

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.01.001

# 堆石混凝土绝热温升曲线特征及速率模型

权娟娟<sup>1</sup>, 王鼎<sup>1</sup>, 罗滔<sup>1,2</sup>, 张天祺<sup>1</sup>, 傅少君<sup>1,3</sup>, 王怡<sup>1</sup>

(1. 西京学院 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安 710123;

2. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 为了探究堆石混凝土温升机制, 对6种不同堆石率、3种不同初始浇筑温度、3种不同堆石级配的堆石混凝土进行绝热温升试验。分析堆石率、初始浇筑温度、堆石级配对堆石混凝土绝热温升和温升速率曲线的影响规律。并在绝热温升规律的基础上, 提出一种通用的堆石混凝土绝热温升速率模型, 用于描述绝热温升速率随龄期的变化规律。绝热温升速率模型简单, 对堆石混凝土绝热温升和温升速率的描述具有较好的效果。研究结果为建立混凝土绝热温升模型奠定了基础, 并有望推动通过动力学研究分析堆石混凝土的温升机理。

**关键词:** 堆石混凝土; 绝热温升; 绝热温升速率; 堆石率; 浇筑温度

中图分类号: TV64

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)01-0001-08

## Characteristics of Adiabatic Temperature Rise Curve and Model of Adiabatic Temperature Rise Rate of Rock-filled Concrete

QUAN Juanjuan<sup>1</sup>, WANG Ding<sup>1</sup>, LUO Tao<sup>1,2</sup>, ZHANG Tianqi<sup>1</sup>, FU Shaojun<sup>1,3</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structure, Xijing University, Xi'an, Shaanxi 710123, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** In order to explore the temperature rise mechanism of rock-filled concrete, adiabatic temperature rise tests were conducted on rock-filled concrete with six different rockfill ratio, three different initial pouring temperatures, and three different rockfill grades. The effects of rockfill ratio, initial pouring temperatures, and rockfill grades on the adiabatic temperature rise and temperature rise rate curves of rock-filled concrete were analyzed. A universal model of adiabatic temperature rise rate of rock-filled concrete was proposed based on the adiabatic temperature rise law, which is then used to describe the variation of adiabatic temperature rise rate with age. The adiabatic temperature rise rate model is simple and has a good effect on describing the adiabatic temperature rise and temperature rise rate of rock-filled concrete. The research results have laid the foundation for establishing a concrete adiabatic temperature rise model and are expected to analyze the temperature rise mechanism of rock-filled concrete through dynamic analysis

**Keywords:** rock-filled concrete; adiabatic temperature rise; adiabatic temperature rise rate; rockfill ratio; pouring temperature

堆石混凝土<sup>[1]</sup> (Rock-filled Concrete, 简称 RFC) 筑坝技术是在自密实混凝土技术基础上发展起来的

收稿日期: 2023-08-26

修稿日期: 2023-09-30

基金项目: 陕西省科技厅自然科学基金资助项目(2023-JC-YB-482); 西京学院大学生创新创业训练计划项目(X202312715086); 横向课题(2023610002004929)

作者简介: 权娟娟(1980—), 女, 硕士, 教授, 主要从事大体积混凝土温控防裂研究工作。E-mail: quanjuanjuan@xijing.edu.cn

通讯作者: 王鼎(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为堆石混凝土绝热温升及数值模拟。E-mail: 18382342289@163.com

一种新型混凝土筑坝技术,是中国大坝工程界在坝工核心领域取得的突破性标志性技术成果<sup>[2-5]</sup>。该技术是将粒径大于 300 mm 的块石(文中称“堆石”)先堆放至仓面,然后向堆石体浇筑自密实混凝土,利用自密实混凝土<sup>[6]</sup>的高流动性,填充到堆石体的空隙中,形成完整、密实、有较高强度的混凝土<sup>[2]</sup>。较常态混凝土,堆石混凝土水泥用量小,水化温升低,堆石内部温度与自密实混凝土温度发展规律相似,但存在温差和时间滞后效应有利于混凝土结构温控防裂<sup>[7-10]</sup>,而目前堆石混凝土技术主要应用在中小型大坝,其温控防裂措施研究结果不足以支撑其在高坝和超高坝的建设,可见,温控防裂仍是堆石混凝土工程面临的一个关键技术问题。

目前对于温度裂缝的防治策略主要表现为调控混凝土温度场,混凝土温度场仿真预测的基础是绝热温升,堆石混凝土绝热温升不仅与自密实混凝土有关,还与堆石率、浇筑环境、龄期等因素有关<sup>[11-18]</sup>,另外堆石混凝土堆石粒径和空间分布的随机性直接会影响堆石混凝土的孔隙结构非均匀变化,导致混凝土结构内部温度变化各异<sup>[19]</sup>。研究表明,混凝土自身温度和水化速率相互影响<sup>[20]</sup>,只有研究清楚温升速率,才能建立更准确的绝热温升数学模型。

然而目前的堆石混凝土绝热温升模型是在自密

实混凝土绝热温升试验基础上经过堆石混凝土仿真模拟初步确定的绝热温升公式,并没有考虑温升速率的影响,因此,本文以咸阳东庄水利枢纽工程为依托,通过对不同堆石率、不同初始浇筑温度、不同堆石级配的堆石混凝土开展绝热温升试验,研究绝热温升和绝热温升速率曲线的变化规律,拟提出堆石混凝土绝热温升速率模型,为高坝型堆石混凝土施工技术奠定基础。

