

严寒地区碾压混凝土坝温度控制设计

田玉辉, 彭涛

(中国水利水电第九工程局有限公司, 贵阳市 550081)

5 **摘要:** 严寒地区碾压混凝土坝温度控制要求严格, 施工过程中温控重点主要为入仓浇筑温度、混凝土内部温度和二期通水冷却温度的控制。大坝混凝土浇筑前通过对坝体温控标准、浇筑过程温控和二期通水冷却进行研究分析, 获取碾压混凝土温度变化规律, 为大坝浇筑实施和浇筑质量提供技术保障。

10 **关键词:** 严寒地区; 碾压混凝土坝; 温度控制; 施工设计

中图分类号: TV512; TV642.2

Temperature control design of RCC dams in severe cold areas

15 TIAN Yuhui, PENG Tao

(China Water Conservancy and Hydropower Ninth Engineering Bureau Co., Ltd., Guiyang 550081)

20 **Abstract:** RCC dams in severe cold areas have strict temperature control requirements. The key points of temperature control during the construction process are the control of the pouring temperature, the internal temperature of the concrete and the second-stage water cooling temperature. Before the concrete pouring of the dam, the temperature control standards of the dam, the temperature control of the pouring process and the second-stage water cooling were studied and analyzed to obtain the temperature change rules of the roller compacted concrete and provide technical guarantee for the implementation and pouring quality of the dam.

25 **Keywords:** Severe cold areas; roller compacted concrete dams; temperature control; construction design

0 引言

30 西藏某水电站为二等大(2)型工程, 拦河坝为碾压混凝土重力坝, 坝顶高程 3451.00m, 最大坝高 118.0m, 坝顶长 389.0m, 包括左岸挡水坝段、溢流坝段、冲砂底孔坝段、厂引坝段和右岸挡水坝段。大坝碾压混凝土总工程量 95.63 万 m³, 施工高峰月浇筑强度达 8.2 万 m³, 碾压混凝土在 3373.00m 高程以下采用通仓斜层平推法浇筑, 最大浇筑面积 3876m², 其余部位采用平层铺筑法浇筑。本工程位于青藏高原气候区, 基本特性为气温低、空气稀薄、大气干燥、太阳辐射异常强烈, 极端最高、最低气温分别为 32.5℃和-16.6℃, 多年平均气温 9.3℃, 历年最大冻土深度 19cm。大坝碾压混凝土浇筑强度较高, 温控要求严格, 其温控重点主要体现在最高温度控制、表面保护和二期冷却, 必须采用严格的温控措施, 包括预冷或预热混凝土、混凝土运输过程的温控、混凝土浇筑过程的温控、混凝土表面养护、混凝土通水冷却以及冷却工期控制等措施。

作者简介: 田玉辉(1989-), 男, 工程师, 主要从事水利水电施工管理工作. E-mail: 896192937@qq.com

40 **1 大坝温控重难点与对策**

(1) 大坝基础约束区混凝土浇筑强度高, 最高温度较难控制, 主要解决方法为控制碾压混凝土浇筑层厚和间歇时间, 对于基础约束区碾压混凝土采用 1.5m 升层, 间歇期 5~14 天, 冷却水管按照 1.0m×1.5m 加密布置, 加大通水流量, 加强削减碾压混凝土高温峰值。

45 (2) 高温季节浇筑温度控制较为困难, 由于基础仓面大, 混凝土暴露时间长, 浇筑时仓面温升控制难度大, 主要解决方法是在浇筑时进行仓面喷雾, 下料间歇期间覆盖隔热被, 混凝土收仓后至流水养护前仓面覆盖隔热被^[1]。

(3) 低温季节进行大坝混凝土浇筑, 浇筑温度较难控制, 主要解决办法为提高混凝土出机口温度, 优化混凝土运输及入仓方案, 缩短混凝土运输及入仓时间, 混凝土运输车辆覆盖保温, 以及在仓面及已浇砼外露面及时覆盖隔热材料保温等措施。

