

# 高低温循环作用后水泥砂浆试件的 单轴压缩性能的试验研究

许满吉<sup>1,2</sup>, 莫振泽<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1,3</sup>, 刘述森<sup>1,2</sup>, 刘文军<sup>4</sup>, 熊良宵<sup>5</sup>

- (1. 锡澄中车(无锡)城市轨道交通工程有限公司, 无锡 214400; 2. 中车智能交通工程技术有限公司, 北京 100071;  
3. 江苏中车城市发展有限公司, 无锡 214000; 4. 无锡学院轨道交通学院, 无锡 214105;  
5. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059)

**摘要:** 为了研究高低温循环作用后水泥砂浆的力学特性, 对水泥砂浆试件先进行不同温度的高温循环作用, 然后再对试件进行单轴压缩试验, 研究高温循环次数、高温循环的温度对高温后试件的单轴抗压力学特性的影响。研究表明: (1) 当经过相同温度的高温作用后, 随着循环次数的增加, 试件的单轴抗压强度呈逐渐减小的趋势, 试件的峰值应变的变化规律则不固定。当经历高温循环的次数相同时, 随着高温温度的增加, 试件的抗压强度逐渐减小。(2) 当试件的水灰比相同, 试件经历3次不同温度的高温循环作用时, 当第一次高温作用的温度相同时, 随着第二次高温温度的增加, 试件的单轴抗压强度呈逐渐减小的趋势, 试件的峰值应变呈逐渐增加的趋势。

**关键词:** 高低温循环; 水泥砂浆; 抗压强度

**中图分类号:** TU45; TU502 **文献标识码:** A

## EXPERIMENTAL STUDY ON UNIAXIAL COMPRESSION PROPERTIES OF CEMENT MORTAR SPECIMENS AFTER HIGH AND LOW TEMPERATURE CYCLING

XU Man-ji<sup>1,2</sup>, MO Zhen-ze<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1,3</sup>, LIU Shu-sen<sup>1,2</sup>, LIU Wen-jun<sup>4</sup>, XIONG Liang-xiao<sup>5</sup>

- (1. XICHENG-CRRC(WuXi) Urban Rail Transit Engineering CO., LTD., Wuxi 214400, China;  
2. CRRC Intelligent Transportation Engineering Technology CO., LTD., Beijing 100071, China;  
3. Jiangsu CRRC Urban Development CO., LTD., Wuxi 214000, China;  
4. School of Rail Transportation, Wuxi University, Wuxi 214105, China;  
5. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of cement mortar after high and low temperature cycling, the cement mortar specimens were subjected to high temperature cycling at different temperatures, and then subjected to uniaxial compression tests to study the effects of high temperature cycling times and temperature on the uniaxial compressive properties of the specimens after high temperature cycling. The research results indicate that: (1) After being subjected to high temperature at the same temperature, the uniaxial compressive strength of the specimen gradually decreases with the increase of the number of cycles, while the variation rule of the peak strain of the specimen is not fixed. When subjected to the same number of cycles of high temperature, the compressive strength of the

specimen gradually decreases with the increase of high temperature. (2) When the water cement ratio of the specimen is the same and the specimen undergoes three high-temperature cycles at different temperatures, and the temperature of the first high-temperature is the same, the uniaxial compressive strength of the specimen gradually decreases with the increase of the second high-temperature temperature, and the peak strain of the specimen gradually increases.

**Key words:** high and low temperature cycling; cement mortar; compressive strength

## 1 引言

岩石工程和混凝土工程都不可避免会遭遇火灾等高温作用,因此,研究高温后岩石和混凝土材料的剩余强度,对于评价高温后岩石工程和混凝土结构工程具有重要意义。目前已有许多研究者对高温作用下岩石和混凝土的力学特性开展了试验研究。