## 1 试验

### 1.1 原材料

原材料来自于东庄水利枢纽工程,满足《堆石混凝土筑坝技术导则》<sup>[21]</sup>和《胶结颗粒料筑坝技术导则》<sup>[22]</sup>。堆石:饱和抗压强度 45 MPa,含泥量 0.12%,粒径 40 mm ~ 150 mm;水泥:冀东海德堡(涇阳)水泥有限公司生产的 P·MH42.5 水泥,见表 1 和表 2;粉煤灰:陕西正元秦电环保产业有限公司生产的粉煤灰超细粉(磨细 I 级),见表 3 和表 4;细骨料:表观密度 2 680 kg/m<sup>3</sup>,含粉量 5.07%,细度 2.65;粗骨料:粒径为 5 mm ~ 20 mm,表观密度 2 720 kg/m<sup>3</sup>,含泥量 0.43%;减水剂北京华石纳固有限公司生产的 HSNG-T;水:来自于实验室的普通自来水。

表 1 水泥的物理性能试验结果

表观密度 (g·cm <sup>-3</sup> )	标准稠度 /%	安定性 /mm	凝结时间/min		抗折强度/MPa			抗压强度/MPa		
			初凝	终凝	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
3.20	26.8	0.5	182	257	4.8	6.0	7.5	24.9	30.7	47.1

表 2 水泥的化学分析试验结果

比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	水化热/(kJ·kg <sup>-1</sup> )			化学分析/%				
	1 d	3 d	7 d	烧失量	不溶物	MgO	SO <sub>3</sub>	碱含量
321	187	246	255	1.8	0.41	4.12	2.18	0.59

表 3 粉煤灰的物理性能试验结果

粉煤灰种类	表观密度 (g·cm <sup>-3</sup> )	安定性 /mm	细度 /%	需水量比 /%	烧失量 /%	含水量 /%	28 d 活性指数 /%
陕西正元秦电 I 级	2.5	0.5	0.5	94	1.7	0.2	94

表 4 粉煤灰的化学分析试验结果

粉煤灰种类	化学分析/%			
	f-CaO	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	碱含量
陕西正元秦电 I 级	0.9	0.3	74.5	2.1

### 1.2 试验方法

采用 HR-4A 型混凝土绝热物理参数测定仪,绝热温升试验温度为 0℃~85℃,绝热温升温度分辨率为 0.01℃,温度精度为 0.01℃,每 1 h 自动采集绝热温升数据。试验样桶为圆柱形铁筒,底部直径

400 mm,高度 400 mm,体积 50.24 L。试验样桶配有边长为 1 m 的正方体绝热箱。试验模具底部设有保温层,模具口位置有密封绝热的橡胶圈,保证试验过程处于绝热状态。

### 1.3 试验方案及配合比

堆石混凝土堆石率拟定 0%、30%、35%、40%、45%、50%,具体试验材料用量见表 5。其中堆石率为 0% 为自密实混凝土,自密实混凝土设计强度 C25W4F100,水泥、粉煤灰、砂子、石子、水的配合比

为 1:1.04:7.01:3.76:0.87,外加剂 1 000 g、0.3 g 引气剂,坍落扩展度 670 mm,含气量 3%。堆石级配选择三级配,最大粒径不超 150 mm,三个粒度分形维数见表 5。

各粒径堆石的用量计算公式如下:

$$p_i = 100(d_i/d_{\max})^{3-D} \quad (1)$$

式中: $p_i$  为各粒径堆石的用量; $d_i$  为各粒径平均粒径; $d_{\max}$  为最大粒径; $D$  为粒度分形维数。

表 5 堆石混凝土配合比

试件编号	堆石率	水泥 /(kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰 /(kg·m <sup>-3</sup> )	砂子 /(kg·m <sup>-3</sup> )	石子 /(kg·m <sup>-3</sup> )	水 /(kg·m <sup>-3</sup> )	外加剂 /(kg·m <sup>-3</sup> )	初始 温度/℃	分形 维数
RFC-0-25	0.00	7.606	7.920	53.324	28.62	6.616	0.8838	25	—
RFC-0.30-25-2.53	0.30	5.323	5.544	37.327	20.034	4.631	0.6186	25	2.53
RFC-0.35-25-2.53	0.35	4.943	5.148	34.661	18.603	4.300	0.5744	25	2.53
RFC-0.40-25-2.53	0.40	4.563	4.752	31.995	17.172	3.969	0.5302	25	2.53
RFC-0.45-25-2.53	0.45	4.183	4.356	29.328	15.741	3.638	0.4860	25	2.53
RFC-0.50-25-2.53	0.50	3.803	3.960	26.662	14.310	3.308	0.4419	25	2.53
RFC-0.50-15-2.53	0.50	3.803	3.960	26.662	14.310	3.308	0.4419	15	2.53
RFC-0.50-5-2.53	0.50	3.803	3.960	26.662	14.310	3.308	0.4419	5	2.53
RFC-0.50-25-2.10	0.50	3.803	3.960	26.662	14.310	3.308	0.4419	25	2.10
RFC-0.50-25-2.80	0.50	3.803	3.960	26.662	14.310	3.308	0.4419	25	2.80