50 (4) 大坝碾压混凝土浇筑昼夜温差大, 新浇混凝土表面容易受外界气温变化影响而出现裂缝, 主要解决方法是及时保温, 拆模后及时覆盖保温材料保温。

(5) 大坝在高温季节(4月上旬~10月上旬)浇筑的混凝土入冬前进行必要的大面积中期降温, 以及厂引坝段厂坝接缝灌浆前进行二期冷却, 二期冷却时间紧且任务重, 主要解决措施为在保证初期通水冷却到设计温度, 初冷结束后保证控温质量; 二期冷却配备足够的冷水机组, 保证制冷水的供应量和制冷水的温度。

55

2 混凝土温度控制标准**2.1 坝体温度控制标准**

(1) 基础碾压混凝土容许温差

坝体基础碾压混凝土容许温差见表 1。

60 表 1 坝体基础碾压混凝土容许温差表

距离基础面高度 h (m)	浇筑块长边长≤30m	浇筑块长边长 30~70m	浇筑块长边长>70m
0~0.2L (强约束区)	17℃	13℃	12℃
0.2~0.4L (弱约束区)	18℃	15℃	13.5℃

(2) 新老混凝土温控标准

在间歇期超过 28 天的老混凝土面上继续浇筑时, 老混凝土面以上 1/4L 范围内的新浇筑混凝土按新老混凝土温差控制, 温差控制标准为不大于 13℃^[2]。

(3) 表面混凝土温控标准

65 混凝土内外温差控制不超过 16℃。

(4) 容许内部混凝土最高温度值

主要部位容许内部混凝土最高温度见表 2。

表 2 碾压混凝土内部允许最高温度值表

大坝温控分区	最高温度值	坝体浇筑高程
强约束区 (0~0.2L)	22℃	3340.00m~3367.50m

弱约束区 (0.2L~0.4L)	25℃	3367.50m~3401.50m
自由区 (0.4L 以上)	28℃	3401.50m~3451.00m

(5) 混凝土浇筑温度

70 大坝碾压混凝土浇筑温度设定为月均气温+3℃, 但冬季不低于 6℃, 夏季强约束区不高于 12℃、弱约束区不高于 14℃、自由区不高于 16℃, 容许浇筑温度见表 3。

表 3 碾压混凝土容许浇筑温度值表

温控分区	11 月~翌年 3 月	10 月~11 月	4 月~10 月
0~0.2L	≥6℃	月均气温+3℃	≤12℃
0.2L~0.4L	≥6℃	月均气温+3℃	≤14℃
0.4L 以上	≥6℃	月均气温+3℃	≤16℃

(6) 相邻坝块高差控制

75 大坝各碾压混凝土坝块应均匀上升, 相邻坝块高差不大于 12m, 相邻坝块浇筑时间间隔宜小于 20 天。

2.2 坝体通水冷却标准

(1) 一期通水冷却

80 大坝碾压混凝土下料浇筑即可开始一期通水冷却, 冷却时间 20 天, 水温 10~12℃; 前 10 天流量 1.5~2.5m³/h, 11~20 天流量 0.8~1.2m³/h 左右, 每 24h 改变一次通水方向, 最高温度峰值过后最大日降温速率≤0.5℃/d, 通水温度与混凝土温度相差不大于 20℃。一期通水冷却主要是消减混凝土温度峰值, 通水冷却结束时碾压混凝土温度为 20℃左右^[3], 降温幅度不大于 8℃, 控温时间 30~60 天。

(2) 中期通水冷却

85 为防止一期通水冷却结束后混凝土温度的回升, 减小后期的温降, 实现混凝土小温差、慢冷却、早保护的温控理念, 一期冷却完后进行必要的控温, 高温季节 (4 月上旬~10 月上旬) 浇筑的混凝土入冬前进行必要的大面积中期降温; 中期进口水温 12~15℃, 通水流量 0.6~1.0m³/h, 最大日降温速率≤0.3℃/d, 保持混凝土温度缓慢降到 15~16℃^[4]; 通水水温与混凝土内部温度之差不超过 15℃, 中期通水前通过闷温测出坝体温度, 复核并保证通水水温满足水温与混凝土的温差要求。

