

文章编号:1007-9629(2026)01-0059-08

正温温度循环对混凝土力学性能及微观结构的影响

李沐洋¹, 董芸^{1,*}, 张璐², 张振山²

(1. 长江水利委员会长江科学院 材料与结构研究所, 湖北 武汉 430010;

2. 安徽省引江济淮集团有限公司 工程质量部, 安徽 合肥 230000)

摘要: 在 40~90、40~200 °C 正温温度循环条件下, 研究了温度循环对 C45、C60、C90 混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度、吸水率及孔隙结构的影响, 揭示了温度循环对混凝土力学性能和微观结构的影响机理。结果表明: 40~90 °C 温度循环使混凝土的水化进程加速, 力学性能明显增强, 90 次温度循环后 C45 混凝土的抗压强度较初始值提升了 41.5%; 40~200 °C 温度循环使混凝土部分水化产物的数量减少, 抗压强度随着循环次数的增加先提高后降低; 由于较低的水化程度以及疏松的内部结构, 40~200 °C 温度循环对低强度等级混凝土力学性能的影响更加明显; 随着 40~200 °C 温度循环次数的增加, 混凝土的结构变得疏松, 内部孔隙数量增多, 有害孔和多害孔的占比增大。

关键词: 自密实混凝土; 温度循环; 力学性能; 孔结构; 微观机理

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2026.01.006

Influence of Positive Temperature Cycling on Mechanical Properties and Microstructure of Concrete

LI MUYANG¹, DONNG YUN^{1,*}, ZHANG LU², ZHANG ZHENSHAN²

(1. Material and Structure Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. Engineering Quality Management Department, Anhui Yangtze River to Huaihe River Diversion Group Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: The effects of thermal cycling on the compressive strength, splitting tensile strength, water absorption and pore structure of C45, C60 and C90 concrete under 40–90 °C and 40–200 °C were investigated. The mechanisms by which thermal cycling affects the mechanical properties and microstructure of concrete were elucidated. The results demonstrate that under 40–90 °C thermal cycling, the hydration process of concrete is accelerated, leading to a significant enhancement in mechanical properties. After 90 cycles, the compressive strength of C45 concrete increases by up to 41.5%. Under 40–200 °C thermal cycling, the quantity of certain hydration products decreases, and the strength initially improves but then declines with increasing cycles. Due to lower hydration degrees and a more porous internal structure, the mechanical property of low-strength-grade concrete is more significantly affected by thermal cycling. As the number of thermal cycles increases, the concrete structure becomes looser, the number of internal pores rises, and the proportion of harmful and multi-harmful pores within the pore structure increases.

Key words: self-compacting concrete; thermal cycling; mechanical property; pore structure; microscopic mechanism

收稿日期: 2025-03-17; 修订日期: 2025-04-18

基金项目: 安徽省引江济淮集团有限公司科技资助项目(YJHH-ZT-ZX-20210408381)

第一作者: 李沐洋(2000—), 男, 江苏宿迁人, 长江水利委员会长江科学院硕士生。E-mail: 115951065915@163.com

通讯作者: 董芸(1975—), 女, 上海人, 长江水利委员会长江科学院教授级高级工程师, 博士生导师, 博士。E-mail: dongyun@mail.crsri.cn

压缩空气储能技术(CAES)作为一种新兴的高效能措施,具有大容量、高功率、高稳定性的特点,被认为是一种极具潜力的大规模储能技术^[1]。CAES内衬储气库通常由密封层、衬砌层及围岩组成。其中:密封层采用钢衬密封高压空气,衬砌混凝土与围岩主要负担压缩空气荷载,这对衬砌混凝土的强度提出了很高的要求。在储气库的服役过程中,每30 a将经历10 000次以上充放气过程,期间高压空气储气库的密封-衬砌-围岩结构将不断承受循环膨胀荷载以及较大温度区间温度变化的作用^[2-4]。

目前,对压气储能衬砌层的研究多采用商用软件进行数值模拟^[5-7]。在对储气库压力以及热应力解析的理论推导和数值模拟中,通常将混凝土衬砌层性能进行简化^[8-10]。实际上,在压气储能电站放气、充气以及储气的过程中,储气库内有很大的压力及温度变化^[11-12]。同时,由于不同位置的充放气速率不同,储气库内的局部温度也有很大不同,局部温度可达200℃^[13]。

混凝土是一种脆性材料,温度和压力的周期性变化会对其力学性能及结构产生显著影响^[14]。针对储气库衬砌层混凝土在温度和压力循环工况下性能变化的试验研究较少。为此,本文采用室内模拟试

