

# 水热耦合养护混凝土蠕变特性试验

姚韦靖<sup>1,2,3</sup>, 柏梦宇<sup>1</sup>, 蔡海兵<sup>1,3</sup>, 刘 涛<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 芜湖市勘察测绘设计研究院有限责任公司 博士后科研工作站, 安徽 芜湖 241000; 3. 安徽理工大学 矿山建设工程安徽省高校重点实验室, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:** 为研究不同温度水热耦合养护对混凝土蠕变特性的影响, 进行了 20、40、60、80 °C 水热耦合养护 60 d 单轴压缩试验、分级压缩蠕变试验和 SEM 扫描电镜试验。结果表明: 养护 20 d 内各温度水热耦合养护混凝土强度明显高于正常养护混凝土, 60 °C 水热耦合养护混凝土强度提高率最大达 54.8%, 之后各温度水热耦合养护混凝土强度降低, 至养护 60 d 时均低于正常养护混凝土。随着水热耦合温度升高, 混凝土蠕变性能先提高后降低, 经历 60 °C 水热耦合养护后显著提高了混凝土蠕变性能, 与正常养护相比, 蠕变强度提高了 22.24%, 蠕变时间延长了 23.95 h, 瞬时应变和蠕变应变分别下降了 6.4% 和 32%; 但经历 80 °C 水热耦合养护对混凝土蠕变特性产生较大的负面效应。基于试验结果对 Burgers 蠕变模型参数进行辨识, 所得理论曲线与试验数据吻合较好。

**关键词:** 结构工程; 水热耦合养护; 混凝土; 蠕变; 本构模型; 微观结构

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)07-2343-11

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231113

## Creep properties of concrete under hydrothermal coupling curing

YAO Wei-jing<sup>1,2,3</sup>, BAI Meng-yu<sup>1</sup>, CAI Hai-bing<sup>1,3</sup>, LIU Tao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Postdoctoral Science Research Workstation, Wuhu Surveying and Mapping Design Institute Co., Ltd., Wuhu 241000, China; 3. Anhui Key Laboratory of Mining Construction Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** To study the influence of hydrothermal coupling curing at different temperatures on the creep characteristics of concrete, uniaxial compression test, multistage creep test, and scanning electron microscope (SEM) test of concrete after hydrothermal coupling curing at 20, 40, 60, 80 °C were conducted. The results show that the strength of concrete under different temperatures in hydrothermal coupling curing is significantly higher than that of normal curing in the 20 days of curing. The maximum increase rate of concrete strength under the hydrothermal coupling curing at 60 °C is 54.8%. Then the strength of concrete decreases at different temperatures hydrothermal coupling curing, and the strength is

收稿日期: 2023-10-17.

基金项目: 淮南市科技计划项目(2023A313); 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2023-YF048); 矿山建设工程安徽省高校重点实验室开放基金项目(GXZDSYS2022106); 安徽理工大学研究生创新基金项目(2022CX2043).

作者简介: 姚韦靖(1990-), 男, 副教授, 在站博士后. 研究方向: 混凝土耐久性. E-mail: yaoweijing0713@163.com

lower than the normal curing after curing 60 days. With the increasing hydrothermal coupling temperature, the creep performance of concrete first increases and then decreases. The creep properties of concrete were significantly improved after the hydrothermal coupling at 60 °C, and the creep strength was increased by 22.24%, the creep time was extended by 23.95 hours, the instantaneous strain and creep strain were decreased by 6.4% and 32%, respectively, compared with normal curing. However, after experiencing hydrothermal coupling at 80 °C, it will have a greater negative effect on the concrete creep properties. Based on the test results, the Burgers creep model agrees well with the creep test data.

**Key words:** structure engineering; hydrothermal coupling curing; concrete; creep; constitutive model; micro structure

## 0 引言

水热耦合环境对混凝土水化及养护产生较大影响,如在深埋高地温隧道、矿井巷道、硐室等环境下,容易导致衬砌结构开裂、支护材料力学及耐久性降低,再如我国南方地区环境湿热特征显著,建筑用混凝土受水热耦合作用影响严重<sup>[1]</sup>。

混凝土蠕变特性影响结构安全及使用寿命<sup>[2]</sup>,学者们对此开展了大量研究,Gong等<sup>[3]</sup>研究了混凝土硫酸盐干湿循环下的蠕变性能,提出了硫酸盐干湿循环侵蚀后的蠕变模型。Su等<sup>[4]</sup>试验得出蠕变微损伤积累逐渐转化为不可恢复变形,揭示了混凝土本构模型中黏弹性的原因是滞后恢复和随时间变化的行为。辛亚军等<sup>[5]</sup>进行了2种加载速率下的混凝土单轴压缩蠕变试验,认为蠕变破坏应力水平提高,蠕变应变速率整体降低。养护或服役温湿度也会对混凝土结构产生不可忽视的影响,Zhao等<sup>[6]</sup>研究了养护温度对粉煤灰混凝土蠕变行为的影响。李想等<sup>[7]</sup>分析了100~300 °C下的混凝土短时蠕变特性,结果表明:混凝土蠕变量、蠕变速率等均随温度升高而逐渐降低。刘雨姗等<sup>[8]</sup>进行了室温至800 °C后页岩陶粒轻骨料混凝土分级压缩蠕变试验,结果表明超过600 °C后混凝土蠕变应变明显增大,基于试验结果对Burgers蠕变模型进行了参数辨识。研究表明:温度对混凝土蠕变行为的影响不容忽视,实际工程混凝土受动态水热耦合环境影响,如水热型高地温隧道、深埋矿井巷道、夏季高温暴雨等<sup>[9,10]</sup>,导致巷(隧)道衬砌结构受高温岩体及裂隙水影响诱发结构失效,相关研究较少。

本文设置20~80 °C的干湿循环水热耦合养护来模拟动态温湿环境,对水热耦合养护60 d混凝土进行单轴压缩、分级加载蠕变和微观试验,分

析不同温度水热耦合养护混凝土抗压强度损失、蠕变特性及微观损伤机理。

## 1 材料与方法

### 1.1 原材料

采用水泥为八公山牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥,化学成分见表1;粉煤灰为河南大唐电厂产Ⅰ级粉煤灰,化学组分见表2;粗骨料选用石灰质碎石,粒径5~15 mm的连续级配,表观密度2 780 kg/m<sup>3</sup>;细骨料选用淮河中粗砂,细度模数2.65,表观密度2 500 kg/m<sup>3</sup>;减水剂为陕西秦奋建材有限公司生产的HPWR型高性能减水剂。

表1 水泥化学成分组成

Table 1 Chemical composition of cement

| 组成     | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | 烧失量  |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------|
| 质量分数/% | 22.60            | 5.03                           | 4.38                           | 63.11 | 1.46 | 2.24            | 1.18 |

表2 粉煤灰化学成分组成

Table 2 Chemical composition of fly ash

| 组成     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | SO <sub>3</sub> | CaO | Fe      | H <sub>2</sub> O | 烧失量  |
|--------|--------------------------------|------------------|-----------------|-----|---------|------------------|------|
| 质量分数/% | 30                             | 50               | 3               | 11  | 0.8~1.0 | 1                | 1.18 |