余志武等<sup>[1]</sup>对高温后 C40 和 C50 普通混凝土以及 C80 高性能混凝土的力学性能进行了试验研究;李敏等<sup>[2]</sup>对受火后的混凝土试件进行了抗压强度、抗折强度和劈裂抗拉强度试验,讨论了温度、强度等级、试件尺寸、含水量对其高温后力学性能的影响;贾福萍等<sup>[3]</sup>对在不同受热温度、不同冷却方式下的不同尺寸混凝土立方体试块的全应力-应变曲线进行测试,分析了高温后冷却环境对混凝土性能退化的影响;苏承东等<sup>[4]</sup>利用岩石力学试验机进行单轴压缩试验,研究高空隙度粗砂岩经历高温后,波速、抗压强度、平均模量、变形模量以及极限应变随温度的变化规律;张连英等<sup>[5]</sup>采用电液伺服材料试验系统对高温作用下大理岩的力学性能进行了研究,观察了大理岩的全应力-应变曲线、峰值应力、弹性模量等量的变化特征;尹光志等<sup>[6]</sup>通过在电液伺服岩石力学试验机上对焦作方庄煤矿煤层顶板粗砂岩进行高温后常规三轴压缩试验,基于试验结果研究不同温度作用后常规三轴压缩条件下粗砂岩宏观力学特性。

由于岩石和混凝土结构工程往往经历多次高温作用,因此,有很多研究者针对高温循环作用后岩石和混凝土的力学特性开展了试验研究。倪晓慧等<sup>[7]</sup>对经历不同温度及温度循环次数的大理岩试件进行力学参数测试,从力学参数角度分析了大理岩强度及变形指标变化特征;陈有亮等<sup>[8]</sup>对经历不同温度、不同高温循环次数后混凝土的力学性能进行试验研究;朱珍德等<sup>[9]</sup>分析了大理岩在不同温度周期变化后与高围压作用下全应力应变过程的变形特性;杨晓明等<sup>[10]</sup>探讨了在亚高温循环作用下混凝土试件

的宏观现象与受压和劈拉破坏特征。上述研究者在对岩石和混凝土进行高温循环作用时,经历高温循环的温度是相同的,而实际岩石工程和混凝土工程可能经历不同温度的高温循环作用。南建林等<sup>[11]</sup>通过试验研究了混凝土在温度升降循环下的变形性能。目前有关岩石和混凝土工程经过不同温度的循环作用后的力学特性的研究成果还是偏少。

因此,将对立方体型的水泥砂浆试件先进行不同温度的高温循环作用,然后再对立方体型的水泥砂浆试件进行单轴压缩试验,研究高温循环次数、高温循环的温度对高温后水泥砂浆试件的单轴抗压力学特性的影响。

## 2 试验方案

### 2.1 试件制作

水泥砂浆试件为正方体试件,边长为 70.7 mm。水泥砂浆试件的水灰比包括 3 种,即分别为 0.45、0.55 和 0.65。正方体试件由将 3 种水灰比的水泥砂浆倒入正方体模具中,振捣 2 min,待 24 h 拆模形成。在浇筑正方体试件时采用 425# 水泥,水泥的强度等级均为 42.5 MPa。砂采用厦门艾思欧标准砂有限公司生产的标准砂,粒径范围为 0.5~1.0 mm,为中级标准砂。

### 2.2 试验顺序

正方体试件经标准养护 28 d 后,然后将试件放在高温试验炉进行高温加热,试件的受火温度设定为 200℃、300℃和 400℃共 3 个等级。加热速率设定为 10℃/min,炉温升至目标温度后,立即停止加热,试件在炉内冷却至室温。试件经历高温作用后,并放置 7 d 后,然后将试件放在 WAW-600C 万能压缩变形试验机上进行单轴压缩变形试验。在进行单轴压缩变形试验时,位移加载速率为 0.1 mm/min。

试验过程中,按照加温循环的顺序可进行分组。当试验中采用相同温度的高温循环试验时,试验分组见后文的表 1。当试验中采用不同温度的高温循环试验时,试验分组见后文的表 2。

### 3 相同温度的高温循环作用后的单轴压缩试验结果

当经相同温度的高温作用后试件的单轴抗压强度和峰值应变见表 1。

当经过相同温度的高温作用后,随着循环次数的增加,试件的单轴抗压强度呈逐渐减小的趋势,试件的峰值应变的变化规律则不固定。当经历高温循环的次数相同时,随着高温温度的增加,试件的抗压

