

文章编号: 1001-1455(2011)01-0101-06

混凝土高温动态压缩力学性能实验^{*}

陶俊林¹, 秦李波¹, 李奎¹, 刘丹¹, 贾彬¹, 陈小伟^{1,2}, 陈刚²

(1. 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010;

2. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 利用一种新的快速加热混凝土的方法和 SHPB 实验系统对自制混凝土进行了不同温度下的动态压缩初步实验, 发现了混凝土在高温下的动态压缩力学性能的规律性; 在高温动态压缩条件下, 温度变化是影响混凝土力学性能的主要因素, 应变率的影响是次要因素。另外, 该混凝土高温动态压缩破坏可以分为 2 种模式(裂纹模式和破碎模式)。

关键词: 固体力学; 力学性能; 快速加热; 混凝土; 高温; SHPB

中图分类号: O346.1 **国标学科代码:** 130 · 1545 **文献标志码:** A

混凝土材料作为一种被广泛应用于民用与军事建筑的建筑材料, 除了会经受一般的静态载荷和动态载荷外, 还有可能在火灾环境中遭受碰撞、冲击等动态载荷的作用, 如火灾中煤气罐的爆炸、化学物质的燃烧引起爆炸、火工品的燃烧爆炸、异物的碰撞等。另外, 现代战争更加强调对敌方指挥所、重要军事建筑的攻击, 主要是利用深层钻地武器对这些建筑进行摧毁, 在武器钻地过程中也会因摩擦等原因产生高温。这些混凝土结构承受的极端载荷情况一旦发生, 建筑结构往往会发生毁灭性的破坏, 建筑本身及其内部的生命、财产会遭受不可挽回的损失。这些情况下的建筑结构响应, 对于设计建筑以最大限度保证人类生命财产安全有重要意义。建筑材料在这些特殊载荷作用下的力学性能正是相关研究的基础。

目前, 对于混凝土材料动态压缩力学性能^[1-6]以及混凝土材料在高温与高温后的静态压缩力学性能^[7-12]已有较多的研究, 但对高温下混凝土的动态力学性能的研究则少有报道。

1 实验系统

1.1 加热装置

目前对混凝土加热的方式主要是电阻(电炉)加热^[7-9, 11-12]和直接燃烧(火)加热^[13-14] 2 种, 试件热量的传递均是从外到内的热传导。由于混凝土是热的不良导体, 加上在进行混凝土力学性能实验时为了能够将混凝土视作各向同性材料, 混凝土试件的尺寸均比较大。由于这 2 个主要因素, 加热混凝土试件、并使其内部温度均匀, 会耗费很长的时间, 在加热到较高温度时更加明显, 加热到五六百摄氏度甚至需要 6~8 h^[15]。

与青岛迈可威微波有限公司联合, 采用微波加热原理, 研发了 1 台针对素混凝土快速加热的实验装置, 见图 1。利用该装置进行了大量的混凝土加热实验, 实验结果表明: 一般情况下, 将混凝土试件加热到 600 ℃ 及以上的温度只需 5~10 min, 并且试件内部温度不均匀度可控制在 5% 以内, 可以满足一般的科研与工程需求。混凝土试件内部的均匀性是加热技术必须解决的问题, 采用了 2 种方法测试该微波快速加热装置快速加热混凝土试件后温度分布的均匀性。1 种是破碎测试法, 将试件加热到预定温度后, 快速放在保温盒里, 并快速敲碎为几块, 再使用香港希玛红外测温枪 AR-852B 快速测试不同块体不同部位的温度; 另 1 种是采用图 2 所示的单元法, 将几个试件叠在一起构成 1 个大试件, 加热到预定温度后, 使用红外测温枪快速测试各个小试件不同部位的温度。

* 收稿日期: 2009-11-03; 修回日期: 2010-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(10602048, 10972187)

作者简介: 陶俊林(1972—), 男, 博士, 教授。



图 1 加热混凝土的微波炉
Fig. 1 The microwave oven for rapid heating up concrete



图 2 测试试件温度的均匀性的单元法
Fig. 2 The unit method to test the temperature uniformity of concrete specimens