### 1.2 配合比设计

依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)进行配合比设计<sup>[11]</sup>,强度设计值为C30,水灰比为1:0.45,具体配合比见表3。测试混凝土3 d强度为14.3 MPa,28 d强度为32.6 MPa。

表3 试验配合比

Table 3 Test mix ratio

| 混凝土 | 水泥  | 粉煤灰 | 碎石  | 砂   | 水     | 减水剂 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|
| C30 | 420 | 50  | 856 | 856 | 211.5 | 4.7 |

### 1.3 试验方法

为模拟混凝土在水热耦合作用下的养护过程,采用不同温度下的干湿循环试验,测试混凝土在反复干燥、湿润状态下的性能劣化规律。为使

混凝土在短时间内看到劣化规律,采用干湿时间比为1:5<sup>[12]</sup>。

采用 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的圆柱体试件,分别在20、40、60、80℃恒温水浴箱中浸泡40 h,在105℃恒温干燥箱中干燥6 h,再自然风干2 h,此为一次干湿循环,一个循环2 d,同时设置置于标准养护环境下(温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,相对湿度 $\geq 95\%$ )的混凝土为对照组。养护完成后,在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 烘干24 h,直到完全干燥,确保水泥水化反应结束,进行单轴压缩和分级加载蠕变试验。记NC-20为标准养护混凝土,NC为普通混凝土,20代表养护温度为20℃,DW-20、DW-40、DW-60、DW-80则分别表示在20、40、60、80℃下的水热耦合养护混凝土。

选用CLY15016型电子蠕变松弛试验机对不同水热耦合养护后的混凝土试件进行单轴压缩和分级压缩蠕变试验。单轴压缩试验以0.5 kN/s速率加载获得抗压强度,分级压缩蠕变试验采用等量分级递增的加载方式,加载速率为0.5 MPa/s,设计第一级恒载应力为12 MPa,此后逐级递增3 MPa直至试件破坏,每级恒载应力保持12 h。试验过程中计算机自动采集应力及应变数据,加载期间第一级采样频率为10 Hz,恒定荷载期间采样为0.1 Hz;此后采样频率为5 Hz,恒定荷载期间采样频率为0.05 Hz。加载系统通过数据反馈自动进行应力调整,使混凝土在蠕变过程中所受应力保持定值。试验结束后从单轴压缩试验压碎的试块中取样,使用日立产S-3400N型扫描电子显微镜进行微观形貌分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 抗压强度损失

对经历水热耦合养护后的混凝土进行单轴抗压强度测试,结果见图1。

由图1可得,在养护初期20 d内,经历各温度干湿循环后,混凝土强度明显高于标准养护条件,在20 d时,DW-20、DW-40、DW-60、DW-80强度分别较NC-20提高11.6%、10.0%、54.8%和18.5%,说明在养护初期高温对混凝土养护水化有益。随养护时间延长,标准养护条件下的强度随之提高,且变化幅度不大;但不同温度水热耦合养护条件会加速混凝土抗压强度峰值形成。不同温度干湿循环下,混凝土达到最高强度前后会出

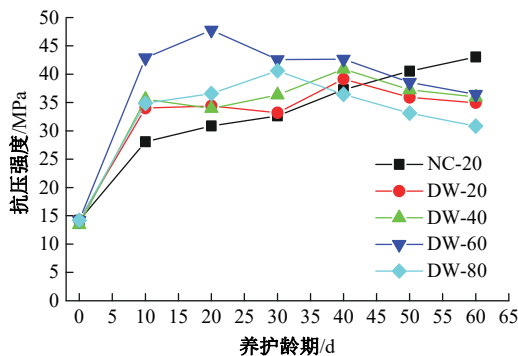


图1 混凝土抗压强度与水热耦合养护龄期的关系

Fig.1 Relationship between concrete compressive strength and hydrothermal coupling curing age

现一段强度滞留期,其间强度大致不变,少数出现波动。

具体地,60℃水热耦合养护下在20 d达到峰值47.79 MPa,之后强度下降,处于停滞期,80℃水热耦合养护下在30 d前抗压强度逐步上升达到峰值40.61 MPa,之后开始下降,处于停滞期,20℃和40℃水热耦合养护下都在40 d达到峰值前,养护10~20 d阶段处于停滞期,达到峰值后逐渐下降。20℃和40℃水热耦合养护下总体变化趋势较为平缓,而60℃和80℃水热耦合养护下在强度出现最高峰后下降迅速。这是由于高温高湿加速混凝土内部水化反应,后期对强度的增强作用衰退,进一步叠加干湿循环侵蚀作用,导致温度越高性能下降越明显<sup>[13]</sup>,完成60 d水热耦合养护后,各组试件抗压强度均低于NC-20。

### 2.2 蠕变特性

#### 2.2.1 蠕变曲线

图2所示为混凝土在水热耦合养护60 d后的分级加载压缩蠕变曲线。

由图2可见,各试件应变的时程曲线均表现出阶梯状上升,在第1阶段应力加载瞬间应变曲线出现突变,产生瞬时变形;应力达到目标值并保持恒定时,应变时程曲线逐渐平稳,产生蠕变变形。当恒载应力值较低时,变形的主要组成部分为加载阶段的瞬时变形,稳压阶段应变曲线较为平缓,随着恒载应力逐级递增,稳压阶段试件的蠕变变形值随之增大,应变曲线斜率增大,表现为减速蠕变和等速蠕变。在最后一级加载作用下轴向应变突然增大并伴随蠕变破坏,表现为加速蠕变。因此,整体分级加载蠕变阶段可分为减速蠕变、等速蠕变和加速蠕变3阶段<sup>[14]</sup>,试验结果数据汇总见表4。

