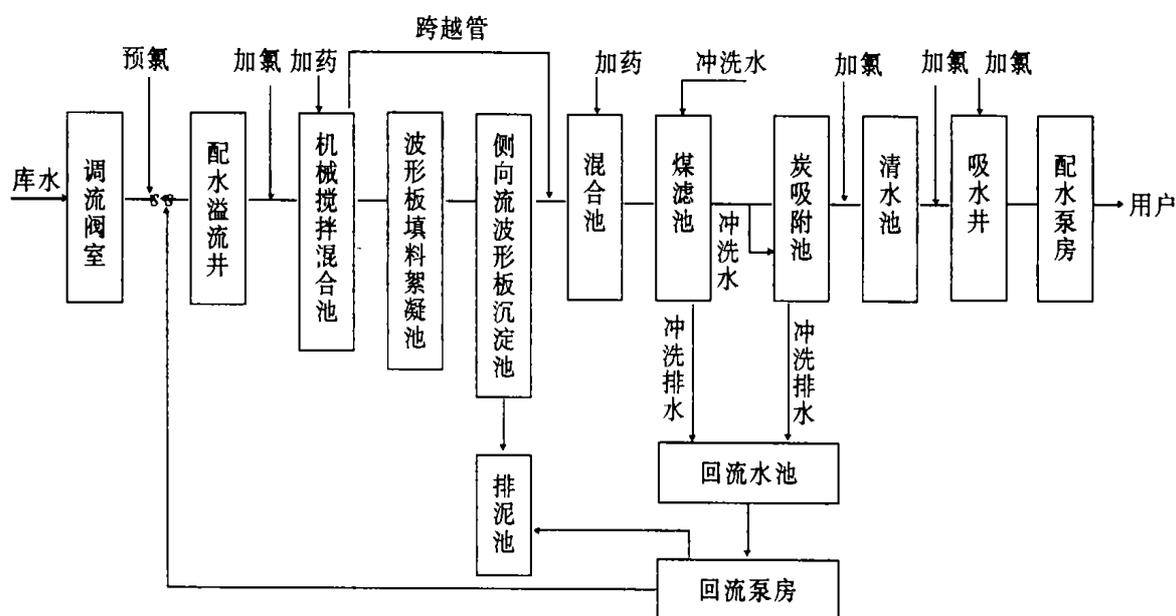


图 1 工艺流程示意

四、构筑物及设备选型中的新技术、新设备

二、三期工程规模均为 50 万 m^3/d ，各分为两个系列。净化构筑物有机械搅拌混合池、推流式波形板水力絮凝池、侧向流波形斜板沉淀池、均质煤滤料滤池及炭吸附池。其中波形板水力絮凝器、侧向流波形斜板沉淀箱、均质煤滤料过滤等技术系采用了我院近年来研究的新成果，这几项新技术是净化处理的核心。本工程还采用了多喷口流量控制阀、快速轴流式机械搅拌器、2550kW 电压型变频器等多项新设备。二、三期工程由于采用了新技术、新设备，使净化工艺高效、优质，在 0.5h 之内就完成混合、絮凝、沉淀过程，能够有效地去除原水中的污物，去除率在 90% 以上，再经煤滤池过滤和炭吸附，进一步除污、去色、去臭，使出水水质各项指标符合要求，达到国际先进水平。

1. 套筒式多喷口流量控制阀

多喷口流量控制阀既能调流、消能又能实现高流速并防止汽蚀损坏。该阀在设计上有其独特之处：在套筒表面交错排列布置具有特殊尺寸的带锥度的喷口，水流通过可调节套筒上

的喷口高速喷流，进入阀体中的水流不冲击对面管壁，水中产生的气泡只在水流中撞击，使汽蚀现象远离阀体金属表面，防止了汽对阀体的损坏。

该控制阀使用美国 Bailey 公司产品，允许汽蚀系数为 0.15，当汽蚀系数 $\sigma \geq 0.15$ 时，不产生汽蚀，其汽蚀特性优于其他类型控制阀。汽蚀系数计算公式如下：

$$\sigma = \frac{H_d + H_b + H_0}{\Delta H}$$

式中 H_d ——阀后压力；

H_b ——大气压力；

H_0 ——蒸气压力；

ΔH ——过阀落差。

二、三期工程从密云水库库内取水，由于水库水位变幅大，高低水位差约 30m，故在水库出口处设置了压力式的流量控制阀。库水通过控制阀可根据需要调节取水量，并可消除水库富裕水头，以保障输水管道安全。当水库水位在 157.5m 至 126.0m 范围变化时，控制阀汽蚀系数在 0.2~0.5，故选用了汽蚀系数低的套筒式多喷口流量控制阀 2 台，直径 1.6m。由于采用了调流、消能及泄压等新技术和新设备，事故发生时管道压力可降低 30~40m。经计算，将 32km 直径 2.6m 的球墨铸铁管壁厚由 25mm 减至 23mm，节约了工程投资。

