

沙坡头水利枢纽工程混凝土预冷系统优化设计

王 彬, 薛贵金

(中国水利水电第三工程局, 宁夏 中卫 751700)

摘要:对黄河沙坡头水利枢纽工程混凝土预冷系统进行优化设计.采用“骨料的两次风冷+加冷水拌和”方案替代原来的“加冰+加冷水拌和”方案.实测结果与设计参数分析表明,“骨料两次风冷+加冷水拌和”方案混凝土预冷系统的各项指标均达到了设计要求,预冷混凝土生产模拟强度亦达到了设计指标,且风冷骨料可使骨料冷透率大大提高,从而使混凝土在运输、浇筑过程中温度回升较慢.实际运行表明,本文优化方案的一次性投资小,运行调节能力强,便于运行管理.

关键词:混凝土预冷;出机口温度;沙坡头水利枢纽

中图分类号:TV431

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2003)04-0031-04

沙坡头水利枢纽工程位于宁夏回族自治区中卫县境内的黄河干流上,距银川市约200 km,距中卫县城约20 km,北靠腾格里沙漠,是以灌溉、发电为主的综合性水利枢纽工程.工程坝址地处西北内陆干旱地区,属大陆性气候,昼夜温差大,年平均降雨量较小;多年平均气温8.9℃,多年极端最高气温37.6℃,多年极端最低气温-29.2℃;最大风速34 m/s;夏季最高月平均气温22.5℃,夏季最高月平均水温20℃.

工程主体混凝土总量约39万 m^3 ,其中三级配混凝土约25万 m^3 ,四级配混凝土约13.8万 m^3 ;温控混凝土总量约19万 m^3 ,其中预冷混凝土总量约14万 m^3 ,预冷混凝土高峰月浇筑强度3万 $\text{m}^3/\text{月}$,预冷混凝土生产强度90 m^3/h ;夏季混凝土出机口温度要求为12~15℃,7月份(气温最高月)混凝土出机口温度要求为12℃.夏季预冷混凝土施工时段为每年5月中旬至9月下旬.混凝土生产系统配置3×1.5 m^3 拌和楼和45 m^3/h 拌和站各1座,拌和楼用于生产冬夏季预热和预冷混凝土,同时配置混凝土制热和制冷系统各1套.

2001年2月混凝土骨料两次风冷方案替代混凝土加冰方案(原招标设计方案)经业主、设计、监理审查通过并随即实施,2001年7月1日混凝土预冷系统建安完成,2002年7月上旬投入使用.

1 工艺流程

混凝土预冷系统主要由粗骨料一、二次风冷系统和冷水生产、供应、循环系统以及相配套的氨制冷

系统等组成.粗、细骨料的一、二次风冷和冷水分别在地面预冷调节料仓和拌和楼料仓中进行,冷却方式均为连续分层冷却.粗骨料风冷由预冷调节料仓(拌和楼料仓)内预设的配风、回风窗和料仓外侧的送、回风管道以及高效空气冷却器形成冷风闭式循环系统进行冷却,冷风自料仓下部送入,上部回风,与骨料自上而下的流动方向相反,保证粗骨料冷却效果.细骨料一、二次水冷是利用冬季生产预热混凝土时布置在调节料仓(拌和楼料仓)内预埋的蒸气排管作为预冷排管通冷水循环进行间接冷却的.混凝土预冷系统工艺流程图见图1.

2 系统设计

2.1 设计依据及条件

a. 沙坡头水利枢纽工程砂石混凝土生产系统(AC标)的合同文件、水利水电施工组织设计手册和暖通、空调、制冷相关设计手册及规范;预冷混凝土设计生产强度90 m^3/h ,混凝土出机口温度12~15℃(7月份预冷混凝土出机口温度12℃);7月份多年月平均气温和水温分别为22.5℃和20℃.

b. 混凝土原材料温度及物理、热学性能参数.7月份混凝土原材料温度:水泥、粉煤灰计算温度40℃;粗细骨料计算温度分别为22.5℃和21.5℃;拌和冷水温度小于或等于4℃;另外,该工程细骨料只有1种.混凝土原材料物理、热学性能参数见表1(表中粗骨料 G_1, G_2, G_3, G_4 的粒径分别为150~80 mm, 80~40 mm, 40~20 mm, 20~5 mm).