注:试件编号 RFC-0.40-25-2.53,RFC 为堆石混凝土,0.40 为堆石率 40%,25 为初始浇筑温度;2.53 为堆石级配分形维数。

根据《水工混凝土试验规程》<sup>[23]</sup>进行绝热温升试验。按表 5 称取材料,材料针对 5℃、15℃、25℃ 不同初始浇筑温度选取在冬季、春季和夏季的时候进行准备,初始浇筑温度依据陕西一年四季的温湿度确定,见表 6。先在试样桶堆放冲洗并晒干的堆石,再分两层将拌合好的满足工作性能的自密实混凝土拌合物装入试验桶,浇筑厚度 20 mm 左右,每一层装入后在振动台上振捣 5 min,待混凝土全部装入试验模具,在混凝土试件中心插入传热的铜管,往铜管倒入 2/3 铜管长度的机油,盖上试验模具顶盖,从顶盖将混凝土热物理参数测定仪温度传感器插入绝热箱铜管中,将试验模具送入混凝土热物理参数测定仪,关紧仪器门,进行绝热温升监测。

表 6 陕西省全年平均温度和湿度

季节	春秋季	夏季	冬季
温度/℃	11~17	22~34	2~7
湿度/%	54.0~64.5	70~80	40~48

## 2 试验结果与分析

### 2.1 绝热温升及温升速率特征

根据采集得到的绝热温升数据,绘制不同堆石

率、不同初始浇筑温度和不同级配的绝热温升与龄期变化曲线,如图 1—图 3 所示。

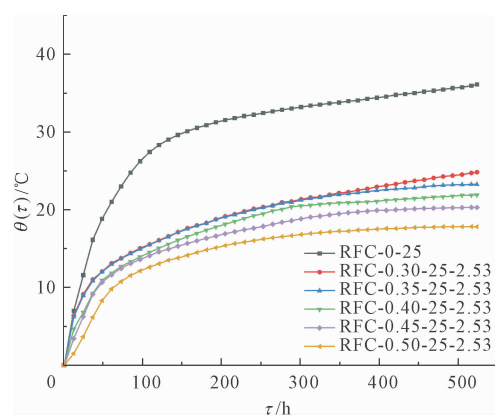


图 1 不同堆石率的绝热温升

从图 1—图 3 可知,绝热温升曲线都呈现初期快速增长,后期平缓上升的特点。堆石率增加,绝热温升减小;初始温度升高,绝热温升增加;堆石级配分形维数减小,绝热温升增加。

由图 1 可知,初始浇筑温度为 25℃,堆石级配分形维数为 2.53,不同堆石率的堆石混凝土约在 15 h 前绝热温升曲线接近直线,水化速率较快,之后绝

热温升曲线减缓,水化速率降低。最终温升在  $17.8^{\circ}\text{C}\sim 36.81^{\circ}\text{C}$ 。其中,堆石率 50% 绝热温升相比堆石率 0% 的绝热温升在 1 d、3 d、7 d、21 d 分别降低  $7.91^{\circ}\text{C}$ 、 $12.57^{\circ}\text{C}$ 、 $14.48^{\circ}\text{C}$ 、 $17.01^{\circ}\text{C}$ 。

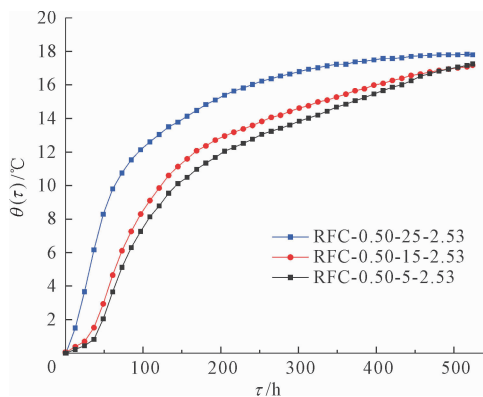


图 2 不同初始浇筑温度绝热温升

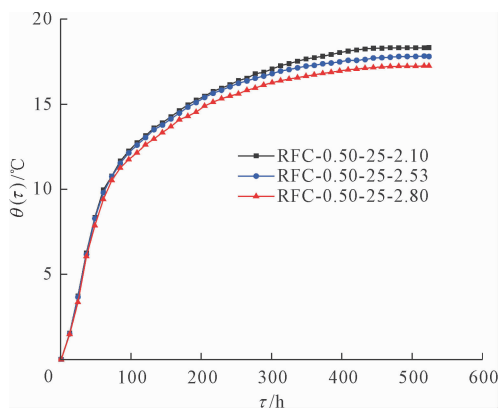


图 3 不同堆石级配的绝热温升

由图 2 可知,堆石率为 50%,堆石级配分形维数为 2.53,不同初始浇筑温度的堆石混凝土在 25 h ~ 50 h 前绝热温升曲线接近直线,水化速率较快,之后绝热温升曲线减缓,水化速率降低。最终绝热温升在  $17.26^{\circ}\text{C}\sim 17.8^{\circ}\text{C}$ ,初始浇筑温度  $5^{\circ}\text{C}$  相比  $25^{\circ}\text{C}$ ,绝热温升在 3 d、7 d、21 d 分别降低  $5.36^{\circ}\text{C}$ 、 $3.51^{\circ}\text{C}$ 、 $0.74^{\circ}\text{C}$ 。