90 3 混凝土温控计算与分析

3.1 温控设计思路

95 根据工程所在地区的气象特征, 以坝体混凝土允许浇筑温度及允许最高温度为控制标准, 推算混凝土出口口温度和需采取的对应温控措施。基础约束区混凝土按照浇筑温度控制要求, 4、10 月可以不用预冷或预热混凝土, 11 月~次年 3 月需采用预热混凝土, 5 月~9 月需采用预冷混凝土; 全年浇筑的基础约束区混凝土均需进行初期通水冷却。自由区 3m 层厚浇筑层, 虽然除高温季节外浇筑的混凝土最高温度能满足规范要求, 但仍需采取初期冷却措施, 以确保满足内外温差要求和减少二期冷却的压力。

3.2 混凝土浇入仓筑温度

结合工程现场的实际情况，计算温控措施条件下的浇筑温度，拌和系统 5 月~9 月出机口混凝土温度为 9℃，11 月~次年 3 月出机口混凝土温度为 10℃，4 月和 10 月采用自然混凝土出机口温度；4 月~10 月采用仓面喷雾，喷雾效果以降低仓面小气候平均温度 4℃计取。大坝碾压混凝土采用满管溜筒、自卸汽车等常规方式入仓，混凝土入仓温度和浇筑温度的计算按以下公式计算^[5]： $T_{B,P}=T_0+(T_a-T_0)(\theta_1+\theta_2+\dots+\theta_n)$ ；式中 $T_{B,P}$ —混凝土入仓温度，℃； T_0 —混凝土出机口温度，℃； T_a —混凝土运输过程气温，℃； θ_i ($i=1, 2, \dots$)—有关的系数，混凝土装卸和转运，每次 $\theta_1=0.032 \times n$ ，从拌和楼下料到胶带机，再经箱式满管溜筒至自卸车，从自卸车下料至仓面，转运 3 次； $\theta_1=0.096$ 。混凝土运输时经长度为 1300m 的全封闭胶带机， $\theta_2=0.125$ ，自卸汽车转运 $\theta_3=A_t=0.0014 \times 30\text{min}=0.042$ 。故 $\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 0.263$ ，则 $T_{B,P}=T_0+0.263(T_a-T_0)$ 。

根据不同部位，不同出机口温度要求，分月计算入仓温度。混凝土浇筑温度计算式为： $T_p=T_{B,P}+\theta_p \times \tau(T_a-T_{B,P})$ ；式中 θ_p —混凝土浇筑中的温度倒灌系数，取 0.0025； T_p —混凝土浇筑温度，℃； τ —浇筑平仓振捣到上层覆盖前的全部时间，取 240min。根据公式计算碾压混凝土入仓温度及浇筑温度见表 4。

表 4 碾压混凝土入仓温度和浇筑温度表

施工月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
平均气温(℃)	0.3	2.9	6.5	9.7	13.3	16.4	16.6	16.1	14.4	10.4	4.7	0.7
拌和温度(℃)	10	10	10	13.5	9	9	9	9	9	14.4	10	10
入仓温度(℃)	7.4	8.1	9.1	12.5	10.1	10.9	11	10.9	10.4	13.3	8.6	7.6
浇筑温度(℃)	5.3	6.6	8.3	10.5	9.9	11.4	11.5	11.2	10.4	11.3	7.4	5.5

根据计算结果，除 12 月、1 月浇筑混凝土时，其浇筑温度不能满足基础强约束区的要求外（要求 $\geq 6^\circ\text{C}$ ），其它月份采取预冷或预热混凝土，以及高温季节仓面喷雾等措施后均能满足要求。如 12 月及 1 月仍需进行混凝土施工，则必须采取提高混凝土出机口温度，在混凝土运输过程中加强保温，以及在仓面及时覆盖隔热被等措施。

混凝土浇筑温度随浇筑时间缩短而减小，因此需要提高施工速度，缩短平仓振捣及上层覆盖的时间，配备足够的机械设备及劳动力，把浇筑温度控制在允许范围内。

3.3 混凝土内部最高温度

混凝土内部最高温度计算基础为外界温度取月平均气温、混凝土表面温度取月平均气温 +3℃，养护水取月平均水温，冷却通水的水温取 6~8℃，冷却水管内径为 28mm，单根长度为 300m。根据水利水电工程施工手册^[6]混凝土工程分册中初期通水冷却时的实用计算法进行计算，碾压混凝土内部最高温度见表 5。

$$T_m = \frac{(T_p - T_s)E_2X}{1 - E_1X} + \frac{(T_w - T_s)E_2(1 - X)}{1 + E_1X} + \frac{T_r}{1 - E_1X} + T_s$$