1.2 SHPB 实验装置

高温动态实验是在 $\varnothing 50$ mm 的 SHPB 实验装置上完成的。入射杆和透射杆的长度均为 2 000 mm, 子弹长度为 500 mm, 波导杆和子弹均为铝杆。为了保护波导杆的端面, 在波导杆与试件接触的端面粘贴有直径 50 mm、厚 5 mm 的圆铝片。在入射杆与子弹接触的端面上使用了约 $22.00\text{ mm} \times 22.00\text{ mm} \times 0.75$ mm 的薄铝片作为波形整形器。

2 高温动态实验

2.1 试件的制作

SHPB 实验装置的直径是 50 mm, 为了保证试件的均匀性, 在制作混凝土试件时, 混凝土的骨料采用小鹅卵石及碎鹅卵石, 最大尺寸在 5~8 mm。为了进一步保证试件的均匀性, 按照水泥: 砂子: 石子: 水 = 1: 0.951: 2.326: 0.41 的质量比浇筑成 $1.4\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 的立方体。

在浇筑完成的 10 h 后进行覆盖养护, 表面覆盖 60 mm 厚的细砂, 每隔 12 h 浇水 1 次, 连续 5 d, 每隔 24 h 浇水 1 次, 连续 5 d, 每隔 48 h 浇水 1 次, 连续 5 d, 之后进行自然养护。然后, 采用钻芯取样的方法取出 $\varnothing 50\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的圆柱体, 用切割机去除两端后加工成 $\varnothing 50\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ 的试件, 成形后的试件如图 3 所示。

2.2 保温设备的制作

尽管混凝土是热的不良导体, 但为了尽量减少混凝土在实验过程中热量的损失, 制作了简易的保温设备, 如图 3 所示。在支架上面的厚纸片上铺 1 层石棉, 把加热后的试件安装好后, 盖 1 层厚石棉和厚纸片, 这样就成了 1 个简单的保温装置。

2.3 实验系统的调试

进行实验前, 需要将输入杆、输出杆和子弹调整到同 1 个平面上, 并使 3 杆的轴心线相互连接成为 1 条直线。如果是理想状态, 在入射杆和透射杆间无试件紧密结合时, 入射波信号应完全透过接触界面无反射地到达透射杆。但是, 由于客观上诸多原因的影响, 不可能达到理想状态。如果反射波的峰值小于入射波幅值的约 10%, 并且反射波的宽度很小(见图 4), 可以进行正式实验。

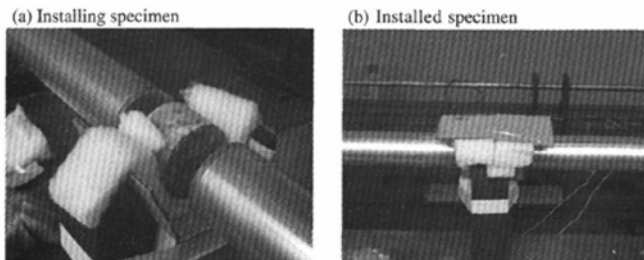


图 3 混凝土试件及简易保温设备
Fig. 3 Concrete specimen and simple attemporator

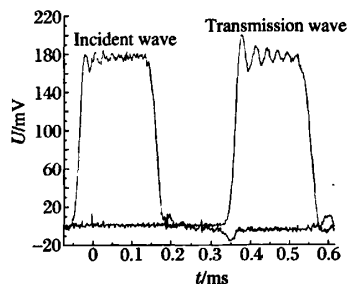


图 4 SHPB 系统调试波形
Fig. 4 The debugging waves of SHPB system

2.4 试件的加热和安装

利用波形整形技术,在波导杆与试件接触的端面粘贴了厚度 5 mm、直径同杆径、材料与波导杆相同的薄片,用以保护波导杆。实验温度为 10、200、350、450 和 600 °C,子弹撞击速度为 5、7 和 12 m/s。

首先在微波炉上将试件加热到预定温度,然后迅速将试件放入石棉做的保温盒里,再将试件放在实验系统的简易保温装置中安装试件。这个过程需要处理以下问题:(1)测试从加热完成到试件安装完成这一过程的试件温度变化;(2)测试试件安装完成以后试件和波导杆温度的变化。这样可以较准确地获得试件在被撞击瞬间的温度,并判断波导杆的温度变化以在数据处理时作必要的处理。