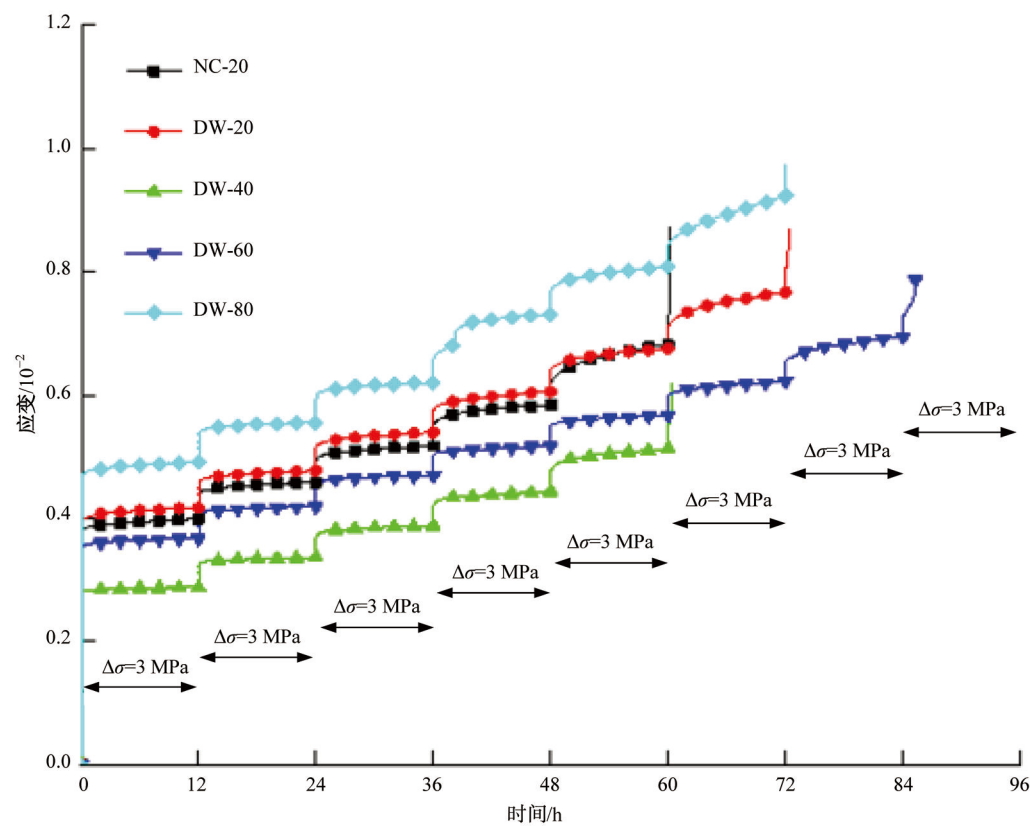


图 2 不同温度水热耦合养护后的蠕变应变时程曲线

Fig. 2 Creep-strain time curves after hydrothermal coupling curing at different temperatures

结合图 2 和表 4,混凝土经历不同温度水热耦合养护 60 d 后蠕变破坏保持在 5~7 阶段,其中 NC-20 和 DW-40 蠕变阶段最短,DW-60 蠕变阶段最长,蠕变时间较 NC-20 延长了 23.95 h。

由表 4 比较各组试件蠕变破坏应力与单轴峰值应力比,可见经过高温水热耦合养护后的混凝土蠕变性能要好于标准养护混凝土,其中 DW-60 试件蠕变强度较 NC-20 提高了 22.24%,有效提高了混凝土蠕变强度。这与混凝土经历水热耦合养护后单轴抗压强度降低的试验结果不一致,证明通过蠕变试验探究混凝土长期力学性能很有必要。经历 80 ℃水热耦合养护后,混凝土蠕变应变最大,且在第 4 阶段出现断裂,表明 DW-80 在第 4 阶段混凝土出现较大不可逆的损伤;而经历 40 ℃水热耦合养护后,混凝土蠕变应变最小,反映出 DW-40 混凝土内部较为密实,压缩形变小。

2.2.2 瞬时应变

图 3 为不同温度水热耦合养护 60 d 后的蠕变瞬时应变与应力关系图,由图可见,不同温度水热耦合养护混凝土在各级应力作用下所产生的瞬时变形随恒载应力基本呈线性增加。NC-20 和

表 4 不同温度水热耦合养护后混凝土蠕变试验结果数据

Table 4 Results of creep test of concrete after hydrothermal coupling curing at different temperatures

| 试件<br>编号 | 加载<br>级数 | 蠕变<br>总时长/h | 蠕变破坏<br>应力/MPa | 蠕变破坏应力/<br>单轴峰值应力 |
|----------|----------|-------------|----------------|-------------------|
| NC-20    | 5        | 60.07       | 27.52          | 0.64              |
| DW-20    | 6        | 72.29       | 30.59          | 0.88              |
| DW-40    | 5        | 60.44       | 27.52          | 0.77              |
| DW-60    | 7        | 84.02       | 33.64          | 0.92              |
| DW-80    | 6        | 72.03       | 30.57          | 0.99              |

DW-20 直线非常相近,反映出标准养护与 20 ℃水热耦合养护条件下混凝土蠕变瞬时应变变化规律相近,损伤程度相似;而 DW-40 和 DW-60 在初始阶段相较于 NC-20 应变分别降低了 26.2% 和 6.4%,而 DW-80 在初始阶段较 NC-20 在应变增加了 23.0%,随着应力增加,应变发展呈线性关系,这表明混凝土蠕变瞬时应变主要与温度相关,在水热耦合环境下干湿循环动态变化对混凝土瞬时应变影响较小。

对图 3 中各组数据进行拟合,获得瞬时应变与应力水平拟合公式,具体见表 5。由表 5 可见,

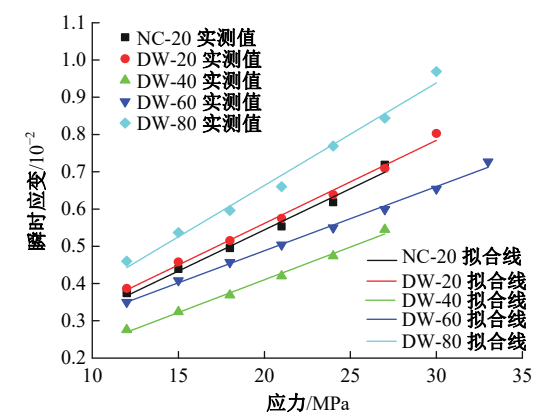


图3 不同温度水热耦合养护后的瞬时应变与应力水平关系  
Fig.3 Relationship between instantaneous strain and stress level after hydrothermal coupling curing at different temperatures

各组拟合公式 $R^2$ 均大于0.98,拟合度较高,拟合公式中斜率 $k$ 越大,则拟合直线越陡峭,说明应变随恒载应力增幅提高而产生的应变越大。

由图3和表5中结果可以发现, $k$ 随水热耦合温度升高先降低后增加,DW-60斜率最小,而DW-80斜率最大,且瞬时应变始终最大,说明水热耦合温度在60℃下增强了混凝土的蠕变性能,而超过60℃后混凝土蠕变性能开始明显下降,内部损伤速率加快,混凝土压缩应变上升速度加快。

表5 瞬时应变与应力拟合公式

Table 5 Fitting formula of instantaneous strain and stress

| 试件编号  | 拟合公式                   | 斜率 $k$  | 截距 $d$  | $R^2$ |
|-------|------------------------|---------|---------|-------|
| NC-20 | $y=0.022\ 1x+0.102\ 1$ | 0.022 1 | 0.102 1 | 0.99  |
| DW-20 | $y=0.022\ 3x+0.115\ 2$ | 0.022 3 | 0.115 2 | 0.99  |
| DW-40 | $y=0.017\ 6x+0.058\ 5$ | 0.017 6 | 0.058 5 | 0.99  |
| DW-60 | $y=0.017\ 2x+0.143\ 5$ | 0.017 2 | 0.143 5 | 1.00  |
| DW-80 | $y=0.027\ 6x+0.112\ 2$ | 0.027 6 | 0.112 2 | 1.00  |