由图 3 可知,堆石率为 50%,初始浇筑温度  $25^{\circ}\text{C}$ ,不同堆石级配分形维数的堆石混凝土在 20 h 前绝热温升曲线接近直线,水化速率较快,之后绝热温升曲线减缓,水化速率降低。最终温升在  $17.25^{\circ}\text{C}\sim 18.32^{\circ}\text{C}$ ,分形维数 2.80 相比 2.10,绝热温升在 3 d、7 d、21 d 分别降低  $0.24^{\circ}\text{C}$ 、 $0.53^{\circ}\text{C}$ 、 $1.07^{\circ}\text{C}$ 。

以龄期  $\tau$  为横坐标、绝热温升速率  $d\theta(\tau)/d\tau$  为纵坐标,对绝热温升求导绘制绝热温升速率  $d\theta(\tau)/d\tau$ -龄期  $\tau$  关系曲线,如图 4—图 6。由图 4—图 6 可知,不同堆石率、不同初始浇筑温度及不同堆

石级配堆石混凝土  $d\theta(\tau)/d\tau$ - $\tau$  关系均具有相同的变化趋势,即绝热温升速率单调递增到峰值点后开始下降,到龄期为 120 h 后,逐渐平缓接近于一条水平直线。

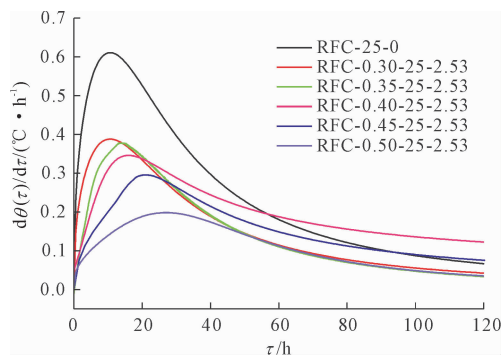


图 4 不同堆石率的绝热温升速率  $d\theta(\tau)/d\tau$

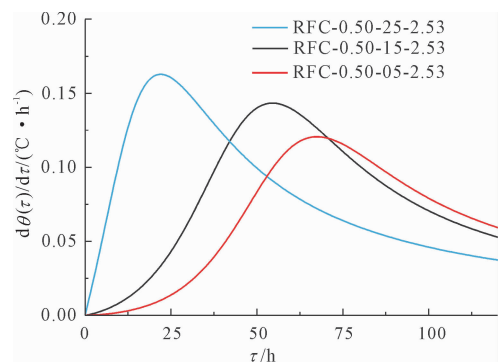


图 5 不同初始浇筑温度绝热温升速率  $d\theta(\tau)/d\tau$

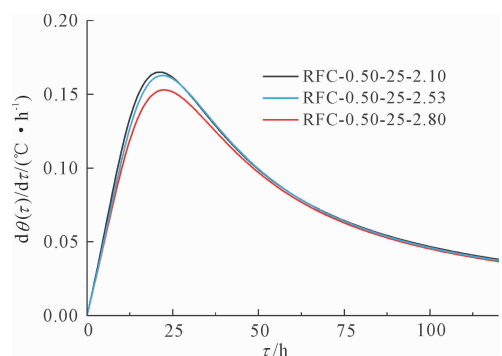


图 6 不同堆石级配绝热温升速率  $d\theta(\tau)/d\tau$

由图 4 可知,堆石率越大,混凝土绝热温升速率峰值出现时间越晚,且绝热温升速率峰值越小。堆石率 0%、30%、35%、40%、45%、50% 峰值出现的时间大约分别是 8 h、11 h、13 h、17 h、20 h、26 h,堆石率 50% 相比 0%,温升速率峰值出现晚约 20 h,最大温升速率减小约 70%。

由图 5 可知,初始浇筑温度越低,混凝土绝热温升速率峰值出现时间越晚,且绝热温升速率峰值越小。初始浇筑温度  $5^{\circ}\text{C}$ 、 $15^{\circ}\text{C}$ 、 $25^{\circ}\text{C}$  峰值出现的时间分

别是 61 h, 53 h, 29 h。初始浇筑 5℃ 相比 25℃, 温升速率峰值出现晚约 30 h, 最大温升速率减小约 35%。

由图 6 可知, 堆石级配分形维数对绝热温升速率出现时间和峰值影响不明显。堆石级配分形维数越大, 混凝土绝热温升速率峰值越低。堆石级配分形维数 2.10、2.53、2.80 峰值出现的时间都在 30 h 左右。分形维数 2.80 相比 2.10, 最大温升速率减小约 2%。

综合上述结果可以得出如下规律性的认识: 堆石率对绝热温升速率大小影响较明显, 这是因为堆石会吸收大量的水化放热, 降低绝热温升, 导致温升速率减小。初始浇筑温度对绝热温升速率峰值出现时间较明显, 这是因为温度越高, 各分子之间的化学性能越活跃, 水化反应速度越快, 堆石级配对绝热温升速率影响不大, 是因为堆石率相同, 小粒径堆石过多时, 堆石与自密实混凝土接触的表面积就越多, 吸收的热量就多一点, 反之吸收的热量就小一点。