将试件安装到实验系统前,已经将系统的气压充到预定气压,试件安装完成便可进行实验。从试件加热完成到安装完成到实验完成的时间一般都在 50 s 内,从测试的结果看,从试件安装完成到实验完成,试件温度降低在 5% 以内。另外,由实验测得的数据,在试件加热到最高温度 600 °C 进行实验时,试件安装完成后 40~50 s,波导杆上粘贴的 5 mm 厚铝片的最高温度为约 60 °C,距波导杆端面约 20 cm 处的温度就是实验室的环境温度。该测试结果得到了数值计算的验证(见图 5)。因此,在数据处理时不用考虑波导杆的温度变化。

图 5 是利用 Ansys 软件进行接触热传导分析计算得到的波导杆温度分布情况,计算时间是 50 s,图中的距离是指波导杆横截面距波导杆与试件接触面的距离。实验系统是轴对称的,采用轴对称模型进行计算。试件夹在 2 根同样的波导杆之间,关于试件中间横截面对称,在计算时可只取一根波导杆和试件的一半进行计算。为了进一步减少计算量,计算时波导杆长度取 200 mm,试件长度取 17.5 mm,直径均为 50 mm。波导杆的初始温度取 10 °C,试件的初始温度取 600 °C。波导杆材料为 LY12 铝,相关参数为^[16]:密度 2.8 t/m³,传热系数 121 W/(m²·K),比热 900 J/(kg·K)。混凝土材料相关参数为^[17]:密度 2.064 t/m³,传热系数 0.75 W/(m²·K),比热 1.2 kJ/(kg·K)。计算中没有考虑空气对流和胶层的影响。

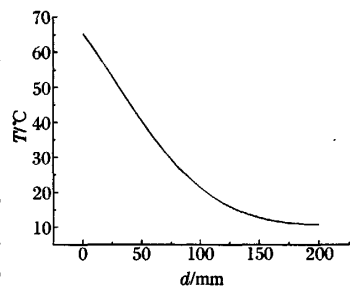


图 5 50 s 时波导杆温度分布情况
Fig. 5 The temperature profile of the wave guider bar at 50 s

3 实验结果及分析

3.1 典型的实验记录曲线与实验现象

图 6(a)是混凝土试件在室温时不同子弹速度撞击下去除噪声信号后的实验记录曲线。图 6(b)是子弹速度 7.6 m/s 时不同试件温度下波导杆上应变片所记录的实验波形。

值得注意在图 6(b)中,在入射波基本一致的条件下,透射波的宽度随着试件温度的增加而减小,而反射波的宽度却没变化。5.7 和 12.5 m/s 撞击速度下,也有此现象。这不能由温度变化引起波导杆或铝垫片材料性能变化来解释,因为如果是这样的话,反射波和透射波的宽度应当同样变化。其中的具体原因有待分析。

在高温动态压缩实验过程中,试件的破坏可以分为 3 种情况:(1)试件有明显裂纹但仍然是一个整体或只有极小部分脱落;(2)试件分成几大块;(3)试件粉碎,见图 7 所示。在实验过程中发现:在子弹速度为 5.7 m/s 时,试件的破坏为第 1 种情况;在子弹速度为 7.6 m/s 时,当温度为 200 和 350 °C 时,几乎一半试件的破坏为第 1 种情况,而另一半试件的破坏为第 2 种情况,当温度为 450 和 600 °C 时,试件的破坏为第 2 种情况;在子弹速度为 12.5 m/s 时,试件的破坏为第 3 种情况。这些破坏情况与常温时完全相同。由于与第 1 种破坏情况相比,第 2、3 种破坏情况无本质上的区别,因此在以下的分析中将第 2、3 种破坏情况统称为破碎模式,将第 1 种破坏情况称为裂纹模式。

3.2 应力应变曲线

由图 6(b)可知,在入射波基本一致条件下,随着温度增加,透射波的幅值明显减小,这预示着温度软化效应明显。在数据处理时,以试件应力应变均匀为前提,按照波传播规律计算得到的起点最合适。