2. 混合

混凝的效果主要取决于混合的效果。混合的作用在于使混凝剂尚未发生水解吸附和架桥作用之前就迅速均匀地扩散到水体中去，同水中最大数量的胶体颗粒相接触，以创造良好的水解和聚合条件。

二、三期工程使用碱式铝为混凝剂。为使混凝剂快速均匀地扩散到整个水体，设计采用了国际新型快速轴流式机械搅拌器。该搅拌器有 3 片特殊设计的叶片，叶片的尺寸是针对其性能、强度和重量进行了优化设计的，叶片前缘阻力小，以小角度安装，施加非常小的能量就可产生的大的轴向动力，产生较多的液体搅动。该高效搅拌器与常规所用的搅拌器相比，达到同样的搅拌效果可节省电能约 40%。

二、三期工程每系列两组混合池，每组设两个混合池，每池各装 1 台高效搅拌器，1 台工作，1 台备用，投药点可根据工作的池子变换。

二期搅拌器采用美国莱宁公司产品，叶轮的浆叶为 A310 型，采用双层叶片；三期采用美国凯米尼尔公司产品，叶轮的浆叶为 HE—3 型，单层叶片。三期在二期试验及运行经验的基础上对混合池的设计参数进行了调整，减少了池内水深，采用单层叶片，混合时间 10s 左右，缩短了停留时间，加大了控制水力条件的重要参数 G 值，G 值加大后稍加大了电机功率，混合效果更佳。二、三期混合池主要设备参数见表 1。

3. 絮凝

二、三期工程均采用推流式水力絮凝池，池内安装以波形板为填料的竖流波形板絮凝器。波形板波长为 50cm，全波高为 10cm，相邻板相位角差 180°。波形板在各级絮凝室中等间距装设几何尺寸完全相同、相互并联的水流通道，相邻的板间构成扩大、收缩相间串联的通道，因此各通道的水力阻抗特性完全相同，能量输入均匀。絮凝器沿水流方向分成流速不同的三级，分别为一、二、三絮凝室，各级流速比为 4:2:1，流速成倍递减，使输入的能量也分三级递减。水流由上向下或由下向上均匀地通过絮凝器，絮凝过程沿其流程不断完善，

流速由快变慢，絮凝强度沿程逐渐递减，输入能量逐渐变小，使絮体颗粒由小到大，由大变实。能量输入的均匀性不仅能量得到充分利用，更为絮体颗粒的迅速结大创造了适宜的水力条件，还使所结成的矾花比较一致，具有较好的沉淀性。

表 1 混合池设计参数

项 目		二期混合池	三期混合池
池子尺寸	长/m	2.4	2.2
	宽/m	2.4	2.2
	深/m	5.7	3.3
停留时间/s		21.61	10.51
搅拌器叶轮直径/m		双层 1.448	单层 1.245
叶轮转速/r/min		69.0	133.6
电机功率/kW		7.5	11.0
G 值/s ⁻¹		419	727

注：表中 G 值的计算水温为 10℃。

絮凝器材质，二期采用 PVC-U，三期用 ABS 工程塑料。PVC-U 的相对体积质量为 1.4，ABS 为 1.1，虽然后者比前者价格高，但由于相对体积质量之差异，使工程造价相近，且 ABS 从强度、韧性、抗冲击性上都有提高。