验方法,研究了C45、C60、C90衬砌层自密实混凝土在40~90、40~200℃范围内经历不同次数温度循环作用下力学性能与微观结构的变化,以期较为全面地展示温度循环对储气库衬砌混凝土性能的影响。试验测试了各试样在不同温度条件下的抗压强度、劈裂抗拉强度、质量损失率及吸水率,并对其水泥净浆孔隙率、孔径分布、最可几孔径及微观形貌进行分析。研究旨在揭示温度循环对不同强度等级衬砌层自密实混凝土力学性能和微观结构的影响规律及其作用机制,为其应用提供理论依据和技术参考。

1 试验

1.1 试验材料

胶凝材料选用池州海螺牌P·O 42.5水泥(C)、盘南F类I级粉煤灰(FA)和埃肯940硅灰(SF);细骨料为细度模数2.68的天然砂(S),表观密度为2 620 kg/m³;粗骨料为5~10 mm级花岗岩人工砂石骨料(A);减水剂选用减水率(质量分数,文中涉及的减水率、水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比)为26.9%的江苏博特PCA-I型聚羧酸高性能减水剂(AC);拌和水采用自来水(W)。各原材料的性能参数见表1~4。

表1 水泥的物理性能

Table 1 Physical properties of cement

Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)	Density/(g·cm ⁻³)	Standard consistency/%	Soundness	Setting time/min		Flexural strength/MPa			Compressive strength/MPa		
				Initial	Final	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
309	3.43	25.6	Qualified	163	207	5.8	7.4	8.9	26.7	36.9	47.8

表2 水泥的化学组成

Table 2 Chemical composition (by mass) of cement

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	R ₂ O
60.56	20.73	3.86	5.00	3.43	2.45	0.60

Unit: %

表3 粉煤灰的性能

Table 3 Properties of fly ash

Fineness/%	Density/(g·cm ⁻³)	Water demand ratio (by mass)/%	w(IL)/%	w(SO ₃)/%	Activity index/%
7.9	2.4	93	2.92	0.58	72.7

表4 硅灰的性能

Table 4 Properties of silica fume

45 μm sieve residue (by mass)/%	Bulk density/(kg·m ⁻³)	Moisture content (by mass)/%	w(IL)/%	w(SO ₂)/%
0.8	327	0.4	0.6	94.0

1.2 配合比

混凝土的配合比如表5所示。其中:体积水粉比为1.0,砂率为53%,粉煤灰掺量为10%~20%,硅粉

掺量为0%~10%。

1.3 试验方法

混凝土拌和、成型和养护参照DL/T 5720—

表5 混凝土的配合比
Table 5 Mix proportions of concretes

No.	Unit: kg/m ³						
	W	C	FA	SF	S	A	AC
C45	185	389	97	0	912	810	3.65
C60	185	463	116	0	912	810	4.34
C90	185	673	84	84	912	810	7.15

2015《水工自密实混凝土技术规程》的有关方法进行。试件选用尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体。将标准养护28 d后的混凝土试件放入烘箱中加热至目标温度并保持10 h,后降温至40℃并保持10 h为经历1次温度循环。图1(a)为烘箱实测升

降温模式,图1(b)为温度循环过程,1次温度循环为24 h。本试验共设置了2个目标温度,分别为90、200℃。设置了4个循环次数(N),分别为0、1、30、90次。各组别混凝土在经历温度循环后参照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》的有关方法开展吸水率、质量损失、抗压强度以及劈裂抗拉强度试验。

微观试件尺寸为40 mm×40 mm×160 mm,水养护28 d后取芯,放入烘箱中与混凝土试件共同经受温度循环。采用压汞法(MIP)测试试件的孔隙率和孔径分布。采用日本电子株式会社JSM—51610LV型扫描电镜(SEM)观测试件的微观形貌。