## 2.2 绝热温升速率分界点的确定

龄期/温升( $\tau/\theta(\tau)$ )曲线能够反映某时刻单位绝热温升所需的水化时间, 而绝热温升速率  $d\theta(\tau)/d\tau$  曲线反映某时刻单位时间的绝热温升值, 两者刚好相反。因此, 通过这两个绝热温升速率曲线来对比研究各阶段的划分标准。绘制不同堆石率、不同初始浇筑温度、不同堆石级配的绝热温升速率曲线  $\tau/\theta(\tau)$ , 如图 7—图 9 所示。

由图 7—图 9 可以看出, 随堆石率增加、初始浇筑温度降低、分形维数增加, 绝热温升每升高 1℃ 需要的时间变长, 与  $d\theta(\tau)/d\tau$  曲线呈现的规律一致。以堆石率 50%、初始温度 25℃、分形维数 2.10 为例, 建立  $d\theta(\tau)/d\tau$  关系曲线和  $\tau/\theta(\tau)$  关系曲线, 并对比进行研究, 如图 10 所示。从图 10 可知, 堆石混凝土水化温升按诱导期、加速期、减速期、衰速期等阶段划分。诱导期:  $\tau/\theta(\tau)$  曲线加速上升, 诱导期结束  $\tau/\theta(\tau)$  曲线上升到峰值点, 峰值点为诱导期结束点和加速期起点 (A), 时刻记为  $\tau_0$ ; 加速期:  $\tau/\theta(\tau)$  曲线快速下降, 并在  $d\theta(\tau)/d\tau$  曲线出现峰值时刻 (B) 出现转折, 以  $d\theta(\tau)/d\tau$  曲线峰值点发生的时刻  $\tau_p$  为加速期与减速期的临界与分界时间; 减速期:  $\tau/\theta(\tau)$  曲线从转折点开始上升; 衰速期:  $\tau/\theta(\tau)$  曲线与  $d\theta(\tau)/d\tau$  曲线的衰速阶段都不明显, 但 2 条曲线出现一个交点 (C), 且  $\tau/\theta(\tau)$  曲线在交点之后基本为直线上升趋势, 以  $d\theta(\tau)/d\tau$  曲线与  $\tau/\theta(\tau)$  曲线的交点 C 为衰速期的开始时间, 以  $\tau/\theta(\tau)$  曲线与  $d\theta(\tau)/d\tau$  曲线第二个交点 C 发生的时刻  $\tau_d$  为衰速期开始时间, 这表明混凝土水化基本

完成, 放出的热量持续减少, 直至水化停止。由图 7—图 9 可见, 不同堆石率、不同初始浇筑温度、不同堆石级配的  $\tau/\theta(\tau)$  曲线特征一致, 都具有上述分段的特征。

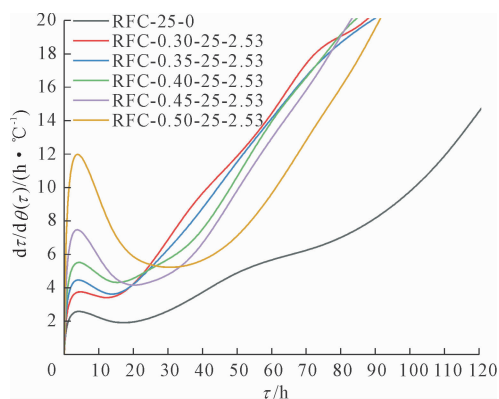


图 7 不同堆石率绝热温升速率  $\tau/\theta(\tau)$

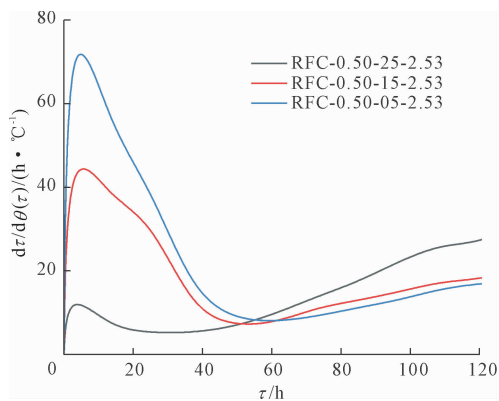


图 8 不同初始浇筑温度绝热温升速率  $\tau/\theta(\tau)$

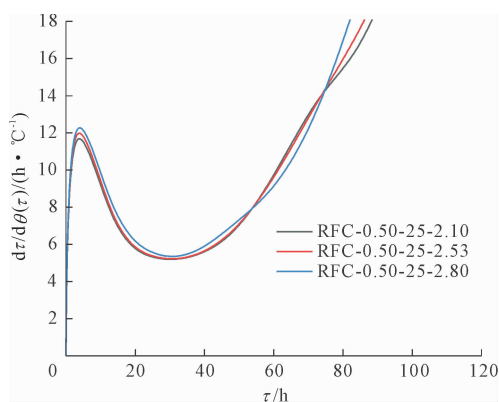


图 9 不同堆石级配绝热温升速率  $\tau/\theta(\tau)$

根据上述堆石混凝土绝热温升速率阶段的确定方法, 对本文 10 组堆石混凝土绝热温升过程进行诱导期、加速期、减速期、衰速期<sup>[24]</sup>阶段处理, 得到各试验在诱导期结束时刻  $\tau_0$ 、温升峰值点的时刻  $\tau_p$ 、衰速期开始点时刻  $\tau_d$ , 以及各时刻的温升速率