式中 T_m —初期通水冷却时浇筑块平均温度，℃； T_p —混凝土浇筑温度，℃； T_r —混凝土水化热温升，采用时差法计算，℃； T_s —混凝土表面温度，℃； T_w —冷却水管进水口处水温，℃； E_1 —新浇混凝土接受老混凝土固定热源作用并向顶面散热的残留比； E_2 —新浇混凝土

土固定热源向空气和老混凝土传热的残留比；X—冷却水管散热残留比。

130

表 5 碾压混凝土内部最高温度表 (单位: °C)

施工月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
C15 碾压 1.5m 厚	10.3	12	14.4	16.9	18.6	21.1	21.2	20.8	19.5	17.5	13.2	10.6
C15 碾压 3.0m 厚	13.8	15.2	17.2	19.3	20.3	22.3	22.4	22.1	21	19.9	16.2	14

从计算结果可知,当浇筑层厚为 1.5m 时,强约束区混凝土最高温度未超过设计允许的 25°C 要求,其余混凝土均满足设计要求;当浇筑层厚为 3.0m 时,混凝土内部最高温度均能满足设计最高温度 25~28°C 的要求。

3.4 坝体二期冷却通水温度

135

坝体二期冷却通水时期,碾压混凝土内部水化热基本释放完毕,因此二期冷却可以视为无热源冷却。碾压混凝土二期冷却通水温度见表 6。

$$T_m = T_w + X(T_0 - T_w)$$

式中 T_0 为混凝土初温,其余各变量含义同前。

表 6 碾压混凝土二期冷却通水温度表

通水时间	5d	10d	15d	20d	25d	30d	35d	40d	45d	50d	55d	60d
水温 12°C	19.2	18.48	17.83	17.25	16.72	16.25	15.83	15.44	15.1	14.79	14.51	14.26
水温 14°C	19.4	18.86	18.37	17.94	17.54	17.19	16.87	16.58	16.32	16.09	15.88	15.69

140

通水前坝体内部温度按 20°C 计算,当使用 0.7m³/h 冷却通水流量时,使用 12°C 的制冷水或河水,降温到 15°C 需要 47 天;使用 14°C 的制冷水或河水通水冷却,降温到 16°C 需要 52 天。大坝坝体碾压混凝土温度变化曲线见图 1。

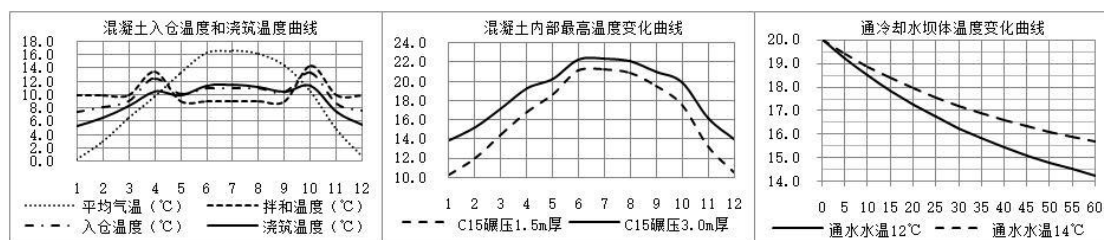


图 1 坝体碾压混凝土温度变化曲线图

145

4 坝体通水冷却规划设计

4.1 大坝混凝土温控分区

150

根据施工进度安排及温控标准要求,经温控计算分析,基础约束区混凝土浇筑除 4 月、10 月份可以自然入仓外,11 月~次年 3 月需采用预热混凝土,5 月~9 月需采用预冷混凝土;脱离基础约束区的混凝土为满足浇筑温度要求,采用预冷、预热混凝土时间与基础约束区相同,4 月~10 月浇筑的基础约束区等进行初期通水冷却。上部 3m 层厚浇筑层,虽然混凝土最高温度能满足设计要求,但仍宜采取初期冷却措施,以确保控制混凝土最高温度及内外温差满足设计要求。