2.2.3 蠕变应变

混凝土蠕变应变主要包括加载初期的瞬时应变和长时间恒载下的蠕变应变,因此,将混凝土试件各加载等级中产生的总应变减去各加载等级初期的瞬时应变,得出各加载等级下的蠕变应变,见图4。

由图4可得,各组试件在长时间恒载下蠕变应变变化规律类似。在低应力等级下蠕变应变曲线相近,呈现波动变化,各组试件在第1级恒载应力下蠕变应变变化较快,这是因为混凝土内部存在大量孔隙,加载开始阶段混凝土内部结构被压密,水泥基体与集料颗粒间相对滑移较大。随恒载应力不断递增,蠕变应变逐渐呈现非线性增长,尤其在临近破坏阶段,蠕变应变随时间迅速增大,试件随即发生蠕变破坏,相关研究也显示出类似的规律<sup>[15]</sup>。

具体地,在初始加载12 MPa阶段,DW-20和

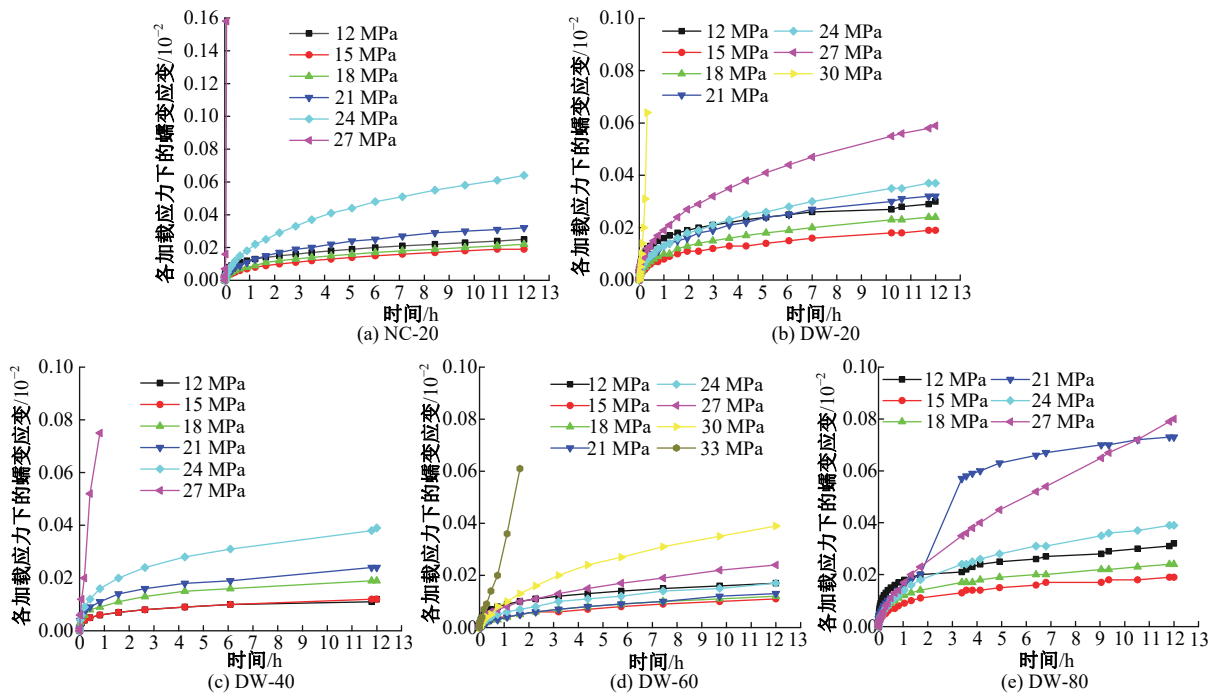


图4 不同温度水热耦合养护后的混凝土蠕变应变

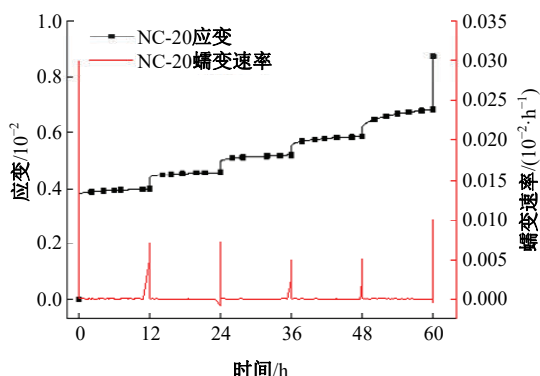
Fig.4 Creep strain of concrete after hydrothermal coupling curing at different temperatures

DW-80 蠕变应变分别较 NC-20 增加了 20% 和 28%, 而 DW-40 和 DW-60 蠕变应变分别较 NC-20 减少了 52% 和 32%, 说明 DW-40 和 DW-60 试件经过高温水热耦合养护, 内部结构密实, 低应力阶段压缩变形相接近, 压缩量随应力水平提升而增加。而随着水热耦合养护温度进一步升高, 试件蠕变性能下降, DW-80 在加载 21 MPa 阶段应变最大, 出现明显转折。结合试验现象可知, 在此阶段试件表面已经出现长大裂缝, 但却未完全破碎, 侧面反映出 DW-80 在分级加载下蠕变性能较弱、抵抗应力水平较低, 在 21 MPa 应力水平就有随时破坏的可能, 因此, 蠕变应变出现突变。

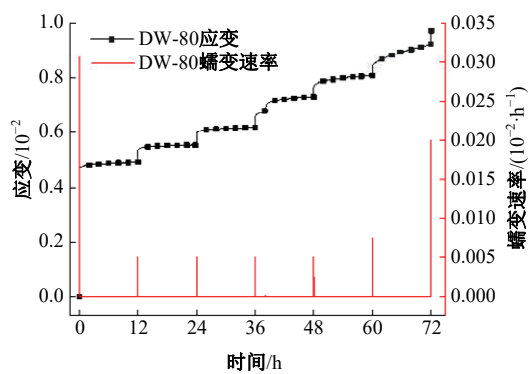
#### 2.2.4 蠕变速率

对图 2 所示混凝土蠕变时程曲线在各时间点处进行一阶求导, 获得蠕变速率曲线, 选取正常养护 NC-20 和水热耦合养护后蠕变加载应变最明显的 DW-80 进行分析, 如图 5 所示。

由图 5 对比 DW-20 和 DW-80 的蠕变速率, 加载第 1 阶段两组混凝土蠕变速率相接近, 而 DW-80 在第 2~第 5 阶段蠕变速率下降。两组试件蠕变速率均是在加载瞬间产生一个较高的应变



(a) NC-20



(b) DW-80

图 5 DW-20 和 DW-80 各应力水平下的蠕变速率

Fig. 5 Creep rate of DW-20 and DW-80 at each stress level

速率, 对应试件减速蠕变阶段产生的瞬时变形, 其后蠕变速率下降, 随着时间推移, 蠕变速率整体表现为波动性变化。瞬时应变速率随恒载应力增大呈递减趋势, 在最后加速蠕变阶段突增, 随后试件破碎。