$d\theta(\tau)/d\tau$ 、绝热温升值及水化度  $DH$ , 如表 7 所示。

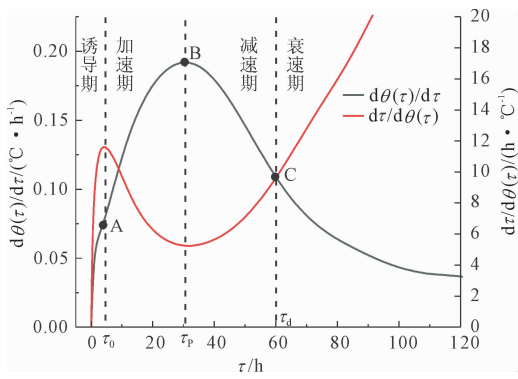


图 10 绝热温升速率  $d\theta(\tau)/d\tau$  与  $\tau/\theta(\tau)$  关系

从表 7 可知,堆石率增加,堆石混凝土水化诱导期结束时间、到达峰值点时间、衰速期开始时间均推

迟,绝热温升速率均降低。初始浇筑温度增加,堆石混凝土水化诱导期结束时间、到达峰值时间、衰速期开始时间均提前,绝热温升速率均增加。堆石级配分形维数增加,堆石混凝土水化诱导期结束时间、到达峰值时间、衰速期开始时间变化不大。通过大量试验发现,堆石混凝土水化诱导期结束平均时间约为 4.3 h,温升速率平均值为 0.13°C/h,绝热温升平均值为 0.76°C,平均水化度约为 3.26%;到达峰值点平均时间为 22.7 h,温升速率平均值为 0.26°C/h,温升平均值约为 4.6°C,平均水化度约为 23.5%;到达衰速期开始点平均时间为 67.4 h,温升速率平均值为 0.11°C/h,温升平均值为 11.18°C,平均水化度约为 52.9%。相比掺粉煤灰的常态混凝土研究结果<sup>[25]</sup>,滞后性明显。

表 7 绝热温升速率曲线  $d\theta(\tau)/d\tau$  各阶段特征值

试件编号	浇筑温度 /°C	诱导期结束点				温升速率峰值点				衰速期开始点			
		$\tau_0$ /h	$d\theta(\tau)/d\tau$	$\theta(\tau)$	$DH$ /%	$\tau_p$ /h	$d\theta(\tau)/d\tau$	$\theta(\tau)$	$DH$ /%	$\tau_d$ /h	$d\theta(\tau)/d\tau$	$\theta(\tau)$	$DH$ /%
RFC-0.00-25	25.2	3.5	0.322	1.47	4.3	8.0	0.631	4.15	12	46.1	0.182	20.61	60
RFC-0.30-25-2.53	23.0	3.7	0.251	1.38	5.5	11.6	0.332	5.65	22	31.8	0.157	10.22	41
RFC-0.35-25-2.53	23.3	4.0	0.223	1.37	5.9	12.3	0.325	5.86	25	33.2	0.151	10.25	44
RFC-0.40-25-2.53	23.6	4.1	0.183	1.23	5.6	13.6	0.252	4.83	22	43.4	0.137	10.17	46
RFC-0.45-25-2.53	23.0	4.1	0.144	0.89	4.4	18.3	0.246	4.66	23	46.1	0.128	10.27	51
RFC-0.50-25-2.53	24.7	4.3	0.077	0.33	1.8	30.3	0.191	4.59	27	60.0	0.109	9.67	54
RFC-0.50-15-2.53	14.9	5.2	0.018	0.17	0.9	52.5	0.140	3.51	21	141.8	0.045	10.99	64
RFC-0.50-5-2.53	5.8	5.6	0.012	0.08	0.5	60.7	0.124	3.66	21	151.5	0.037	10.32	60
RFC-0.50-25-2.10	24.9	4.3	0.078	0.34	1.9	30.9	0.192	4.61	27	59.9	0.109	9.82	54
RFC-0.50-25-2.80	25.4	4.3	0.075	0.33	1.8	30.8	0.187	4.59	27	60.7	0.108	9.48	55

### 2.3 绝热温升速率模型及模型拟合计算

根据表 7 中各试件编号的水化温升各阶段结束时间和绝热温升速率作为关键点,构建一个 4 参数函数模型。

$$q(\tau) = \frac{m\tau^a}{(\tau - \tau_p) + b} \quad (2)$$

式中: $q(\tau)$  为龄期  $\tau$  时刻的绝热温升速率; $\tau_p$  为温升峰值点时刻; $a$ 、 $b$ 、 $m$  为常数。为达到温升速率峰值点的时间, $a$  调整速率曲线衰速期温升程度系数, $b$  的作用是调整加速期和减速期持续时间之和的大小, $m$  调整峰值高度系数。

图 11 以试件编号 RFC-0.50-25-2.53 (堆石率 50%,初始浇筑温度 25°C,堆石级配分形维数 2.53) 为例,给出了堆石混凝土绝热温升速率曲线的拟合结果,其余的试件编号的堆石混凝土绝热温升速率拟合结果见表 8 所示。图 12 以试件编号 RFC-