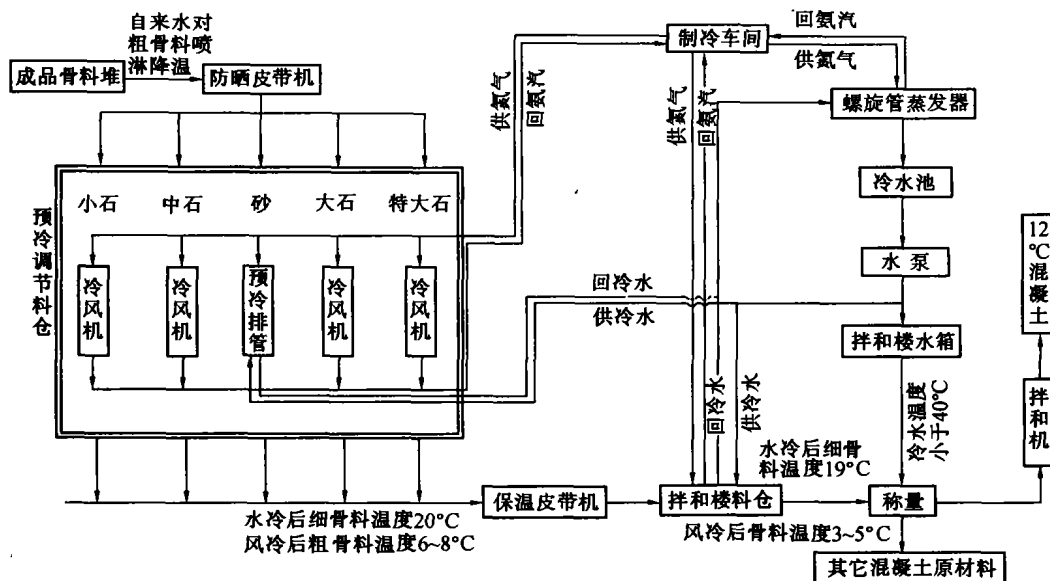


图1 混凝土预冷系统工艺流程

表1 混凝土原材料物理、热学性能参数

材 料	密度 ρ $/(kg \cdot m^{-3})$	比热容 c $/(J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1})$	含水率 $\omega/\%$	空隙率 $n/\%$	导热系数 λ $/(W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1})$
粗骨料 G_1	1600	959	<1.5	38	2.5
粗骨料 G_2	1600	959	<1.5	38	2.5
粗骨料 G_3	1650	959	<1.5	38	2.5
粗骨料 G_4	1650	959	<1.5	38	2.5
细骨料	1540	959	<6	38	2.5
水 泥	1300	796			
粉煤灰	1000	796			
水	1000	4187			

c. 其它相关参数. 夏季室外计算温度 30.5°C; 夏季室外相对湿度 53.5%; 夏季室外平均风速 1.6 m/s; 夏季室外平均大气压力 88.232 kPa.

d. 混凝土典型级配配合比. 见表2.

表2 混凝土典型级配配合比 kg/m^3

混凝土 标号	水 灰 比	水	水泥	粉煤 灰	砂	粗骨料			
						G_1	G_2	G_3	G_4
200	0.55	85	123	15.5	452	543	543	362	362
200	0.55	100	146	18.0	560	655	491	491	

2.2 设计计算

2.2.1 混凝土骨料冷却温度

预冷混凝土出机口温度控制以7月份为控制月,相应混凝土预冷系统工艺设计计算以7月份的气象条件以及混凝土各种原材料温度等原始资料为依据,7月份预冷混凝土出机口温度计算见表3.