为更加直观地描述混凝土稳定蠕变阶段速率的变化规律, 定义每级荷载下稳压阶段的稳态蠕变速率  $\epsilon'$  的计算式为<sup>[16]</sup>:

$$\epsilon' = \frac{\epsilon_{cr2} - \epsilon_{cr1}}{t_{cr2} - t_{cr1}} \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_{cr1}$ 、 $\epsilon_{cr2}$  分别为每级稳定阶段的起点和终点对应的蠕变量,  $10^{-2}$ ;  $t_{cr1}$ 、 $t_{cr2}$  分别为每级稳定蠕变阶段的起点和终点对应的时间, h。

根据式(1)计算各级恒载应力下试件的稳态蠕变速率, 如图 6 所示。

由图 6 可得, 不同温度水热耦合养护后试件在稳压阶段的稳态蠕变速率均随恒载应力增加呈现非线性变化, 在试验初期恒载应力较低时始终保持在一个较低值, 且整体波动幅度较小, 随恒载应力逐级递增, 稳态蠕变速率逐步增加。在最后一级恒载应力作用下, 稳态蠕变速率迅速激增, 通常预示着即将发生蠕变破坏。

在相同恒载应力水平下, NC-20、DW-20、DW-40、DW-60、DW-80 试件稳态蠕变速率变化范围分别为  $0.0016 \sim 0.0053$  ( $\times 10^{-2} \cdot h^{-1}$ )、 $0.0016 \sim 0.0049$  ( $\times 10^{-2} \cdot h^{-1}$ )、 $0.0010 \sim 0.0032$  ( $\times 10^{-2} \cdot h^{-1}$ )、 $0.0009 \sim 0.0033$  ( $\times 10^{-2} \cdot h^{-1}$ )、 $0.0015 \sim 0.0061$  ( $\times 10^{-2} \cdot h^{-1}$ ), 稳态蠕变速率反映了试件在长期荷载下变形的稳定性, 在相同养护龄期下, DW-80 的波动范围远大于 DW-40 和 DW-60。原因在于  $80^\circ\text{C}$  相较于  $40^\circ\text{C}$  和  $60^\circ\text{C}$  的水

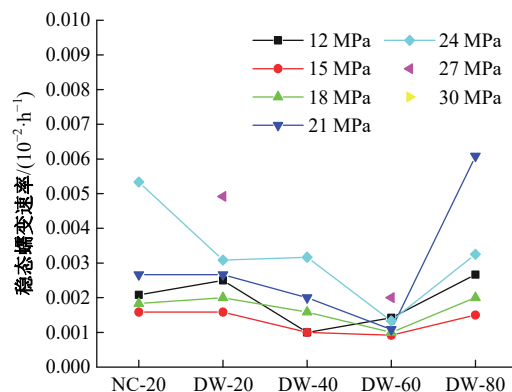


图 6 各组混凝土各应力水平稳态蠕变速率

Fig. 6 Steady state creep rate of concrete at each stress level

热耦合养护下混凝土内部水化结构疏松破坏,加强了混凝土破坏的脆性及突发性,稳态蠕变速率的波动较大。可见,随着养护龄期延长,超过 80 °C 水热耦合养护后混凝土内部结构疏松及孔隙结构贯通使其在高应力作用下更易发生不稳定变形。

### 2.2.5 蠕变比

在分级加载蠕变试验过程中,加载时试件产生瞬时应变,在应力保持恒定期间应变继续增加,即产生蠕变变形。为更好地理解不同加载时间对试件蠕变行为的影响,定义蠕变比  $\varphi$ ,即蠕变应变与总应变的比值<sup>[17]</sup>,表达式为:

$$\varphi = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_t} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\varphi$ 为蠕变比; $\epsilon_c$ 为蠕变应变, $10^{-2}$ ;  $\epsilon_t$ 为总应变, $10^{-2}$ 。

根据式(2),计算不同温度水热耦合养护后试件的蠕变比,见图 7。

由图 7 可得,不同温度水热耦合养护后混凝土的蠕变比随应力水平增加呈现出短暂下降-缓慢增长-急速增长的特征,曲线整体呈抛弧形。其中 DW-80 变化规律存在差异,这是由于试件在第 4 加载阶段出现较大破裂变形所致。

对比图 7 中各曲线可见,除 DW-80 外,经历水热耦合养护后各组混凝土蠕变比均小于 NC-20,证明适当温度的水热耦合养护可降低混凝土蠕变速率,增强蠕变性能。经过第 1 级恒载应力

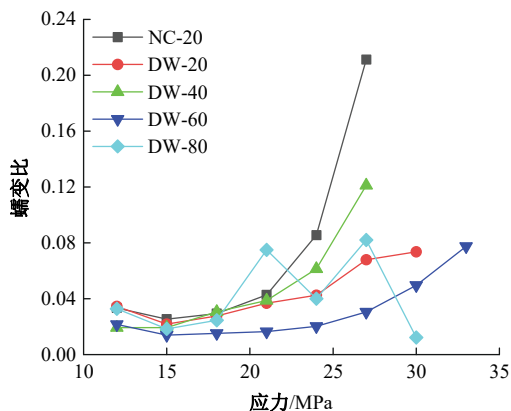


图 7 各组混凝土各应力水平蠕变比

Fig. 7 Creep ratio of concrete at each stress level

后,蠕变比有一定幅度下降,随着应力水平继续升高,蠕变比开始表现出波动变化,但曲线存在一个突变点,突变点之后,曲线急速上升,表明蠕变变形迅速发展,试件变形呈现不稳定性,预示试件即

将破坏,因此,称曲线突变点处恒载应力为蠕变破坏临界应力。

NC-20、DW-20、DW-40、DW-60、DW-80 蠕变临界应力分别为 21、24、24、27、21 MPa,由此可见,蠕变临界应力随养护温度升高呈先增大后减少。蠕变比曲线中拐点的后移使稳定阶段逐渐延长,但达到 80 °C 后混凝土长期稳定性开始急剧下降,产生较强的负面效应。

混凝土蠕变性能劣化规律结果表明:各组试件在 20~60 °C 水热耦合养护下蠕变性能逐渐提高,而至 80 °C 后性能急速下降。DW-60 较 NC-20,蠕变强度提高了 22.24%,蠕变时间延长了 23.95 h,瞬时应变和蠕变应变分别下降了 6.4% 和 32%。说明适当提高养护温度增加了混凝土内部结构的密实度,提高了长期负载能力,而超过 60 °C 后混凝土蠕变性能出现明显下降。

### 2.2.6 Burgers 蠕变模型

由试验数据可知,各组混凝土除最后一级应力水平外,其余各级蠕变曲线均由减速蠕变阶段-等速蠕变阶段组成,因此,选用 Burgers 模型来描述试件的蠕变特性,如图 8 所示。