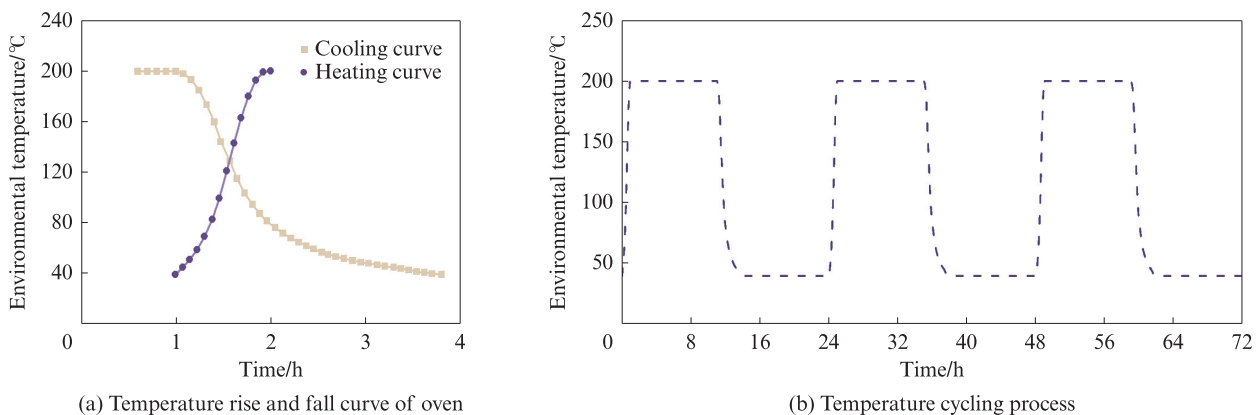


图1 温度循环模式

Fig. 1 Temperature cycling mode

2 结果及分析

2.1 温度循环对混凝土力学性能的影响

2.1.1 温度循环对混凝土抗压强度的影响

表6、7为循环温度对混凝土抗压强度的影响。由表6、7可见:

(1)当循环温度为40~90℃时,各组混凝土的抗压强度均有提升,且增量明显大于标准养护。相较于初始值,C45、C60、C90混凝土初次循环后的抗压强度分别提高了13.1%、9.1%、4.6%,30次循环后分别提高了34.2%、22.7%、13.9%,90次循环时分别提高了41.5%、26.5%、19.8%。数据表明,强度等级越低混凝土的抗压强度提升越明显。原因在于低强度等级混凝土吸附水及毛细孔水的含量较高,且结构疏松,抗压强度受温度循环的影响较大。

(2)当循环温度为40~200℃时,初次循环后各组混凝土的抗压强度提升明显,C45、C60、C90混凝土的抗压强度较初始值分别提高了26.0%、18.5%、9.0%。随着循环次数的增多,各组混凝土的抗压强度呈下降趋势。C45、C60、C90混凝土的抗压强度在

30次循环后分别下降至56.4、68.7、101.4 MPa,90次循环后进一步降至48.9、62.6、97.6 MPa,远低于同时期标准养护试件。试验结果表明,高温循环下混凝土的力学性能下降,其中高强度等级混凝土在该循环温度下表现出较好的力学性能稳定性。

表6 40~90℃温度循环下混凝土的抗压强度
Table 6 Compressive strength of concrete under cyclic temperature of 40~90℃

No.	N/times	Compressive strength/MPa
C45	0	49.6
	1	56.0
	30	66.6
	90	70.1
C60	0	61.7
	1	67.3
	30	75.7
	90	78.0
C90	0	94.1
	1	98.4
	30	107.2
	90	113.0

表7 40~200℃温度循环下混凝土的抗压强度
Table 7 Compressive strength of concrete under cyclic temperature of 40~200℃

No.	N/times	Compressive strength/MPa
C45	0	49.6
	1	62.5
	30	56.4
	90	48.9
C60	0	61.7
	1	73.1
	30	68.7
	90	62.6
C90	0	94.1
	1	102.6
	30	101.4
	90	97.6

2.1.2 温度循环对混凝土劈裂抗拉强度的影响

图2为温度循环对混凝土劈裂抗拉强度的影响。由图2可见:

(1)当循环温度为40~90℃时,混凝土的劈裂抗拉强度整体呈上升趋势。相较于初始值,C45、C60、C90混凝土初次循环后的劈裂抗拉强度分别提高了

5.4%、7.2%、2.1%,30次循环后分别提高了9.6%、13.1%、5.1%,90次循环后分别提高了13.3%、15.5%、8.1%。

(2)当循环温度为40~200℃时,混凝土的劈裂抗拉强度表现出阶段性变化,随着温度循环的进行先增加后降低。相较于初始值,C45、C60、C90混凝土的劈裂抗拉强度分别提高2.5%、0.7%和1.3%。30次循环后,C45和C60混凝土的劈裂抗拉强度较初始值分别下降0.4%和0.7%,C90混凝土的劈裂抗拉强度仍保持增长,提高3.1%。90次循环后,各组混凝土的劈裂抗拉强度均出现下降,C45、C60、C90混凝土的劈裂抗拉强度较初始值分别下降10.4%、7.3%和0.2%。

(3)温度循环下混凝土劈裂抗压强度与抗压强度的变化规律类似,受影响程度较抗压强度小。40~90℃温度循环促进了劈裂抗拉强度的增长,而在40~200℃温度循环下,初期劈裂抗拉强度略有提高,随着循环次数的增加,C45和C60混凝土的劈裂抗拉强度下降,90次循环后衰减明显。C90混凝土的劈裂抗拉强度在90次循环后仍接近初始值,表现出较好的耐高温能力。