另外,为满足内外温差要求,每年入冬前 4 月~10 月浇筑的混凝土需进行中期通水冷

155

却，在入冬前将混凝土温度降至 15~16℃左右，同时加强混凝土表面保护。大坝混凝土浇筑温控分区见图 2。

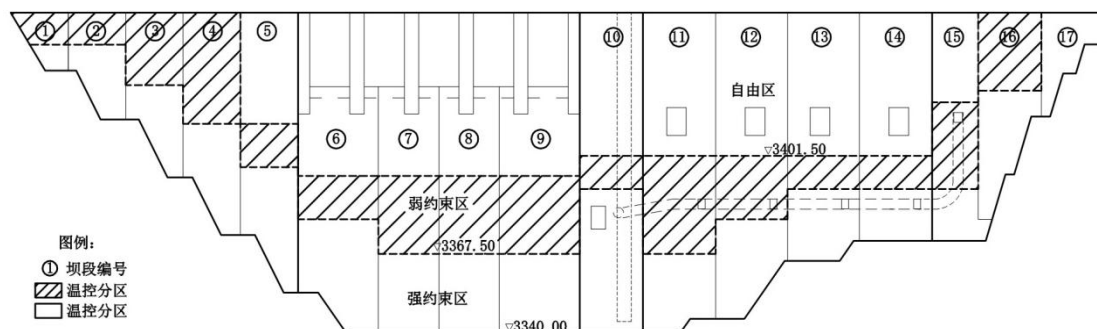


图 2 大坝混凝土浇筑温控分区图

4.2 浇筑仓内冷却水管布置

160

大坝碾压混凝土埋设塑料冷却水管，采用高导热 HDPE 塑料管（导热系数不小于 1.6kJ/m.h.℃），HDPE 塑料管主管规格为内径 32.60mm，壁厚 3.70mm，外径 40.00mm，支管规格为内径为 28.00mm，壁厚 2.00mm，外径 32.00mm。

165

坝内埋设的蛇形水管强约束区一般按 1.0m（水平间距）×1.5m（垂直间距），弱约束区和自由区混凝土水管布置为 2.0×1.5m 或 1.0m×3.0m 布置。当浇筑层厚 3m 时，陡坡坝段在 1.5m 的中间铺设一层水管。冷却水管埋设时水管距上、下游坝面 0.5m，水管距接缝面、坝内孔洞周边 0.5~0.8m。通水单根水管长度不大于 300m，当同一仓面需要布置多条蛇形支管时，各蛇形支管的长度基本相当^[7]。坝内蛇形水管就近引入下游坝面或下游预留槽内。

4.3 坝体初期通水冷却措施

170

大坝混凝土浇筑后随即进行初期通水，通水时间随季节不同而不同，初期通水结束时混凝土内部温度达到 20℃左右，之后为通水控温。初期通水采用水温 6~10℃的制冷水，通水时间视季节而定，待内部温度达到 20℃左右停止通水，通水时采用阶段性通水方式，在最高温度出现前通水流量为 1.5~2.5m³/h，最高温度出现后通水流量不小于 0.8~1.2m³/h，每 24h 进出水方向互换一次，同时要求最高温度峰值过后最大日降温速率≤0.5℃/d，通水温度与混凝土温度相差不大于 20℃。考虑到 10 月~次年 4 月沟（江）水水温较低，10 月~次年 4 月浇筑的混凝土可采用常温水进行初期通水冷却，通水时间一般为 20 天左右，每天改变一次进出水方向。通水过程中，制冷水首先满足基础强约束区和基础回填混凝土。

175

4.4 坝体中期通水冷却措施

(1) 通水水温

180

二期通水冷却混凝土温度与通水温度之差不超过 15℃，且降温速度不超过 0.3℃/d，因而在通水前先通过闷温测混凝土内部温度，根据温度的高低来确定先通常温水还是直接通制冷水，原则上对于坝体温度较高的部位混凝土，先通沟（江）水降温，当混凝土内部温度大于常温水温度达 8~10℃时，可先通沟（江）水 10~20 天，然后改用 8~10℃的制冷水冷却，

将坝体内部温度降至允许的温度或设计允许的温度。

(2) 通水时间

185 二次通水冷却根据计算得出坝体内部温度与通水时间关系曲线,以此初步确定冷却通水时间,具体现场操作以闷温后坝体内部温度达到设计温度为准。混凝土经过初期通水后,坝体内部最高温度在 20℃左右,当通以 12℃的沟(江)水或制冷水,通水流量 0.7m³/h 时,按照每天有效通水时间 20h 计,从 20℃降至 15℃需要 47 天,从其它的初始温度降低到设计温度所需要时间依此类推。