根据夏季7月份三、四级配预冷混凝土出机口温度计算,细骨料二次水冷后终温选定为 $(19 \pm 0.5)^\circ C$;粗骨料二次风冷后终温选定为 $((3 \sim 5) \pm 1)^\circ C$;混凝土拌制所加冷水温度选定为小于或等于 $4^\circ C$;同时考虑粗骨料一次风冷与冷水生产共用1套氨制冷系统且运行工况基本一致,故粗骨料一次风冷后终温选定为 $((6 \sim 8) \pm 1)^\circ C$.另外细骨料一次水冷后终温选定为 $(19 \pm 0.5)^\circ C$.

表3 7月份预冷混凝土出机口温度计算

项 目	比热容 c $/(kJ \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1})$	质量 m/kg	cm $/(kJ \cdot ^\circ C)^{-1}$	平均温度 $T/^\circ C$	热量 Q $/(kJ \cdot m^{-3})$
砂	0.959	560	537.04	19	10203.80
大石 G_2	0.959	655	628.15	3	1884.45
中石 G_3	0.959	491	470.87	5	2354.35
小石 G_4	0.959	491	470.87	5	2354.35
水 泥	0.796	146	116.22	40	4648.80
粉煤灰	0.796	18	14.33	40	573.20
冷 水	4.187	100	418.70	4	1674.80
机械热					6281.00
小 计			2656.18		29974.70

2.2.2 预冷调节料仓容积和粗骨料平均冷却时间

预冷调节料仓是为满足夏季预冷混凝土生产粗骨料一次风冷和细骨料一次水冷同时考虑冬季预冷混凝土生产而设的,钢筋混凝土结构,共设5个单仓,其中4个粗骨料仓和1个细骨料仓.以骨料风(水)冷区的总储量满足预冷混凝土生产需要为依据.

经计算,连续生产三、四级配混凝土时,骨料单仓容积取 $160 m^3$,预冷调节料仓总容积为 $900 m^3$;粗骨料一次风冷的平均冷却时间分别为1.77 h和2.12 h;骨料二次风冷的平均冷却时间分别为0.7 h和0.84 h.

2.2.3 粗骨料风冷工艺参数

粗骨料风冷工艺参数以200号四级配混凝土配合比为准(下同).根据骨料一次、二次风冷的强度及温度要求,粗骨料风冷计算成果见表4.

2.2.4 细骨料冷水冷却

根据细骨料的水冷强度及一、二次水冷后温度要求,经计算细骨料1次水冷的需冷量 $Q = 117.04 \times 10^3 kJ/h$,生产冷水所需的冷负荷 $Q_{-水冷} = 234.472 \times 10^3 kJ/h$;细骨料二次水冷的需冷量 $Q = 87.78 \times 10^3 kJ/h$,生产冷水需要的冷负荷 $Q_{-水冷} = 175.52 \times 10^3 kJ/h$.

表4 风冷骨料计算成果

项目指标	进风温度 /℃	回风温度 /℃	进料温度 /℃	出料温度 /℃	骨料平均 降温幅度 /℃	骨料的 仓内风速 /(m·s ⁻¹)	冷风循环量 /(万 m ³ ·h ⁻¹)	冷负荷 /(10 ³ kJ·h ⁻¹)	冷风阻力 /Pa	氨蒸发/冷 凝温度/℃	空气冷却 器面积/m ²
一次风冷 G ₁	0±1	12±1	22.5	6±1	16.5	0.74	5.37	1455.0	1665.17	-5/35	1400
一次风冷 G ₂	0±1	12±1	22.5	6±1	16.5	0.71	4.79	1455.0	1665.17	-5/35	1400
一次风冷 G ₃	2±1	14±1	22.5	8±1	14.5	0.45	3.02	851.5	1922.10	-5/35	1050
一次风冷 G ₄	2±1	14±1	22.5	8±1	14.5	0.40	2.65	851.5	1922.10	-5/35	1050
二次风冷 G ₁	-5±1	7±1	8.0	3±1	5.0	0.72	1.73	440.6	1446.48	-5/35	350
二次风冷 G ₂	-5±1	7±1	8.0	3±1	5.0	0.68	1.63	440.6	1446.48	-5/35	350
二次风冷 G ₃	-5±1	9±1	9.5	5±1	4.5	0.41	0.99	264.3	1721.07	-5/35	350
二次风冷 G ₄	-5±1	9±1	9.5	5±1	4.5	0.39	0.94	264.3	1721.07	-5/35	350