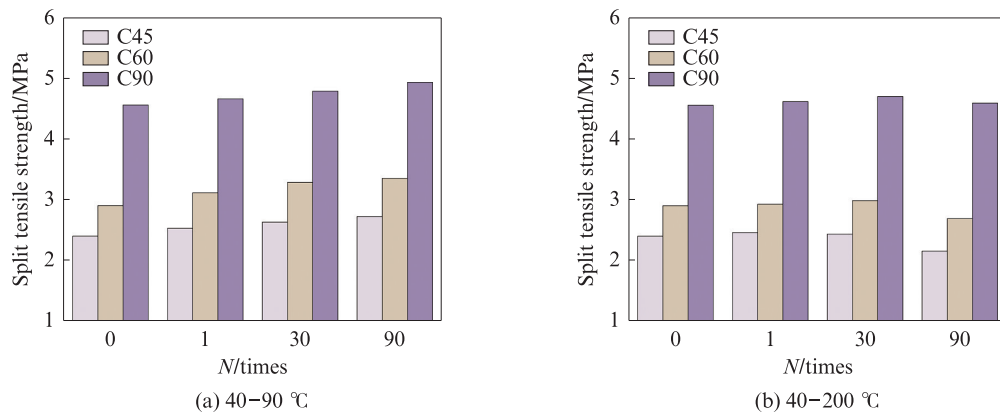


图2 温度循环对混凝土劈裂抗拉强度的影响

Fig. 2 Effect of cyclic temperature on splitting tensile strength of concrete

2.2 温度循环对混凝土吸水率与质量的影响

图3为温度循环对混凝土吸水率和质量的影响。由图3可见:

(1)初始状态下,C45、C60、C90混凝土的吸水率分别为0.9%、0.6%和0.3%。随着温度循环次数的增加,混凝土内部的孔隙水蒸发,微观结构逐步演变,吸水率上升。混凝土在2种温度循环下的吸水率表现出类似的变化趋势,低温循环对混凝土吸水率的影响较小。40~200℃初次循环后,C45、C60、C90混凝土的吸水率分别增至4.2%、3.7%和2.8%,其中高强混凝土(C90)因水胶比较低,早期水化反应充

分,孔隙水蒸发扩散量较少,因此早期受温度循环影响较小,吸水率增幅最小。在30次循环后,C45、C60、C90混凝土的吸水率分别达到5.0%、5.2%和5.1%,在温度循环的持续作用下,混凝土的孔隙结构发生较大变化,吸水能力进一步增强。至90次循环,C45、C60、C90混凝土的吸水率进一步增至5.5%、5.6%和5.7%,但增幅较前期有所放缓,说明孔隙水蒸发趋于稳定,孔结构的变化逐步减弱。在40~200℃温度循环条件下,各组混凝土吸水率的增长趋势在30次循环后放缓,高温循环仍然对混凝土孔结构产生持续影响,但整体结构趋于稳定。

(2)混凝土在温度循环过程中的质量减少主要是由于内部水分的逸出与扩散^[15]。各对照组在第1个循环时的质量下降最快,随着循环次数的增加,质量下降速率放缓,并在30次循环后趋于稳定。其中,40~200℃温度循环下混凝土的质量减少较40~

90℃温度循环下大,低强度等级混凝土的质量减少较高强度等级混凝土的大。C45混凝土在40~200℃初次温度循环后质量下降3.3%,90次循环后下降4.6%,在40~90℃初次温度循环后质量下降1.6%,90次循环后下降2.3%。

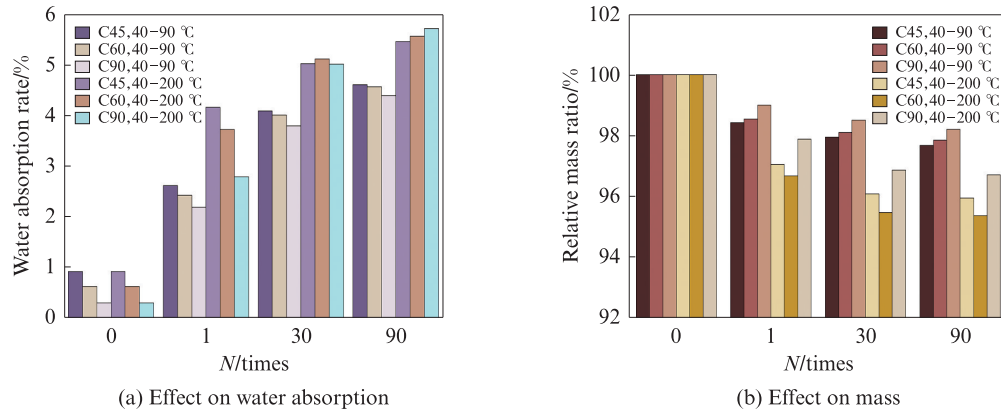


图3 温度循环对混凝土吸水率和质量的影响
Fig. 3 Effect of cyclic temperature on water absorption and mass of concrete