二期设计三级絮凝流程总长度为 34m，流速分别为 0.158m/s，0.077m/s，0.043m/s，总停留时间为 7.83min。由于二期絮凝池过水面积是按超负荷（1.4 倍计流量）进行设计的，故要求在小于或等于设计流量时采取盖住第一絮凝室的部分过流面积的办法来提主水流速度，增加 G 值来适应水量的变化，以保持高质量的絮凝效果。由于加盖方式管理不便，在运行中并未按设计要求去做，致使在正常负荷运行时流速低，达不到速度梯度，效果不理想。总结二期经验教训，三期絮凝池的过水面积是按正常负荷设计，超负荷时采取超量部分跨越沉淀池直接过滤的方法。三期三级絮凝流程总长度为 31.5m，流速分别为 0.19m/s，0.10m/s，0.05m/s，总停留时间为 6.19min。在絮凝器的构造上，三期也有改进，板箱长边平行水流方向，防止长边受水流冲击损坏，箱体构造规范化，适宜工厂加工零件现场组装。

该水力絮凝器絮凝效率高、絮凝时间短、絮凝池容积小，且性能稳定、运行效果好，现场安装方便。用于 100 万 m³/d 规模的大型水厂在国内为首次。

二、三期絮凝池设计参数见表 2。

4. 沉淀

二、三期工程均选用了效率高、适合于集团式布置的侧向流波形斜板沉淀池。该沉淀工艺是新型的水处理工艺，侧向流水流方向与矾花颗粒下沉所形成的泥流垂直，水流泥流互不干扰，加上波形板的波形结构形式，加强了沉淀过程中继续絮凝作用，有利于污泥的集中、下滑和排除，因而具有很高的沉淀效率，可节省沉淀池占地面积，具有可观的经济效益。波形板的波形尺寸为波长 50cm，全波高 10cm，波形斜板安装倾角二期 50°，三期 55°，板间距 6cm。

二期工程沉淀池宽 28m，装设斜板区池长 9m，板箱总高 4.4m，共 4 池，沉淀有效停留时间为 12.2min，容积负荷为 4.93m³/(m³·h)。

表 2 絮凝器设计参数

絮凝分级		流程长度 /m	平均流速 /m/s	水头损失 /mH ₂ O	停留时间 /min	G 值 /s ⁻¹
二期	一级	12.0	0.158	0.160	1.27	126
	二级	11.5	0.007	0.058	2.49	54
	三级	10.5	0.043	0.015	4.07	22
	合计	34.0		0.233	7.83	
三期	一级	10.5	0.190	0.220	0.90	175
	二级	10.5	0.100	0.083	1.78	76
	三级	10.5	0.050	0.010	3.51	19
	合计	31.5		0.313	6.19	

注：表中 G 值的计算水温为 10℃。1mmH₂O = 9.8Pa。

三期工程沉淀池池宽 28m，装设斜板区池长 11.7m，板箱总高 4m，共 4 池，沉淀有效停留时间为 14.3min，容积负荷为 4.17m³ / (m³·h)。

二期沉淀池内设置方形柱侧向流波形斜板沉淀箱，材质为 PVC-U，板箱两端由 5mm 厚立板支撑，在斜板上方设有冲洗孔，下方设有排泥孔。该板箱与现行平板或带翼斜板相比，具有构造简单、刚度大、布置灵活、安装方便、造价较低等优点。

三期采用了经改进的新型侧向流菱形框架波形板箱，材质为 ABS 工程塑料，板箱由管状杆件构成的立体菱形框架固定，上、下敞通，冲洗方便完全避免了积泥。该新型板箱系在原方形柱沉淀板箱基础上改进的，它克服了原箱单体的部分波形板长短不一，需焊接或粘结制作难度较大、板材用量较多等缺点，使结构简化、板长划一，便于制作、组装和维护，同时减少材料消耗降低了成本。该沉淀箱属创新技术，在国际上属先进水平。

5. 过滤

二、三期过滤采用厚滤河均质煤滤料滤池，该滤池截污能力大，过滤周期长，利用气水联合冲洗节省冲洗水量。无烟煤滤料粒径范围为 1.0 ~ 2.0mm，有效粒径 $d_{10} = 1.1\text{mm}$ ，均匀系数 $K_{80} = 1.30$ ，滤料厚度为 1.5m。每期各设 24 池，单池面积为 117.6m²，每池设双格，滤速为 7.6m/h。采用不膨胀的三段式气水联合冲洗方式，气冲阶段气冲强度为 18 ~ 20L / (m²·s)；气水同时冲洗阶段气冲强度不变，水冲强度为 4 ~ 5L / (m²·s)；水冲阶段冲强度为 4 ~ 8L / (m²·s)。配气、配水采用小阻力系数。二期采用美国生产的滤砖，材质为高密度聚乙烯，此种滤砖在美国、日本使用较多，在我国首次使用。每块滤砖尺寸：长 × 宽 × 高为 1000mm × 270mm × 322mm。由于滤砖高度小，可降低滤池高度，且安装方便，但价格昂贵。三期配气、配水系统改用长柄滤头，材质为 ABS 工程塑料。滤头价格便宜，但安装相对于滤砖难度较大，工序多且要求严格。两种配水、配气方式使用效果都很好。垫层由 7 层砾石组成，由下至上排列成大、小、大形式，垫层稳定，不被气冲搅乱，确保气水反冲洗的均匀性和有效性，滤料表面始终保持绝对平整。滤池设有公共冲洗泵及床水头损失值进行全自动化监控，各期滤池 24 池按次序轮流冲洗，提高管理水平确保出水安全度。