2.2.5 混凝土拌和用冷水的冷负荷

混凝土拌和冷水温度小于或等于 4℃. 根据混凝土配合比及水的温度要求, 经计算拌和用冷水的冷负荷 $Q_{\text{拌和水}} = 512.49 \times 10^3 \text{ kJ/h}$.

2.2.6 制冷系统容量确定

a. 根据前面计算冷水生产的冷负荷结果, 按冷水生产系统氨蒸发/冷凝温度 -2℃/35℃, 将冷水生产的冷负荷折算为空调工况, 水冷的冷负荷 $Q_1 = 141.57 \text{ kW}$.

b. 根据风冷骨料计算成果表, 按一、二次风冷系统的氨蒸发/冷凝温度, 将一、二次风冷系统的冷负荷分别折算为标准工况: 一次风冷的冷负荷 $Q_2 = 821.05 \text{ kW}$; 二次风冷的冷负荷 $Q_3 = 416.61 \text{ kW}$.

c. 总冷负荷. $Q = 1.05 \times (Q_1 + Q_2 + Q_3) = 1448.192 \text{ kW}$.

3 设备配置

整个混凝土预冷系统共配置氨活塞式压缩主机 3 台, 单台主机制冷容量 511.68 kW(标准工况), 装机总容量 1535.04 kW(标准工况), 可满足系统需要. 此外, 经计算预冷调节料仓的 G₁, G₂, G₃, G₄ 仓分别选择对应配置 GKL1400, GKL1400, GKL1050, GKL1050 型高效空气冷却器各 1 台, 共 4 台; 拌和楼料仓的 G₁ 与 G₂, G₃ 与 G₄ 仓各共用 1 台 GKL700 型高效空气冷却器, 共配置 2 台; 一、二次冷风系统的总阻力分别按 1961.33~2451.66 Pa 和 1569.06~1961.33 Pa 选择离心式通风机或轴流风机与高效空气冷却器相配套; 冷水生产系统配置 1 台 LZL-200 型螺旋管蒸发器; 其它制冷系统的辅助设备与整个混凝土预冷系统相配套. 混凝土预冷系统的主要技术指标见表 5.

4 综合措施

a. 成品料堆粗骨料表面采用自来水喷雾降温; 成品料堆骨料堆高控制在 10 m 以上, 尽量骨料延长

堆存时间; 自成品料堆至预冷调节料仓的所有皮带机和预冷调节料仓顶部设防晒棚.

b. 粗骨料一次风冷后的终温控制在 $((6 \sim 8) \pm 1)^\circ\text{C}$; 粗骨料二次风冷后的终温控制在 $((3 \sim 5) \pm 1)^\circ\text{C}$.

c. 细骨料一、二次冷水间接冷却终温分别控制为 19.5℃和 19℃. 拌和楼料仓的两个细骨料仓交替使用, 在此延长细骨料二次冷水冷却时间, 保证细骨料入拌和机温度不高于 19℃.

d. 加小于或等于 4℃冷水拌制.

e. 保温. 除混凝土制冷系统的低温管道和设备外, 预冷调节料仓顶盖、拌和楼上楼皮带机、拌和楼外围(含进料层)及拌和楼料仓全部封闭保温.

f. 预冷调节料仓的粗骨料含水率控制在 1.5% 以内, 增加风冷效果.