2.3 温度循环对混凝土微观结构的影响

2.3.1 温度循环后混凝土的孔结构

复合胶凝材料硬化浆体是典型的多孔材料,其孔隙率、孔径(d)分布等孔结构特征决定着混凝土基体的强度,对混凝土的宏观性能有明显的影 响。吴中伟^[16]根据不同孔径对水泥基材料性能的影响,依据孔径大小将水泥基材料中的孔隙分为无害孔($d < 20$ nm)、少害孔($20 \text{ nm} \leq d < 50$ nm)、有害孔($50 \text{ nm} \leq d < 200$ nm)、多害孔($d \geq 200$ nm)。

在升温过程中,混凝土的吸附水和孔隙水随着温度的升高扩散蒸发,80℃以下整体结构仍趋于稳定^[17]。加热至80℃时,钙矾石(Aft)开始脱水,130~160℃时脱水最多,至200℃时,基本完全脱水^[18]。同时,由于混凝土浆体和骨料热膨胀系数的不同^[19],随

着温度循环次数的增加,在不断膨胀收缩的过程中界面过渡区变得松散^[20],孔结构破坏。在温度高于100℃时,部分水蒸气将通过孔隙进一步逸出。在降温过程中,水分重新凝结,但部分孔隙无法闭合形成贯通损伤通道,这都进一步导致混凝土孔结构发生改变。

图4、5为循环次数对C45混凝土孔结构的影响。由图4、5可见:

(1)在40~90℃温度循环下,随着循环次数的增加,混凝土的孔隙率和最可几孔径均有不同程度的增大。当循环次数为0、1、30次时,C45混凝土的孔隙率分别为12.6%、18.2%、20.3%。其中,第1次循环后混凝土孔结构的变化最明显,孔隙率提高了44.4%,最可几孔径由32 nm增大到106 nm。

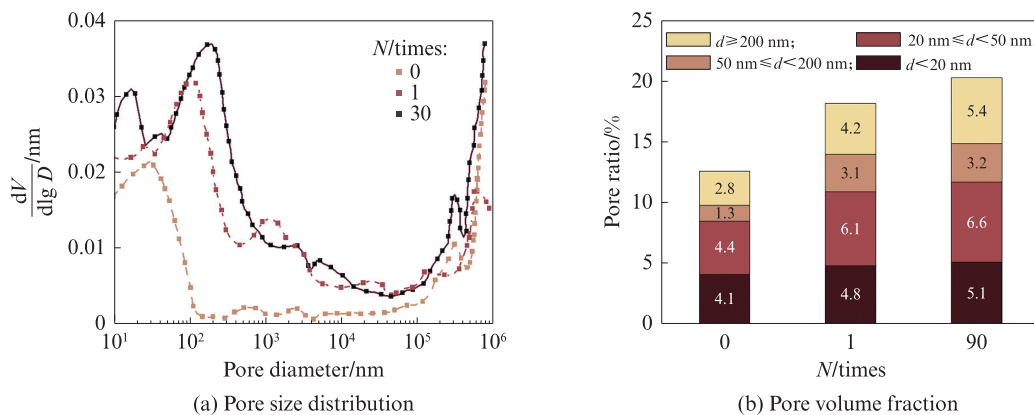


图4 40~90℃温度循环对C45混凝土孔结构的影响
Fig. 4 Effect of 40~90℃ cyclic temperature on pore structure of C45 concrete

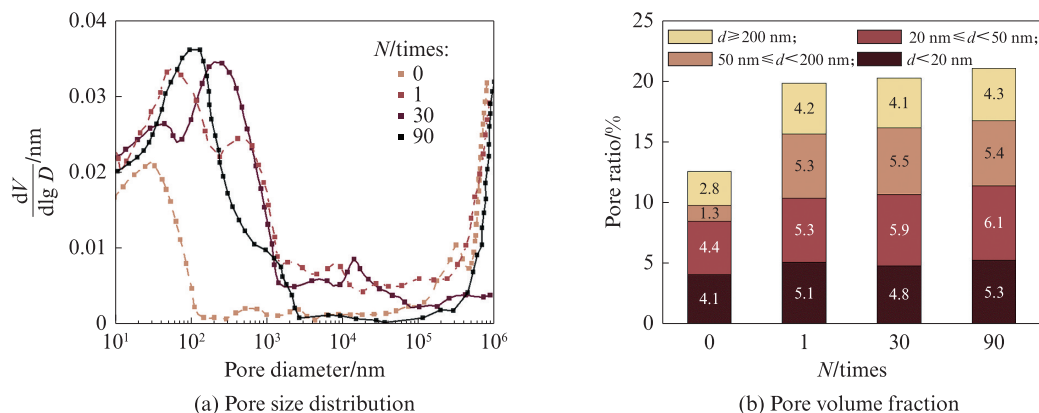


图5 40~200 °C温度循环对C45混凝土孔结构的影响
Fig. 5 Effect of 40~200 °C cyclic temperature on pore structure of C45 concrete