该工程投产后，经生产运行及测定，不论是经絮凝沉淀后过滤或直接过滤，滤池过滤效果良好，可获得优良的滤后水质，出水浊度低于 0.5NTU，运行周期在 26h 以上。

第九水厂二、三期滤池是国内首次采用国际先进的均质滤层过滤技术的无烟煤滤料滤池，实践证明滤池设计参数选择合理，设计是成功的，为滤池设计采用均质滤层技术、采用无烟煤滤料提供了宝贵经验。

6. 配水泵

第九水厂一、二、三期在配水泵房采用了变频调速技术，以改变水泵机组的转速，调节流量和扬程，方便调度和节能。

一、二期泵房内装 6 台 $Q=4.1\text{m}^3/\text{s}$, $H=52\text{m}$, $\eta=92\%$, $N=2500\text{kW}$ 配水泵机组, 4 用 2 备, 其中 3 台变频调速选用晶闸管 (SCR) 组成的电流变频器。三期泵房内装 5 台 $Q=3.8\text{m}^3/\text{s}$, $H=56.5\text{m}$, $\eta=92\%$, $N=2550\text{kW}$ 配水泵机组, 3 用 2 备, 其中 2 台变频调速, 选用绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 组成的电压型变频器。由于采用了变频调整技术, 减少了水泵开停、减少压力波动, 简化操作, 方便了对全市的供水调度管理, 并节电约 15%~20%, 降低了运行成本。

一、二期采用的电流型变频器是西门子公司提供的 Simovert A 型变频器, 其 6kV 电网谐波含量异常得多, 大大超出了我国电力部门对谐波含量的有关规定, 需对谐波进行治理, 增加了谐波治理工作量及费用。

三期采用的电压型变频器是由美国 Robicon 公司提供的完美无谐波变频器, 其优点是输入功率因数基本可保持在 0.95 以上, 节约了变配电系统中无功补偿的容量和相应装置的用地及建设费用; 其变频器的变压器柜可以和配电柜、功率单元柜并列安装, 不必单独设置变频变压器室, 可节约泵房面积 20%~25%; 由于该变频器所产生的谐波含量低, 满足我国电力部门对电压、电注谐波失真最严格的要求, 不会对所在电网产生谐波污染, 省去了昂贵的谐波测试分析和治理费用; 由于该变频器可以使用普通电机, 对配套电机没特殊要求, 电机造价低。

7. 厂平面

二、三期工程采用了波形板水力絮凝、侧向流波形斜板沉淀等多项高效工艺, 在此基础上采用密集型集团式布置, 集混合、絮凝、沉淀、过滤、炭吸附于一个大房间内, 缩短了各构筑物间的连通管道, 方便管理, 降低了工程造价并节约用地约 4hm^2 。

本工程水处理工艺先进, 自动化水平高, 出厂水水质好, 能耗低, 供水安全可靠, 二期工程投产后, 于 1997 年获北京市科技进步二等奖; 1998 年获建设部优秀设计二等奖; 2002 年获詹天佑大奖。

淄博今年将新建 4 座污水处理厂

据《中国环境报》报道: 山东省淄博市不断加大城市污水处理厂建设力度, 截至目前, 已建成中心城区张店及周村、沂源、桓台、临淄 4 区 (县) 共 5 座城市污水处理厂, 全市的污水处理能力从最初的每天 14 万吨升至 39 万吨。今年该市又将开工建设博山、淄川、高青污水处理厂和临淄污水处理厂二期工程, 届时该市的城市污水日处理能力将超过 50 万吨, 具备了年处理城市污水 1.9 亿吨的能力, 可基本满足当地城市污水的处理需求。