(3) 通水要求

190 采取有效管理和技术措施确保坝体连续通水,每月通水时间不少于 600h,中期进口水温 12~15℃,坝体混凝土与冷却水之间的温差不超过 15℃,水管通水流量为 0.6~1.0m³/h,控制坝体降温速度不大于 0.3℃/d,保持混凝土温度缓慢降到 15~16℃^[8]。

195 中期通水前通过闷温测出坝体温度,复核并保证通水水温满足水温与混凝土的温差要求。采取闷温和对埋设仪器的观测等措施检测,确保坝体通水冷却后的温度达到设计规定的坝体温度。控制坝体实际温度与设计温度的差值指标包括基础约束区为+0.5℃~0℃,基础约束区范围内二期冷却不允许超冷;自由区为+0.5℃~-2℃。

4.5 坝体通水水温及强度

200 初期通水为有效控制混凝土的内部最高温度,全年对新浇筑的混凝土进行初期通水。碾压混凝土通水时间 20 天左右,通水水温 10~12℃,前 10 天通水流量 1.5~2.5 m³/h,11~20 天通水流量 0.8~1.2m³/h,碾压混凝土最大通水量时共计 105 组冷却水管,按照平均流量 2m³/h 计,最大通水流量为 210m³/h。碾压混凝土制冷水制冷容量最大为 128 万 kCal/h,配置 2 台 68 万 kCal/h 移动式冷水站。

205 中期冷却通水进口水温 12~15℃,以通常温沟(江)水为主,中期通水最大通水量时共计 421 组冷却水管,按照平均流量 0.7m³/h 计,最大通水流量 295m³/h。

4.6 智能通水温控系统

210 大体积混凝土智能通水温控系统,是为满足碾压混凝土坝建设管理现代化、智能化需要而研发的一套软件,是能够实现水电站碾压混凝土的动态智能通水控制以及实时通水信息管理的综合平台。该系统通过对大体积混凝土仓位信息、水管信息等基础数据的输入,实时采集通水信息,包括实时通水流量,混凝土温度等,按照预先预测的通水流量实时调节控制阀门,实现统一控制管理,同时可以查询控制的情况状态。智能通水温控系统提高对碾压混凝土通水的精度和工作效率,达到智能化、信息化、实时化的水平,实现通水现场的无人化值守及对通水施工质量的实时有效控制。

5 结论

西藏地区平均气温低、昼夜温差大,大坝碾压混凝土浇筑强度高,温控要求极其严格,

215 通过对碾压混凝土坝最高温度控制、表面保护和二期通水冷却研究分析,采取混凝土预冷或预热、运输过程温控、浇筑过程温控、表面养护、二期通水冷却以及冷却工期控制等必要措施,保证大坝碾压混凝土浇筑质量。

220 [参考文献] (References)

- [1] 闻宇辉,李木珍.电站进水塔混凝土温控防裂措施[J].云南水力发电,2020,36(4):14-19.
- [2] 李文晖,张祥,王永杰.某水电站碾压混凝土温控措施研究[C].//中国大坝工程学会 2019 学术年会论文集.2019:97-108.
- 225 [3] 晏国顺,颀志强,陕亮.大古水电站 RCC 重力坝施工期温控防裂研究[J].中国农村水利水电,2022(1):183-189,195.
- [4] 周廷清,吴世勇,朱瑞晨,等.高原地区某水电站大坝混凝土温控防裂措施设计[J].浙江水利科技,2020,48(4):95-98.
- [5] 水利水电规划设计总院,NB/T35092-2017.混凝土坝温度控制设计规范[S].北京:中国电力出版社,2017.
- [6] 全国水利水电工程施工技术信息网,ISBN7-5083-1277-5.水利水电工程施工手册第 3 卷 混凝土工程[G].北京:中国电力出版社,2006.
- 230 [7] 黄巍,等.碾压混凝土施工[M].北京:中国水利水电出版社,2017.03.
- [8] 邢坦,胡文才,王振红.碾压混凝土坝陡坡坝段施工期温控防裂研究[J].人民黄河,2020,42(2):132-137.