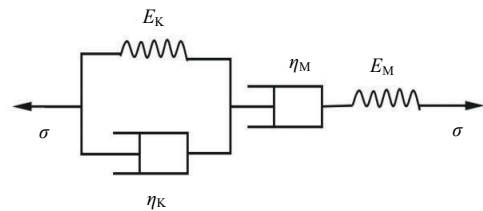


图 8 Burgers 模型

Fig. 8 Burgers model

确定蠕变参数,根据文献[18],单向压缩蠕变试验中受到轴向应力  $\sigma_1$  作用下的轴向变  $\epsilon_1(t)$  为:

$$\epsilon_1(t) = \frac{2\sigma_1}{9K} + \frac{\sigma_1}{3E_K} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_K}{\eta_K} t\right) \right] + \frac{\sigma_1}{3E_M} + \frac{\sigma_1}{3\eta_M} t \quad (3)$$

式中: $\sigma_1$ 为轴向应力,MPa; $K$ 为体积模量,MPa; $t$ 为蠕变时间,h; $E_M$ 、 $\eta_M$ 分别为 Maxwell 体弹性模量和黏度,MPa、GPa·h; $E_K$ 、 $\eta_K$ 分别为 Kelvin 体弹性模量和黏度,MPa、GPa·h。

当  $t=0$  时,曲线在纵轴上的截距为瞬时弹性应变  $\epsilon_e$ ,即

$$\epsilon_e = \left( \frac{2}{9K} + \frac{1}{3E_M} \right) \sigma_1 \quad (4)$$

当  $t$  足够大时,蠕变曲线近似为直线,在纵轴

上截距为  $\epsilon_a$ :

$$\epsilon_a = \left( \frac{2}{9K} + \frac{1}{3E_K} + \frac{1}{3E_M} \right) \sigma_1 \quad (5)$$

该直线的斜率为  $m_a$ , 即

$$m_a = \frac{\sigma_1}{3\eta_M} \quad (6)$$

由式(6)可确定参数  $\eta_M$ 。

由于荷载通常不能瞬间施加, 因此, 在实际应用时还采用以下方法求瞬时弹性应变  $\epsilon_e$ , 令:

$$q(t) = \frac{\sigma_1}{3E_K} \exp\left(-\frac{E_K}{\eta_K} t\right) \quad (7)$$

则  $q(t)$  为蠕变试验曲线与第 2 阶段蠕变曲线直线延长线的垂直距离。

对式(7)两边同时取对数, 得:

$$\ln(q) = \ln\left(\frac{\sigma_1}{3E_K}\right) - \frac{E_K}{\eta_K} t \quad (8)$$

由式(8)可得,  $\ln(q)$  与  $t$  的关系为一直线, 则该直线在纵轴截距为  $\epsilon_q$ , 斜率为  $m_q$ , 即

$$\epsilon_q = \ln\left(\frac{\sigma_1}{3E_K}\right) \quad (9)$$

$$m_q = -\frac{E_K}{\eta_K} \quad (10)$$

由式(9)(10)可确定  $E_K$  和  $\eta_K$ 。

体积模量  $K$  可根据轴向应变  $\epsilon_1$  来确定。

$$K = \frac{\sigma_1}{3(1-2\mu)\epsilon_1} \quad (11)$$

由式(12)可确定参数  $E_M$ :

$$E_M = \frac{\sigma_1}{3\left[\epsilon_a - \left(\frac{2}{9K} + \frac{1}{3E_K}\right)\sigma_1\right]} \quad (12)$$

选取试验中强度损伤明显、蠕变性能较低的 DW-80 试件为例进行分析, 求取蠕变参数。表 6 给出了不同应力水平下的 Burgers 模型参数, 其中  $\mu=0.2$ 。

将表 6 中的数据代入式(3), 得出各应力水平下的蠕变曲线方程, 绘制出蠕变试验实测值与 Burgers 蠕变模型曲线, 见图 9。由图 9 可见, 理论预测曲线与实测值拟合较好, 且大部分预测值小于实测值, 表明 Burgers 模型能较好地反映 80℃ 水热耦合养护后混凝土减速蠕变和等速蠕变特征, 且具有一定的安全储备。同时, 对 20、40、60℃ 水热耦合养护混凝土, 按照上述方法推导出不同参数的 Burgers 模型, 也能较好反映混凝土蠕

表 6 DW-80 混凝土各应力水平 Burgers 模型参数

Table 6 Burgers model parameters for DW-80 concrete at each stress level

| 等<br>级 | 应力/<br>MPa | $K/\text{GPa}$ | $E_K/\text{GPa}$ | $E_M/\text{GPa}$ | $\eta_K/(\text{GPa}\cdot\text{h})$ | $\eta_M/(\text{GPa}\cdot\text{h})$ |
|--------|------------|----------------|------------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1      | 12         | 20.83          | 17.62            | 0.90             | 75.98                              | 309.67                             |
| 2      | 15         | 46.30          | 31.84            | 0.96             | 162.28                             | 522.32                             |
| 3      | 18         | 41.67          | 30.95            | 1.04             | 145.68                             | 510.87                             |
| 4      | 21         | 15.98          | 9.26             | 1.21             | 31.69                              | 141.22                             |
| 5      | 24         | 34.19          | 21.80            | 1.09             | 106.66                             | 333.55                             |
| 6      | 27         | 18.75          | 11.19            | 1.21             | 75.77                              | 155.97                             |

变特征。

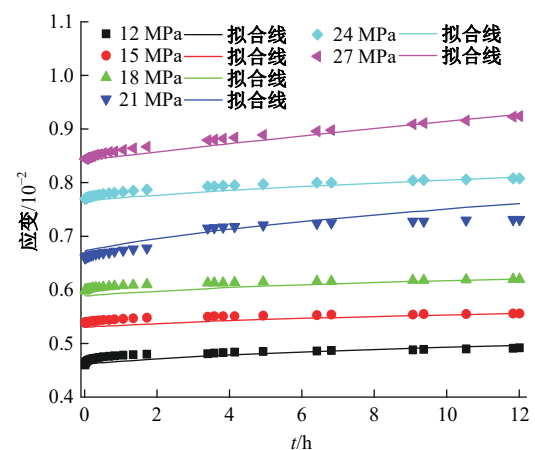


图 9 DW-80 各应力水平蠕变试验数据和 Burgers 模型曲线

Fig. 9 DW-80 creep measured value and prediction line at each stress level

### 2.3 水热耦合养护混凝土微观结构性能劣化

图 10 给出了 NC-20 和 DW-80 试件 60 d 养护期间的 SEM 微观形貌特征。

由图 10(a)(b) 可见, 早期初凝结束后混凝土中存在孔隙和裂缝, 边缘附近存在很多纤维状 C-S-H 凝胶和片状堆积的 CH, 提高了混凝土强度<sup>[19]</sup>。对比图 10(c)(d) 可见, 正常养护至 30 d 内部缝隙被水化产物填充, C-S-H 凝胶呈网络状分布, 大量 CH 沉淀物, 细长棒状的 AFt 也很明显; 养护至 60 d 后, 内部未见明显孔洞, 结构密实, 但出现裂缝, 水化产物相互堆积, 出现明显团状产物, 表现为内部孔隙率升高、强度增加。对比图 10(e)(f) 可见, 在 80℃ 水热耦合养护下, 30 d 时内部 C-S-H 形貌表现为辐射团状, 未见细长棒状的 AFt, 而是出现较多六角片状的 AFm; 60 d 后, 水化产物结构疏松, 有大量明显孔洞; 宏观表现为混凝土强度降低、表面孔洞增加、孔隙率增大。