5 实测效果与经济分析

5.1 实测结果

2002 年 8 月 2 日 10~15 时在三、四级配混凝土同时生产条件下对混凝土预冷系统进行了全面的测试, 同时进行了预冷混凝土生产强度模拟和实际强度的统计. 实测结果见表 6.

5.2 效果分析

a. 粗骨料经自来水喷淋和防晒皮带机运输进预冷调节料仓的温度为 20.82~21.8℃, 低于设计给定值, 喷淋降温幅度约为 1.13~2.11℃.

b. 粗骨料经喷淋后含水率较高, 预冷调节料仓粗骨料含水率在 1.56%~3.85% 之间, 尤其小石含水率最高达 6.5%, 粗骨料平均含水率为 3.5%, 高于风冷要求值 ($\leq 1.5\%$).

c. 粗骨料因气候条件(风沙尘等)的影响, 沙尘含量较高, 虽然骨料两次风冷都有减少骨料沙尘含量的作用, 但延长了骨料的冷却时间, 增加了空气冷却器的冲霜次数, 降低了骨料冷却效果.

表5 混凝土预冷系统主要技术指标

预冷混凝土 产量 /(m ³ ·h ⁻¹)	混凝土出 机口温度 /℃	制冷机装 机总容量 /kW	一次风冷 冷风循环量 /(万 m ³ ·h ⁻¹)	二次风冷 冷风循环量 /(万 m ³ ·h ⁻¹)	冷水 温度 /℃	冷水 产量 /(m ³ ·h ⁻¹)	冷却水 循环量 /(m ³ ·h ⁻¹)	最大耗 水量 /(m ³ ·h ⁻¹)	总功率 /kW	充氨量 /t	建筑 面积 /m ²	占地 面积 /m ²
90	12 ^①	1535.04 ^②	14.88	5.14	≤4	13.77	650 ^③	65	1150	18 ^④	420	980

注: ①7 月份; ②标准工况; ③氨制冷系统.

表6 实测结果

项目指标	进料温度 /℃	出料温度 /℃	降温幅度 /℃	冷却供水 温度/℃	冷水回水 温度/℃	氨蒸发温度 /℃	混凝土出机口 温度/℃	模拟混凝土生产 强度/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	实际混凝土生产 强度/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
一次风冷 G_1	21.80	4.09	17.71	1.52	8.36	-4~-8.5	9~11.58	95.5	73.8
一次风冷 G_2	21.54	4.32	17.22	1.52	8.36	-4~-8.5	9~11.58	95.5	73.8
一次风冷 G_3	21.10	5.94	15.16	1.52	8.36	-4~-8.5	9~11.58	95.5	73.8
一次风冷 G_4	20.82	6.02	14.80	1.52	8.36	-4~-8.5	9~11.58	95.5	73.8
二次风冷 G_1	6.73	1.58	5.15	1.52	9.54	-14.2~-16.4	9~11.58	95.5	73.8
二次风冷 G_2	6.42	0.84	5.58	1.52	9.54	-14.2~-16.4	9~11.58	95.5	73.8
二次风冷 G_3	7.24	3.00	4.24	1.52	9.54	-14.2~-16.4	9~11.58	95.5	73.8
二次风冷 G_4	6.92	1.59	5.33	1.52	9.54	-14.2~-16.4	9~11.58	95.5	73.8