强度逐渐减小。当经历高温的温度和高温循环的次数相同时,随着试件的水灰比的增加,试件的抗压强度逐渐减小。

### 4 不同温度的高温循环作用后的单轴压缩试验结果

当经不同温度的高温作用后试件的单轴抗压强度和峰值应变见表 2。

表 1 当经相同温度的高温作用后试件的单轴抗压强度和峰值应变

试验方案	加温顺序	抗压强度/MPa			峰值应变/ $\times 10^{-2}$		
		$w/c=0.45$	$w/c=0.55$	$w/c=0.65$	$w/c=0.45$	$w/c=0.55$	$w/c=0.65$
1	25℃→200℃→25℃	51.61	40.54	28.30	1.674	1.686	1.524
2	25℃→200℃→25℃→200℃→25℃	50.55	38.38	27.63	1.669	1.259	1.074
3	25℃→200℃→25℃→200℃→25℃→200℃→25℃	48.57	35.83	22.64	1.467	1.306	1.083
4	25℃→200℃→25℃→200℃→25℃→200℃→25℃→200℃→25℃	38.14	32.56	22.08	1.178	1.152	1.095
5	25℃→200℃→25℃→200℃→25℃→200℃→25℃→200℃→25℃→200℃→25℃	34.75	28.70	15.92	1.368	0.972	0.796
6	25℃→300℃→25℃	46.29	39.14	28.21	1.878	2.060	1.774
7	25℃→300℃→25℃→300℃→25℃	43.45	35.24	23.14	1.618	1.689	1.701
8	25℃→300℃→25℃→300℃→25℃→300℃→25℃	41.25	32.89	21.75	1.995	1.721	1.757
9	25℃→300℃→25℃→300℃→25℃→300℃→25℃→300℃→25℃	41.29	31.71	20.34	1.860	1.902	2.234
10	25℃→300℃→25℃→300℃→25℃→300℃→25℃→300℃→25℃→300℃→25℃	35.34	23.48	12.65	1.212	1.185	0.935
11	25℃→400℃→25℃	42.72	39.01	25.11	1.598	1.371	1.362
12	25℃→400℃→25℃→400℃→25℃	47.60	34.66	23.16	1.682	1.593	1.553
13	25℃→400℃→25℃→400℃→25℃→400℃→25℃	46.11	33.87	22.34	1.737	1.910	1.483
14	25℃→400℃→25℃→400℃→25℃→400℃→25℃→400℃→25℃	37.07	30.39	21.57	1.448	1.321	1.429
15	25℃→400℃→25℃→400℃→25℃→400℃→25℃→400℃→25℃→400℃→25℃	29.55	28.31	8.16	1.184	1.432	0.905

表 2 当经不同温度的高温作用后试件的单轴抗压强度和峰值应变

试验方案	加温顺序	抗压强度/MPa			峰值应变/ $\times 10^{-2}$		
		$w/c=0.45$	$w/c=0.55$	$w/c=0.65$	$w/c=0.45$	$w/c=0.55$	$w/c=0.65$
1	25℃→200℃→25℃→300℃→25℃	25.45	38.69	16.81	2.945	1.148	1.104
2	25℃→200℃→25℃→400℃→25℃	23.79	37.47	13.93	3.102	1.618	2.053
3	25℃→300℃→25℃→200℃→25℃	27.03	41.78	16.69	2.668	1.386	1.003
4	25℃→300℃→25℃→400℃→25℃	23.32	35.81	10.38	2.650	1.827	1.637
5	25℃→400℃→25℃→200℃→25℃	23.19	32.67	16.38	2.707	1.635	1.258
6	25℃→400℃→25℃→300℃→25℃	24.93	32.61	13.21	2.786	1.855	1.139
7	25℃→200℃→25℃→200℃→25℃→300℃→25℃	25.68	35.25	18.73	2.515	1.618	1.577
8	25℃→200℃→25℃→200℃→25℃→400℃→25℃	31.27	35.29	16.06	1.637	1.418	1.618
9	25℃→200℃→25℃→300℃→25℃→400℃→25℃	31.81	33.63	12.91	1.524	1.929	1.849
10	25℃→200℃→25℃→400℃→25℃→300℃→25℃	32.53	23.54	13.49	1.605	1.825	2.091
11	25℃→300℃→25℃→200℃→25℃→400℃→25℃	31.36	42.52	12.31	1.516	1.646	1.467
12	25℃→300℃→25℃→300℃→25℃→200℃→25℃	37.99	43.87	12.07	2.083	2.065	2.785
13	25℃→300℃→25℃→300℃→25℃→400℃→25℃	26.89	34.40	15.05	1.528	1.691	1.649
14	25℃→300℃→25℃→400℃→25℃→200℃→25℃	37.16	37.15	12.10	2.059	1.973	1.527
15	25℃→400℃→25℃→200℃→25℃→300℃→25℃	29.48	31.97	16.00	1.628	1.517	1.254
16	25℃→400℃→25℃→300℃→25℃→200℃→25℃	31.00	31.36	15.45	1.858	1.989	1.419
17	25℃→400℃→25℃→400℃→25℃→200℃→25℃	37.29	26.46	13.15	2.068	2.689	1.974
18	25℃→400℃→25℃→400℃→25℃→300℃→25℃	32.77	29.95	14.22	1.575	1.778	1.419