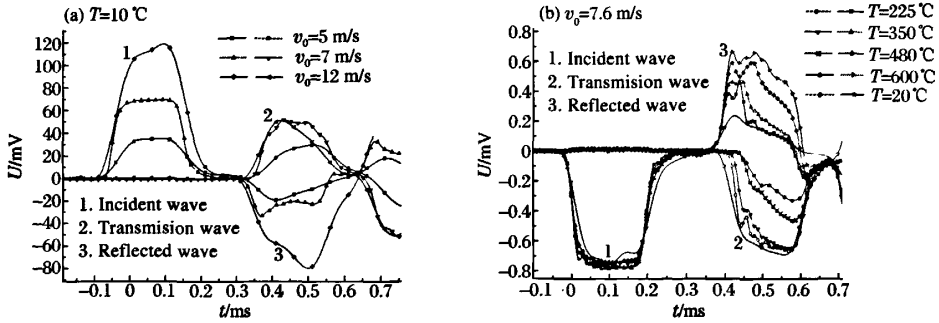


图6 混凝土试件 SHPB 典型实验记录波形

Fig. 6 The representative experimental waves of the concrete specimens

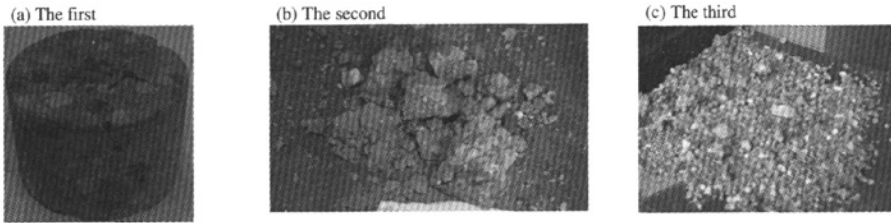


图7 试件破坏的3种情况

Fig. 7 The three destructive cases of concrete specimens

根据波导杆上应变片测试的信号,确定用于数据处理的人射波、反射波和透射波,并验证了应力均匀性假设后,可以获得试件的应力、应变及应变率随时间的变化

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{2c_0}{l_s}(\epsilon_i - \epsilon_r) = -\frac{2c_0}{l_s}\epsilon_r$$

$$\epsilon(t) = \frac{2c_0}{l_s} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_r) d\tau = -\frac{2c_0}{l_s} \int_0^t \epsilon_r d\tau$$

$$\sigma_s = \frac{E_0 A_0}{A_s}(\epsilon_i + \epsilon_r) = \frac{E_0 A_0}{A_s} \epsilon_t$$

式中: E_0 、 c_0 、 A_0 为压杆的弹性模量、纵波波速及横截面积, A_s 和 l_s 为试件的横截面积及长度。并且定义压缩为正,拉伸为负。相应的应力应变曲线如图8所示,图中的*表示试件已破坏。

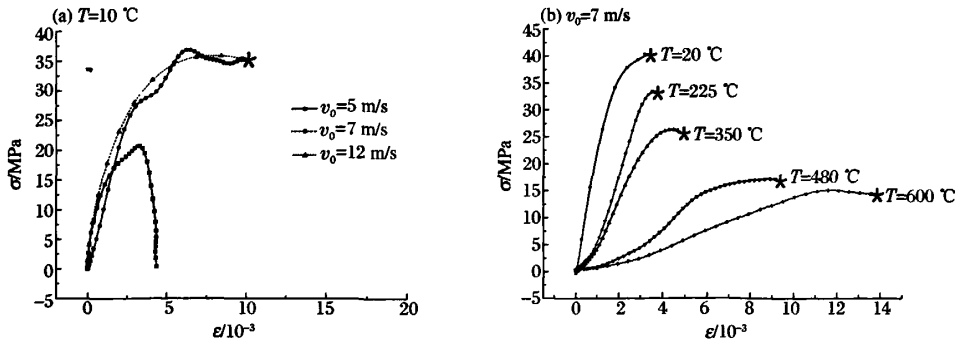


图8 混凝土试件动态压缩应力应变曲线

Fig. 8 The stress-strain curves of the concrete specimens

3.3 实验结果分析

由图 8(a)可知,在室温条件下,子弹速度 7 和 12 m/s 时应力应变曲线在前面上升和初始软化段基本是重合的,说明在这 2 个应变率范围内,是应变率不太敏感的。与 5 m/s 时的曲线相比,7 和 12 m/s 时应力应变曲线具有明显的抬高,但这是否由应变率原因造成,还有待于进一步的分析。因为在 5 m/s 时试件基本没有发生破坏,最多产生少量的非常细小的裂纹,也可以认为外载相对较小,还未能完全体现出试件材料的承载特性。