(2)当循环次数为1、30、90次时,C45混凝土的孔隙率分别为19.9%、20.3%、21.1%。其中,第1次循环后混凝土孔结构的变化最明显,孔隙率提高了57.9%,最可几孔径由32 nm增大到112 nm。在30次循环时,40~90 °C和40~200 °C温度循环C45混凝土的孔隙率没有明显差异,但是在40~200 °C温度循环工况下试件的有害孔和多害孔明显增多,该结果

证明40~200 °C温度循环对混凝土内部结构产生了更大的影响。

2.3.2 温度循环后混凝土的微观结构

图6为温度循环下C45混凝土的SEM图像。混凝土微观结构的变化趋势与吸水率和质量损失的试验结果一致,并进一步解释了混凝土在温度循环下的强度变化。

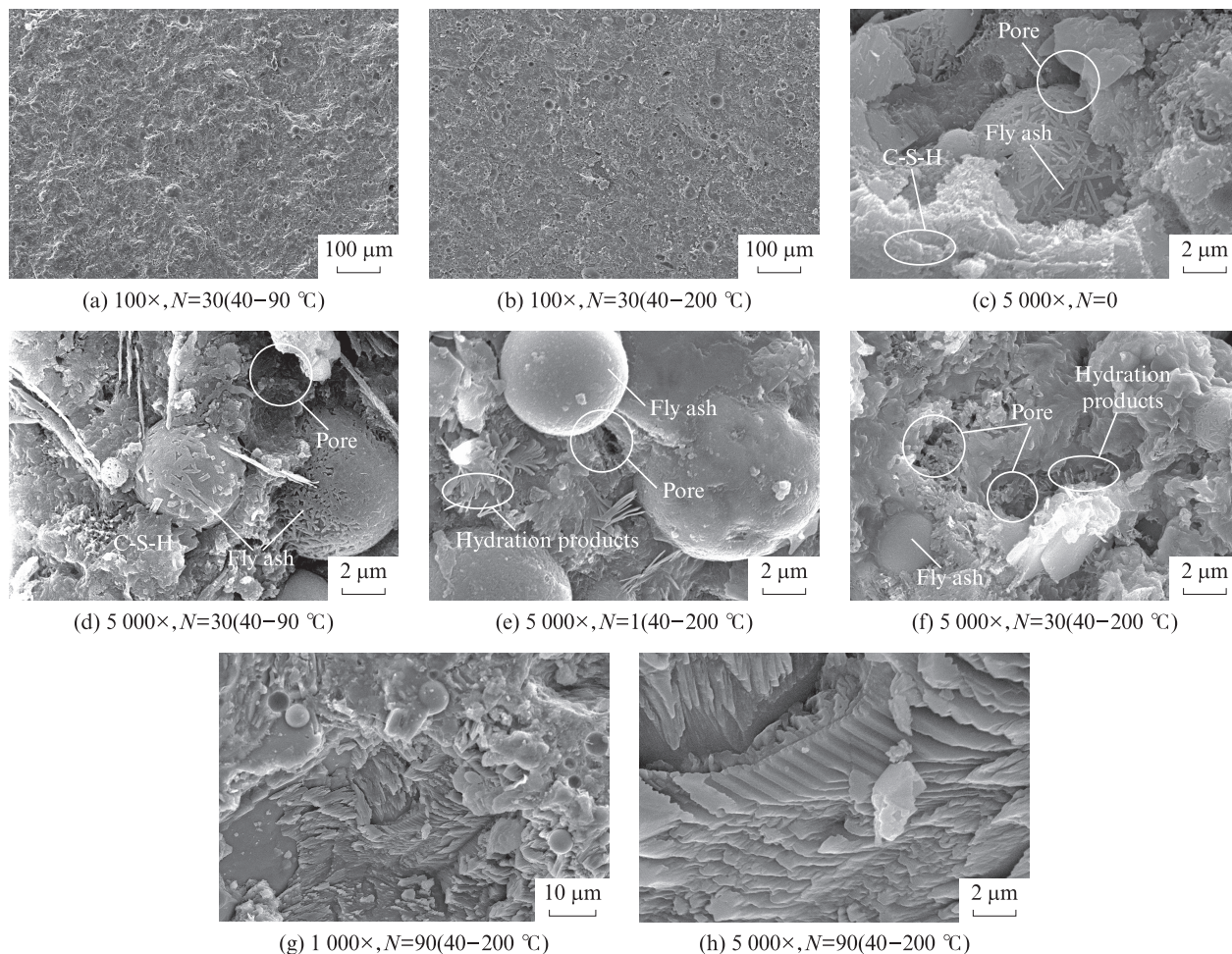


图6 温度循环下C45混凝土的SEM图像
Fig. 6 SEM images of C45 concrete under temperature cycle

由图6(c)可见,混凝土试件在标准养护28 d后,粉煤灰表面已附着水化产物,微观结构致密,孔隙数量较少,水泥基体的水化程度较高,形成了较好的胶凝结构。

由图6(d)可见,在40~90℃温度循环30次后,粉煤灰表面密布水化产物,但孔隙数量有所增加。表明温度循环促进了水泥-粉煤灰体系水化反应的进一步进行。同时,温度变化导致混凝土内部的蒸汽压力释放,加之各组分膨胀系数的差异,在多次受热循环作用下,试件内部微裂缝不断扩张,导致孔隙增多^[21]。

相比之下,在40~200℃温度循环条件下,混凝土的微观结构变化明显更大。由图5(e)~(h)可见,在高温循环作用下,试件的水化产物减少,特别是AFt和水化硅酸钙(C-S-H)凝胶等水化产物在此温度范围内开始脱水分解^[22],基体的胶凝能力下降。

对比图6(a)、(b)可以看出,在低放大倍数下,40~90℃与40~200℃温度循环下试件的微观形貌存在差异,40~200℃温度循环后的试件水化产物变得疏松,表明高温循环加剧了混凝土内部的微裂缝扩展和孔结构劣化。

3 结论

(1)当循环温度为40~90℃时,混凝土的抗压强度较标准养护有所提高。当循环温度为40~200℃时,初次循环后混凝土的强度提高明显,随着循环次数的增加,抗压强度呈下降趋势。温度循环下混凝土劈裂抗拉强度的变化规律与抗压强度类似。在40~200℃温度循环下强度等级低混凝土的力学性能较强度等级高混凝土的变化更明显。

(2)在40~200℃温度循环过程中,混凝土结构变得疏松,内部孔隙数量增多,孔径为50~200 nm孔和大于200 nm孔的占比增大。

(3)温度循环加速了混凝土的水化进程,也使得材料内部部分水分逸出。40~200℃温度循环下混凝土内部部分水化产物分解。同时,由于水泥基材料各组分的热膨胀系数不同,在40~200℃温度循环的过程中不断引入新的裂缝,扩张旧的裂缝,从而影响了混凝土的力学性能。

参考文献:

[1] 王者超,李嘉祥,郝薛将,等. 压气储能地下内衬洞室建设中若干关键问题研究进展[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(1):1-13.
WANG Zhechao, LI Jiaxiang, HAO Xuejiang, et al. A review

of several issues for compressed gas energy storage in lined rock cavern [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(1):1-13. (in Chinese)

- [2] 张国华,相月,王薪锦,等. 压气储能地下内衬储气库结构荷载分担解析及影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增刊2):3633-3650.
ZHANG Guohua, XIANG Yue, WANG Xinjin, et al. Analytical solution for load sharing in the structure of an underground lined rock cavern for compressed air energy storage and analysis of influencing factors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(Suppl 2):3633-3650. (in Chinese)
- [3] BUDT M, WOLF D, SPAN R, et al. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments[J]. Air Energy, 2016, 170:250-268.