0.50-25-2.53 (堆石率 50%,初始浇筑温度 25°C,堆石级配分形维数 2.53) 为例,给出了用绝热温升速率曲线积分所得到的绝热温升曲线拟合结果。各试件编号的堆石混凝土绝热温升计算值和试验值对比见表 9 所示。

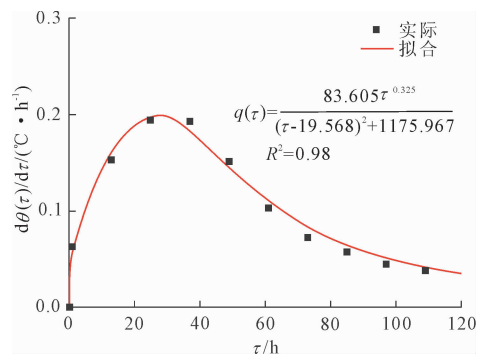


图 11 绝热温升速率模型计算值与实际试验值对比

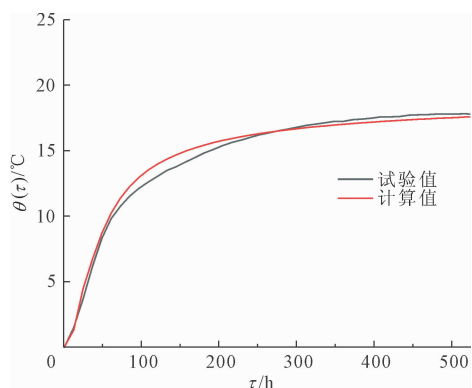


图 12 绝热温升计算值与实际试验值对比

由图 11 和表 8 可以看出,对于本文不同堆石率、不同初始浇筑温度和不同堆石级配的堆石混凝土,用本文函数模型所计算的绝热温升速率结果与试验结果都很接近,拟合效果都较理想,绝热温升速率拟合相关系数大于 0.98;从图 12 和表 9 可以看出,对于本文不同堆石率、不同初始浇筑温度和不同堆石级配的堆石混凝土,用本文函数模型所计算的绝热温升结果与试验结果都很接近,最大相对误差出现在诱导期结束,相对误差为 19%。

表 8 绝热温升速率曲线  $d\theta(\tau)/d\tau$  各阶段特征值

试件编号	绝热温升速率拟合公式	绝热温升速率拟合相关系数
RFC-0.00-25	$q(\tau) = \frac{52.729\tau^{0.623}}{(\tau + 11.174)^2 - 55.997}$	0.99
RFC-0.30-25-2.53	$q(\tau) = \frac{13.415\tau^{0.816}}{(\tau + 5.339)^2 + 10.998}$	0.98
RFC-0.35-25-2.53	$q(\tau) = \frac{3.566\tau^{1.537}}{(\tau + 1.633)^2 + 13.383}$	0.99
RFC-0.40-25-2.53	$q(\tau) = \frac{27.003\tau^{0.689}}{(\tau + 10.424)^2 + 10.428}$	0.98
RFC-0.45-25-2.53	$q(\tau) = \frac{98.328\tau^{0.349}}{(\tau + 0.181)^2 + 716.245}$	0.98
RFC-0.50-25-2.53	$q(\tau) = \frac{83.605\tau^{0.325}}{(\tau - 19.568)^2 + 1175.967}$	0.98
RFC-0.50-15-2.53	$q(\tau) = \frac{1.006\tau^{1.221}}{(\tau - 44.194)^2 + 817.237}$	0.98
RFC-0.50-5-2.53	$q(\tau) = \frac{0.403\tau^{1.401}}{(\tau - 47.357)^2 + 813.191}$	0.98
RFC-0.50-25-2.10	$q(\tau) = \frac{37.569\tau^{0.515}}{(\tau - 4.79)^2 + 640.452}$	0.98
RFC-0.50-25-2.80	$q(\tau) = \frac{37.661\tau^{0.493}}{(\tau - 6.861)^2 + 668.639}$	0.98

表 9 各组试验绝热温升计算值与试验值对比

试件编号	诱导期结束点绝热温升/°C				温升速率峰值点绝热温升/°C				衰速期开始点绝热温升/°C			
	计算值	试验值	差值	相对误差/%	计算值	试验值	差值	相对误差/%	计算值	试验值	差值	相对误差/%
RFC-0.00-25	1.61	1.47	0.14	8.70	3.97	4.15	-0.18	4.53	19.82	19.61	0.21	1.06
RFC-0.30-25-2.53	1.33	1.38	-0.05	-3.76	4.95	5.65	-0.70	14.14	9.81	10.22	-0.41	4.18
RFC-0.35-25-2.53	1.50	1.37	0.13	8.67	5.21	5.86	-0.65	12.48	10.08	10.25	-0.17	1.69
RFC-0.40-25-2.53	1.19	1.23	-0.04	-3.36	4.12	4.83	-0.71	17.23	9.68	10.17	-0.49	5.06
RFC-0.45-25-2.53	1.08	0.89	0.19	17.59	5.31	4.66	0.65	12.24	10.61	10.27	0.34	3.20
RFC-0.50-25-2.53	0.38	0.33	0.05	13.16	5.44	4.59	0.85	15.63	10.09	9.67	0.42	4.16
RFC-0.50-15-2.53	0.21	0.17	0.04	19.05	3.14	3.51	-0.37	11.78	10.51	10.99	-0.48	4.57
RFC-0.50-5-2.53	0.09	0.08	0.01	11.11	3.39	3.66	-0.27	7.96	9.96	10.32	-0.36	3.61
RFC-0.50-25-2.10	0.42	0.34	0.08	19.05	5.72	4.61	1.11	19.41	10.43	9.82	0.61	5.85
RFC-0.50-25-2.80	0.38	0.33	0.05	13.16	5.45	4.59	0.86	15.78	10.51	9.48	1.03	9.80