注:表中数值为4次测试的算术平均值。测试环境条件:当日平均气温32℃,测试时室外气温33~36.8℃,成品料堆场气温35.2~38.9℃,堆场粗细骨料温度分别为22.93℃和22.1℃。

d. 粗骨料一次风冷后 G_1, G_2 的实测降温幅度为17.22~17.71℃,高于设计值,但 G_3, G_4 的降温幅度接近设计值,总体上一次风冷降温幅度较大,在整个混凝土预冷系统中起关键作用。

e. 粗骨料二次风冷的降温幅度因受拌和楼料仓中部水泥仓冷桥现象和其外围保温不足的影响而较小。

f. 细骨料通冷水间接冷却效果很好,一次水冷后终温为18.7~19.4℃,降温幅度2.7~3.4℃;二次水冷后终温为18~18.8℃,降温幅度1.7~2.8℃。

g. 预冷混凝土的模拟强度(即在骨料连续冷却和按混凝土配合比连续称量拌和条件下)为95.5 m^3/h ;实测生产强度为67.5~78.4 m^3/h ,平均强度为73.8 m^3/h ,实测强度保证率为82%。

h. 混凝土预冷系统在模拟强度条件下,一次风冷和冷水生产系统的2台主机负荷量分别为75%和100%,二次风冷系统的1台主机负荷量为75%。

i. 系统运行中因一次风冷和冷水生产系统与二次风冷系统的氨蒸发/冷凝温度不同即运行工况不同,应2套系统严格分开运行。

5.3 经济比较分析

“加冰+加冷水拌和”与(混凝土加冰)方案“骨料两次风冷+加冷水拌和”(混凝土骨料风冷)方案的不同主要设备配置、建安投资、温控增加费的经济比较见表7。从表7中可以看出,混凝土加冰方案的设备配置、建安投资费用分别高出混凝土骨料两次风冷方案51万元和136万元,混凝土温控增加费用也高出1.8元/ m^3 ,如按主体工程预冷混凝土总量计算,仅混凝土温控增加费用该工程可节约25.2万元。总之,该工程项目因优化采用了“骨料两次风冷+加冷水拌和”混凝土预冷方案并与冬季混凝土预热方案充分结合,累计节约总费用约212.2万元。

6 结 论

黄河沙坡头水利枢纽工程混凝土预冷系统用“骨料两次风冷+加冷水拌和”方案替代“加冰+加

表7 混凝土加冰和混凝土骨料风冷方案经济比较

项 目	规格(型号)	数量	费用/万元	
			加冰方案	骨料风冷方案
片冰机	PBL2×110	3台	63	
冰 库	40t	1座	45	
输冰皮带机 $B=500\text{mm}, L=15\text{m}$		1条	4.3	
小冰仓	2 m^3	1套	2.8	
冰称量系统		1套	2.8	
摄像头		2个	5	
空气冷却器	GKL1400	2台套		30
空气冷却器	GKL1050	2台套		25
空气冷却器	GKL700	2台套		15
冲霜水泵	IS200-80	2台套		1.9
主要设备小计			122.9	71.9
建安投资			289	153
温控增加费			8.9元/ m^3	7.1元/ m^3

注:表中主要设备费用为市场价格。

冷水拌和”方案,根据实测结果与设计参数的详细比较分析,“骨料两次风冷+加冷水拌和”的混凝土预冷系统的实测结果均达到和超过了设计参数要求,混凝土出机口温度为9~11.58℃,预冷混凝土生产模拟强度亦达到了设计指标。此外,风冷骨料可使骨料冷透率大大提高,从而使混凝土在运输、浇筑过程中温度稳定且回升较慢;系统的一次风冷与二次风冷和冷水生产系统可视具体情况进行相互配合调节,提高了混凝土预冷系统的调节能力;系统的一次性建安投资和设备配置及运行费用低,保温面积小,运行环节少,管理方便。由此可见,“骨料两次风冷+加冷水拌和”的混凝土预冷系统在沙坡头工程的运行效果是良好的,该系统的设计和应用是成功的。

参考文献:

- [1] 路延魁. 空气调节设计手册[M]. 第2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [2] 郭庆堂, 吴进发. 实用制冷工程设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [3] 苗若愚, 何一民, 艾学良. 暖通空调常用数据手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [4] 康世荣, 陈东山. 水利水电施工设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.

(收稿日期: 2002-09-03 编辑: 傅伟群)