- [4] LI P, KANG H, ZHU Q, et al. Numerical and experimental investigations of concrete lined compressed air energy storage system[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 390:136153.
- [5] HAMEER S, NIEKERK J L. A review of large-scale electrical energy storage[J]. International Journal of Energy Research, 2015, 39(9):1179-1195.
- [6] 蒋中明,袁振,肖喆臻,等. CAES洞室FRP-混凝土界面增韧改性效果试验研究[J]. 土木工程学报, 2025:1-9[2025-03-10]. <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTTotal-TMGC20240606001.htm>.
JIANG Zhongming, YUAN Zhen, XIAO Zhezhen, et al. Experimental study on toughening modification effect of FRP-concrete interface in CAES caverns [J]. China Civil Engineering Journal, 2025:1-9[2025-03-10]. <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTTotal-TMGC20240606001.htm>. (in Chinese)
- [7] LIU R T, WANG M, XU J W, et al. Seepage characteristics of porous media under stress-gas pressure coupling[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 109:115119.
- [8] FANG J Y, MA H L, YANG C H, et al. Airtightness evaluation of lined caverns for compressed air energy storage under thermo-hydro-mechanical (THM) coupling[J]. Energy, 2024, 308:132996.
- [9] XU Y J, XIA C C, ZHOU S W, et al. An analytical solution for elastoplastic responses of a lined rock cavern for compressed air energy storage considering excavation and high internal pressure [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 170:106318.
- [10] 蒋中明,李小刚,万发,等. 压气储能遂昌地下储气库结构应力变形特性数值研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(3):79-86.
JIANG Zhongming, LI Xiaogang, WAN Fa, et al. Numerical study on stress and deformation characteristics of structure of underground gas storage for CAES in Suichang[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(3):79-86. (in Chinese)
- [11] ZHOU S W, XIA C C, DU S G, et al. An analytical solution for mechanical responses induced by temperature and air pressure in a lined rock cavern for underground compressed air energy storage [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(2):749-770.