当试件的水灰比相同,试件经历 3 次不同温度的高温循环作用时,当第一次高温作用的温度相同时,随着第二次高温温度的增加,试件的单轴抗压强度呈逐渐减小的趋势,试件的峰值应变呈逐渐增加的趋势。当试件的水灰比相同,试件经历 3 次不同温度的高温循环作用时,当其中两次的高温温度相同,随着剩余一次高温的温度的增加,试件的单轴抗压强度呈逐渐减小的趋势,试件的峰值应变的变化规律则不固定。

水泥砂浆试件经历相同温度的高温循环作用和不同温度的高温循环作用,在高温作用下,水泥砂浆试件内部各种组相颗粒的不同热膨胀率以及各向异性颗粒的不同分布方位的热弹性性质,引起跨颗粒边界的热膨胀不协调,从而造成颗粒间或颗粒内部的拉应力或压应力,而应力又使水泥砂浆产生微裂纹。水泥砂浆试件在经历多次温度循环时,温度循环过程会造成水泥砂浆试件内温度裂纹的不断扩展、叠加,这就使得这水泥砂浆试件的抗压强度随着循环周期次数的增加而减小<sup>[8]</sup>。加热温度越高,温度循环后水泥砂浆试件的抗压强度越小。

## 5 结论

(1) 当经过相同温度的高温作用后,随着循环次数的增加,试件的单轴抗压强度呈逐渐减小的趋势,试件的峰值应变的变化规律则不固定。当经历高温循环的次数相同时,随着高温温度的增加,试件的抗压强度逐渐减小。

(2) 当试件的水灰比相同,试件经历 3 次不同温度的高温循环作用时,当第一次高温作用的温度

相同时,随着第二次高温温度的增加,试件的单轴抗压强度呈逐渐减小的趋势,试件的峰值应变呈逐渐增加的趋势。当试件的水灰比相同,试件经历 3 次不同温度的高温循环作用时,当其中两次的高温温度相同,随着剩余一次高温的温度的增加,试件的单轴抗压强度呈逐渐减小的趋势,试件的峰值应变的变化规律则不固定。

## 参考文献

- [1] 余志武,丁发兴,罗建平. 高温后不同类型混凝土力学性能试验研究[J]. 安全与环境学报,2005,5(5):1-5.
- [2] 李敏,钱春香,王琦,等. 高强混凝土受火后力学性能变化规律的研究[J]. 硅酸盐学报,2003,31(11):1116-1120.
- [3] 贾福萍,吕恒林,崔艳莉,等. 不同冷却方式对高温后混凝土性能退化研究[J]. 中国矿业大学学报,2009,38(1):25-29.
- [4] 苏承东,郭文兵,李小双. 粗砂岩高温作用后力学效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(6):1162-1170.
- [5] 张连英,茅献彪,李天珍. 高温环境下大理岩热损伤特性的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(4):505-511.
- [6] 尹光志,李小双,赵洪宝. 高温后粗砂岩常规三轴压缩条件下力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(3):598-604.
- [7] 倪晓慧,李晓娟,黄殿武. 不同高温循环次数后大理岩单轴压缩力学试验研究[J]. 水力发电学报,2016,35(9):95-100.
- [8] 陈有亮,索晓航,蒋立浩,等. 高温循环作用后混凝土力学性能试验研究[J]. 力学季刊,2012,33(4):577-583.
- [9] 朱珍德,方荣,朱明礼,等. 高温周期变化与高围压作用下大理岩力学特性试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(11):2279-2290.
- [10] 杨晓明,赵顺波,李晓克,等. 在亚高温循环作用下混凝土强度劣化规律试验研究[J]. 港工技术,2007,2(1):25-28.
- [11] 南建林,过镇海,时旭东. 温度升降循环下混凝土变形性能的试验研究[J]. 建筑科学,1997,2(2):16-21.

作者简介: 许满吉(1973—),男,硕士,高级工程师,主要研究轨道交通工程建设。E-mail: 353271637@qq.com