### 3 结论

(1) 通过绝热温升试验数据,可得到堆石混凝土绝热温升曲线都呈现初期快速增长,后期平缓上升的特点,堆石率对绝热温升速率大小影响较明显,初始浇筑温度对绝热温升速率峰值出现时间较明显,堆石级配对绝热温升速率影响不大。

(2) 堆石混凝土绝热温升速率曲线都经过 4 个阶段,但各阶段的水化温升进程有较大差别,堆石率增加、初始浇筑温度降低,水化诱导期结束时间、到

达峰值点时间、衰速期开始时间均推迟,绝热温升速率均降低。诱导期温升速率平均值为 0.13°C/h,绝热温升速率峰值点温升速率平均值为 0.26°C/h。

(3) 提出通用的堆石混凝土绝热温升速率 4 参数模型,模型对于绝热温升曲线和绝热温升速率曲线都有较好的拟合效果,模型参数针对绝热温升速率曲线特点有明确的物理意义。

#### 参考文献:

[1] 金峰,安雪晖,石建军,等.堆石混凝土及堆石混凝土

- 土大坝[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 78-83.
- [2] Huang M, An X, Zhou H, et al. Rock-filled concrete—Development, investigations and applications [J]. *Int Water Power Dam Const*, 2008, 60(4): 20-24.
- [3] Jin F, Zhou Hu, An X. Research on rock-filled concrete dam[J]. *Int J Civil Eng*, 2019, 17(4): 495-500.
- [4] Jin F, Zhou H, Huang D. Research on rock-filled concrete dams: a review[J]. *Dam Eng*, 2018, 29(2): 101-112.
- [5] An X, Wu Q, Jin F, et al. Rock-filled concrete, the new norm of SCC in hydraulic engineering in China[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 54: 89-99.
- [6] Ozawa K, Ouchi M. Current condition of self-compacting concrete in Japan[C]//The Second International Symposium on SCC, Tokyo, 2001: 63-68.
- [7] Liu C, Ahn C R, An X, et al. Life-cycle assessment of concrete dam construction: comparison of environmental impact of rock-filled and conventional concrete[J]. *Journal of Construction Engineering & Management*, 2013, 139(12): A4013009.
- [8] 张广泰, 潘定才, 刘清. 大体积堆石(卵石)混凝土内部温度的试验研究[J]. *建筑科学*, 2009, 25(9): 34-37.
- [9] 赵运天, 解宏伟, 周虎. 堆石混凝土拱坝温度应力仿真及温控措施研究[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(1): 90-97.
- [10] 曾旭, 姚国专, 余舜尧, 等. 堆石混凝土拱坝施工期温度监测与分析[J]. *水力发电*, 2022, 48(2): 73-80.
- [11] 罗键, 曾旭. 堆石混凝土绝热温升影响因素分析[J]. *水利规划与设计*, 2022(4): 83-85, 92.
- [12] 余舜尧, 徐小蓉, 邱流潮, 等. 堆石混凝土浇筑前后的非均质温度分布试验研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(9): 1388-1400.
- [13] 金峰, 李乐, 周虎, 等. 堆石混凝土绝热温升性能初步研究[J]. *水利水电技术*, 2008, 39(5): 59-63.
- [14] 曾令福. 堆石混凝土绝热温升试验及数值模拟研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [15] 刘昊. 堆石混凝土综合性能试验与温度应力研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [16] 高继阳. 堆石混凝土坝温度应力仿真分析及温控措施研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016.
- [17] 冷盛阳. 堆石混凝土坝施工期温度场、应力场分析及裂缝控制[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [18] 周荣. 堆石率对堆石混凝土绝热温升影响试验研究[J]. *水利技术监督*, 2023(5): 271-273, 298.
- [19] 陆雪妮, 朱晟. 考虑级配参数空间变异性的堆石坝随机有限元分析[J]. *水力发电*, 2022, 48(6): 81-89.
- [20] 李义方, 李昊洋, 宋文杰, 等. 考虑水化速率影响的混凝土水管冷却温度场分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(S1): 215-218.
- [21] 堆石混凝土筑坝技术导则: NB/T 10077—2018[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [22] 胶结颗粒料筑坝技术导则: SL 678—2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [23] 水工混凝土试验规程: DL/T 5150—2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [24] 王国杰, 郑建岚. 自密实混凝土绝热温升速率试验研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2014, 47(6): 779-784.
- [25] 权娟娟, 傅少君, 杨如东, 等. 掺粉煤灰混凝土绝热温升速率特征及模型研究[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(4): 134-140.