- [12] JIANG Z M, LI P, TANG D, et al. Experimental and numerical investigations of small-scale lined rock cavern at shallow depth for compressed air energy storage[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(6):2671-2683.
- [13] 郭丁彰, 尹钊, 周学志, 等. 压缩空气储能系统储气装置研究现状与发展趋势[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5):1486-1493. GUO Dingzhang, YIN Zhao, ZHOU Xuezhi, et al. Status and prospect of gas storage device in compressed air energy storage system[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5):1486-1493. (in Chinese)
- [14] LIU R T, WANG M, XU J W, et al. Seepage characteristics of porous media under stress-gas pressure coupling[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 109:115119.
- [15] 徐加秋, 阳恩慧, 罗浩原, 等. 基于温度应力的温拌沥青胶结料低温力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(1):70-76. XU Jiaqiu, YANG Enhui, LUO Haoyuan, et al. Mechanical properties of warm mix asphalt at low temperature based on thermal stress calculations[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(1):70-76. (in Chinese)
- [16] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京:中国铁道出版社, 1999. WU Zhongwei, LIAN Huizhen. *High performance concrete*[M]. Beijing:China Railway Press, 1999. (in Chinese)
- [17] 吴相豪, 戴圣男, 李志卫, 等. 高温后水泥基材料抗压强度与微观结构研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(6):1755-1758, 1763. WU Xianghao, DAI Shengnan, LI Zhiwei, et al. Compressive strength and microstructure of cement-based materials after high temperature[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(6):1755-1758, 1763. (in Chinese)
- [18] 郭献戌, 安明喆, 王月, 等. 大温差循环作用下混凝土温度响应及损伤模拟[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(8):845-852. GUO Xianxu, AN Mingzhe, WANG Yue, et al. Simulation on temperature response and damage of concrete under large temperature difference cycling[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(8):845-852. (in Chinese)
- [19] YAPHARY Y L, LU J X, ZHAO B, et al. Utilization of CO₂ cured CSW-MSWIBA cold bonded aggregate into lightweight concrete products for masonry units[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 276:122203.
- [20] 张聪, 夏超凡, 袁振, 等. 火灾下纤维自密实混凝土的爆裂行为预测[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(2):260-267, 282. ZHANG Cong, XIA Chaofan, YUAN Zhen, et al. Spalling behaviour prediction for fiber reinforced self-consolidating concrete under fire[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(2):260-267, 282. (in Chinese)
- [21] 吴楷, 张艳荣, 孔祥明, 等. 基于疲劳内聚力模型的瓷砖-砂浆界面温度疲劳特性分析[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(4):403-411. WU Kai, ZHANG Yanrong, KONG Xiangming, et al. Temperature fatigue characteristics of tile-mortar interface based on fatigue cohesive zone model[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(4):403-411. (in Chinese)
- [22] XU Y, WONG Y L, POON C S, et al. Impact of high temperature on PFA concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(7):1065-1073.

~~~~~

(上接第48页)

- [44] DE VERA G, CLIMENT M A, VIQUEIRA E, et al. A test method for measuring chloride diffusion coefficients through partially saturated concrete. Part II: The instantaneous plane source diffusion case with chloride binding consideration [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(5):714-724.
- [45] MAO L X, LI L Y, WANG Y, et al. Physicochemical modelling in chlorides migration in concrete with account of multi-species coupling, reaction kinetic and pore evolution[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 460:139707.
- [46] ZHANG Y, ZHANG M Z. Transport properties in unsaturated cement-based materials-A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 72:367-379.
- [47] XIONG H R, YUAN K L, WEN M J, et al. Influence of pore structure on the moisture transport property of external thermal insulation composite system as studied by NMR[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 228:116815.
- [48] XIONG Q X, TONG L Y, MEFTAH F, et al. Improved predictions of permeability properties in cement-based materials: A comparative study of pore size distribution-based models[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411:133927.
- [49] XIONG Q X, MEFTAH F. Determination on pore size distribution by a probabilistic porous network subjected to salt precipitation and dissolution [J]. *Computational Materials Science*, 2021, 195:110491.
- [50] PROMENTILLA M A B, SUGIYAMA T, HITOMI T, et al. Quantification of tortuosity in hardened cement pastes using synchrotron-based X-ray computed microtomography[J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(6):548-557.