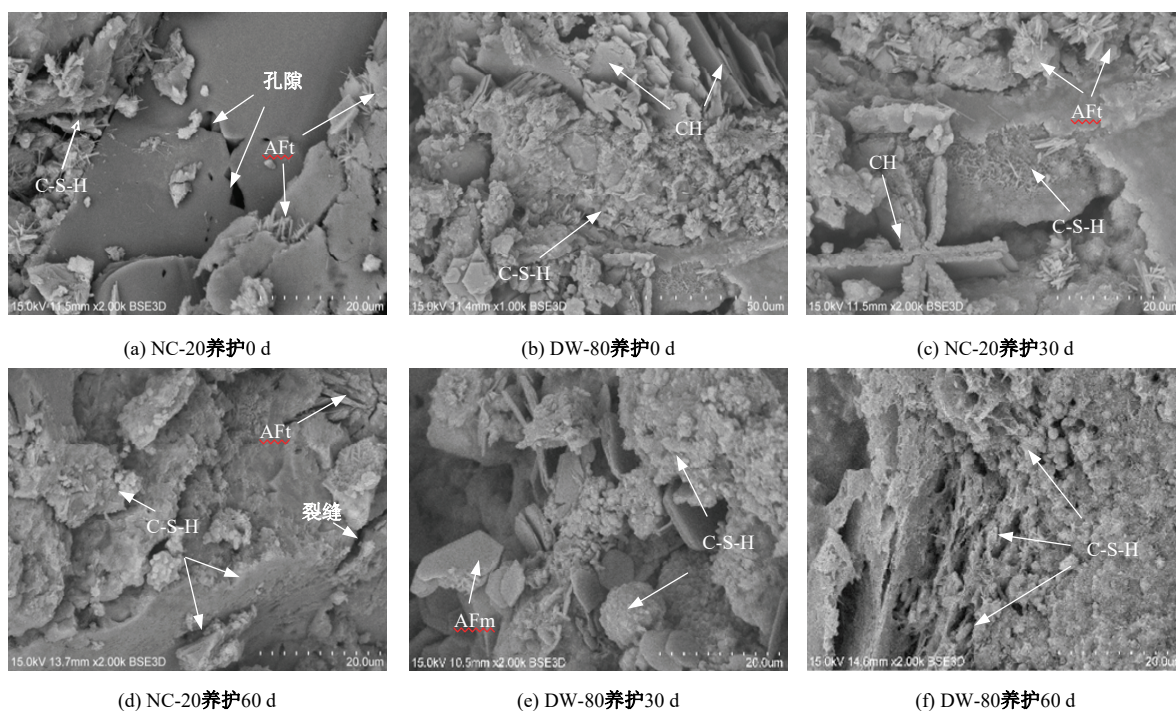


图 10 水热耦合养护后混凝土微观形貌

Fig. 10 Microscopic morphology of concrete after hydrothermal coupling curing

结合试件力学性能及表观形貌变化规律,总结水热耦合养护混凝土劣化机理如下:水泥水化是一个非常复杂,非均质的多相化学反应过程,通过水泥水化反应,使松散的水泥颗粒变成具有胶结性的水泥浆体,进而黏结各种不同粒径的骨料,形成混凝土水泥基体。因此,水泥水化反应生成晶体黏结强度越高,混凝土强度也越高。硅酸盐水泥熟料主要是由硅酸二钙  $C_2S$ 、硅酸三钙  $C_3S$ 、铝酸三钙  $C_3A$  和铝铁酸四钙  $C_4AF$  4 种矿物组成,含量最多的  $C_3S$  和  $C_2S$  水化生成 C-S-H 凝胶和 CH 填充孔隙<sup>[20]</sup>。此外,C-S-H 组成还与所处溶液 CH 浓度相关,在 CH 饱和溶液中强度更高,晶体更充分、形态会进一步改善,逐渐转变为网状的 C-S-H 凝胶(Ⅱ型)和 C-S-H 凝胶(Ⅲ型)<sup>[21]</sup>;在早期高温和 CH 溶液作用激发水化反应提前生成网状 C-S-H 凝胶,表现为早期表面结构致密,强度迅速增大。然而,相关文献表明<sup>[22]</sup>:当混凝土干燥至 30% 相对湿度时会失去大量吸附水,从而发生收缩;但当相对湿度低于 11% 时,C-S-H 开始分解。因此,干湿循环的干燥状态下,混凝土内部硅酸钙凝胶溶解,浸泡后又反应产生新硅酸钙凝胶;循环反复,水化产物不断堆积,形成上述中疏松多孔的网状结构,导致混凝土力学性能、相对动弹模下降,孔隙增大。

$C_3A$  在早期反应迅速、受温度影响大而生成水石榴石  $C_3AH_6$ ,由于水泥中掺入石膏  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ,而  $C_3AH_6$  与石膏反应生成三硫型水化硫铝酸钙 AFt,即钙矾石,填充混凝土内部孔隙,降低了有效孔隙率,提高了密实度、抗压强度和动弹性模量;另外,AFt 受温度影响较大,在高温条件下开始溶解,可进一步与石膏反应生成单硫型水化硫铝酸钙 AFm 和 CH,结晶性好,但强度低,这是造成混凝土脆性的主要原因<sup>[23]</sup>, $C_4AF$  反应与  $C_3A$  相似。

### 3 结 论

(1) 对比不同温度水热耦合养护 60 d 混凝土单轴抗压强度和蠕变特性,养护前期 20 d 时,各温度水热耦合养护混凝土性能明显高于正常养护,随着养护时间增加,混凝土性能逐渐降低,至养护 60 d 后均小于正常养护;而经历水热耦合养护 60 d 后各组混凝土蠕变强度均大于正常养护混凝土,说明蠕变试验对研究混凝土的长期性能非常必要。

(2) 基于蠕变曲线、瞬时应变、蠕变应变、蠕变速率、蠕变比的变化规律,表明经历 60 ℃ 以下水热耦合养护对混凝土产生积极效果,有效提高了蠕变强度,延长了蠕变时间,降低了瞬时应变和

蠕变应变,其中 DW-60(高温 60℃ 水热耦合养护)较 NC-20(常温 20℃ 养护)蠕变强度提高了 22.24%,蠕变时间延长了 23.95 h,瞬时应变和蠕变应变分别下降了 6.4% 和 32%;而达到 80℃ 水热耦合养护后,混凝土蠕变性能下降,水热耦合作用对混凝土蠕变性能产生负面效应。

(3)以 80℃ 水热耦合养护混凝土为例,采用 Burgers 模型结合实测值推导出适合水热耦合养护后的混凝土蠕变模型,结果表明:实测值与模型拟合公式结果相近,对掌握水热耦合养护混凝土蠕变力学性能劣化规律有积极意义。

(4)选取 NC-20 和 DW-80(高温 80℃ 水热耦合养护)试件进行微观分析,在养护早期,混凝土随温度升高水化产物生成速度加快,填充内部空隙,降低孔隙率;而在养护后期,混凝土长期处于反复水热耦合环境下,水化产物逐渐溶解,干湿侵蚀作用加剧,表面孔隙增多、出现裂缝、内部结构疏松,造成混凝土性能下降。

#### 参考文献:

- [1] 陈文化. 高温高湿环境下高铁隧道洞口段热湿病害分析[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(11): 102-105, 119.  
Chen Wen-hua. Analysis of railway tunnel portal section thermal-humidity failure in high temperature and high humidity[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(11): 102-105, 119.
- [2] 王影冲, 王鼎, 郝圣旺. 混凝土蠕变与应力松弛耦合破坏及临界幂律行为[J]. 工程力学, 2016, 33(增刊 1): 49-55.  
Wang Ying-chong, Wang Ding, Hao Sheng-wang. Creep-stress relaxation coupling failure in concrete and its critical power-law behavior[J]. Engineering Mechanics, 2016 33(Sup. 1): 49-55.
- [3] Gong J, Cao J, Wang Y F. Effects of sulfate attack and dry-wet circulation on creep of fly-ash slag concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 125: 12-20.
- [4] Su L, Wang Y F, Mei S Q, et al. Experimental investigation on the fundamental behavior of concrete creep[J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 250-258.
- [5] 辛亚军, 安定超, 郝海春. 高应力水平区混凝土试件蠕变特性及失稳机制[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(2): 382-390.  
Xin Ya-jun, An Ding-chao, Hao Hai-chun. Creep characteristics and instability mechanism of concrete specimen in high-stress area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(2): 382-390.
- [6] Zhao Q X, Liu X C, Jiang J Y. Effect of curing temperature on creep behavior of fly ash concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 326-333.
- [7] 李想, 刘传孝, 孟琪, 等. 不同温度下混凝土材料的短时蠕变特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(2): 82-86.  
Li Xiang, Liu Chuan-xiao, Meng Qi, et al. Study on short-term creep characteristics of concrete materials at different temperatures[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(2): 82-86.
- [8] 刘雨珊, 庞建勇, 姚韦靖. 页岩陶粒轻骨料混凝土高温后蠕变特性[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 1096-1104.  
Liu Yu-shan, Pang Jian-yong, Yao Wei-jing. Creep behavior of shale ceramsite lightweight aggregate concrete exposed to high temperature[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5): 1096-1104.
- [9] 郭平业, 卜墨华, 张鹏, 等. 高地温隧道灾变机制与灾害防控研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(7): 1561-1581.  
Guo Ping-ye, Bu Mo-hua, Zhang Peng, et al. Review on catastrophe mechanism and disaster countermeasure of high geotemperature tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(7): 1561-1581.
- [10] 傅金阳, 徐光阳, 杨曾, 等. 高地温隧道衬砌混凝土早期开裂机理及防控措施[J]. 铁道学报, 2022, 44(3): 105-114.  
Fu Jin-yang, Xu Guang-yang, Yang Zeng, et al. Early cracking mechanism and prevention measures for lining concrete in high geotemperature tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(3): 105-114.
- [11] JGJ 55—2011. 普通混凝土配合比设计规程[S].
- [12] GB/T 50082—2009. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].
- [13] 邵化建, 李宗利, 肖帅鹏, 等. 干湿循环作用下混凝土力学性能及微观结构研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(9): 2948-2955.  
Shao Hua-jian, Li Zong-li, Xiao Shuai-peng, et al. Mechanical properties and microstructure of concrete under drying-wetting cycles[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(9): 2948-2955.
- [14] 周瑞鹤, 程桦, 蔡海兵, 等. 三轴压缩分级卸荷条件下粉砂岩蠕变特性及蠕变模型[J]. 岩石力学与工程

- 学报, 2022, 41(6): 1136-1147.
- Zhou Rui-he, Cheng Hua, Cai Hai-bing, et al. Creep characteristics and creep model of siltstone under triaxial compression and graded unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1136-1147.
- [15] 张俊文, 霍英昊. 深部砂岩分级增量加卸载蠕变特性[J]. 煤炭学报, 2021, 46(增刊2): 661-669.
- Zhang Jun-wen, Huo Ying-hao. Creep behavior of deep sandstones under stepwise incremental loading and unloading conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(Sup. 2): 661-669.
- [16] Vidal T, Sellier A, Ladaoui W, et al. Effect of temperature on the basic creep of high-performance concretes heated between 20 and 80 °C[J]. Journal of Materials in Civil Engineering Archive, 2015, 27(7): No. B4014002.
- [17] 马芹永, 郁培阳, 袁璞. 干湿循环对深部粉砂岩蠕变特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 593-600.
- Ma Qin-yong, Yu Pei-yang, Yuan Pu. Experimental study on creep properties of deep siltstone under cyclic wetting and drying[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 593-600.
- [18] 湛文武, 原鹏博, 刘小伟. 分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1): 3076-3081.
- Chen Wen-wu, Yuan Peng-bo, Liu Xiao-wei. Study on creep properties of red-bed soft rock under step load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup. 1): 3076-3081.
- [19] 于本田, 刘通, 王焕, 等. 花岗斑岩石粉含量对混凝土性能及微观结构的影响[J]. 吉林大学学报:工学版, 2022, 52(5): 1052-1062.
- Yu Ben-tian, Liu Tong, Wang Huan, et al. Influence of granite porphyry stone powder content on properties and microstructure of concrete[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(5): 1052-1062.
- [20] Xu Y D, He T S, Ma X D, et al. The influence of calcium sulphoaluminate cement on the hydration process of cement paste mixed with alkali free liquid accelerator[J]. Materials Today Communications, 2022, 33: No. 104622.
- [21] Cui S A, Liu P, Su J, et al. Experimental study on mechanical and microstructural properties of cement-based paste for shotcrete use in high-temperature geothermal environment[J]. Construction and Building Materials, 2018, 174: 603-612.
- [22] 关博文, 邸文锦, 王发平, 等. 干湿循环与交变荷载作用下混凝土硫酸盐侵蚀损伤[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(4): 1112-1121.
- Guan Bo-wen, Di Wen-jin, Wang Fa-ping, et al. Damage of concrete subjected to sulfate corrosion under dry-wet cycles and alternating loads[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023, 53(4): 1112-1121.
- [23] 钱觉时, 余金城, 孙化强, 等. 钙矾石的形成与作用[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(11): 1569-1581.
- Qian Jue-shi, Yu Jin-cheng, Sun Hua-qiang, et al. Formation and function of ettringite in cement hydrates[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(11): 1569-1581.