由图 8(b)可知,在动载情况下,温度软化效应十分明显,在温度升高、混凝土试件的强度降低的同时,混凝土试件的峰值应变或失效应变却相对变大,韧性有所增加。

表 1 是混凝土试件不同温度下的静态抗压强度, σ_c 为实测抗压强度, α 为强度折减系数。与图 8 比较可以得到: 在混凝土高温动态压缩条件下,温度变化是影响混凝土力学性能的主要因素,应变率的影响是次要因素。

表 1 混凝土试件在不同温度下的静态抗压强度
Table 1 Static strengths of concrete specimens at different temperatures

$T/^\circ\text{C}$	σ_c/MPa	α
10	45.40	1.00
300	43.50	0.96
350	48.50	1.07
400	46.00	1.01
450	38.60	0.85
500	31.20	0.69
600	23.26	0.51

4 结 论

(1) 研制的微波加热混凝土的装置可以很快地加热素混凝土试件,并能够保证混凝土温度的均匀性,是一种值得推广的快速加热素混凝土的方法;

(2) 在高温动态压缩条件下,温度软化是影响混凝土力学性能的主要因素,应变率脆化(强化)是次要因素;

(3) 在高温动态压缩条件下,自制混凝土材料的破坏可分为裂纹破坏和破碎破坏 2 种模式;子弹速度为 7.6 m/s、温度为 10~350 $^\circ\text{C}$ 时,混凝土试件将出现这 2 种破坏模式。

另外,在入射波基本一致的情况下,透射波的宽度随着试件温度的增加而减小的原因有待继续深入分析。

感谢西南科技大学杨森、郑西朋、敖雄伟、陈杰等同学,中国工程物理研究院结构力学研究所吴庆海、王薇等同志在实验中所做的工作。

参考文献:

- [1] Zhao H. A study on testing techniques for concrete-like materials under compressive impact loading[J]. Cement and Concrete Composites, 1998, 20: 293-299.
- [2] Grote D L, Park S W, Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. Experimental characterization[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25: 869-886.
- [3] Li Q M, Meng H. About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40: 343-360.
- [4] Forquina P, Garyb G, Gatuingt F. A testing technique for concrete under confinement at high rates of strain[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35: 425-446.
- [5] 白以龙. 材料与结构的动力学性能响应[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005.
- [6] 施绍裘, 王永忠, 王礼立. 国产 C30 混凝土考虑率型微损伤演化的改进 Johnson-Cook 强度模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 3250-3257.
SHI Shao-qiu, WANG Yong-zhong, WANG Li-li. Improved Johnson-Cook strength model taking account of rate-dependent micro-damage evolution for domestic C30 concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(sup 1): 3250-3257.
- [7] Tanyildizi H, Coskun A. Performance of lightweight concrete with silica fume after high temperature[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(10): 2124-2129.
- [8] Sancak E, Sari Y D, Simsek O. Effects of elevated temperature on compressive strength and weight loss of the

- light-weight concrete with silica fume and superplasticizer[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008,30(8):715-721.
- [9] Arioz O. Effects of elevated temperatures on properties of concrete[J]. *Fire Safety Journal*, 2007,42(8):516-522.
- [10] Youssef M A, Moftah M. General stress-strain relationship for concrete at elevated temperatures[J]. *Engineering Structures*, 2007,29:2618-2634.
- [11] 刘利先,吕龙,刘铮,等. 高温下及高温后混凝土的力学性能研究[J]. *建筑科学*, 2005,21(3):16-20.
LIU Li-xian, LÜ Long, LIU Zheng, et al. Investigation on the mechanical behavior of concrete at and after high temperature[J]. *Building Science*, 2005,21(3):16-20.
- [12] 覃丽坤,宋玉普,王玉杰,等. 高温对混凝土力学性能影响的试验研究[J]. *混凝土*, 2004,5:9-11.
QIN Li-kun, SONG Yu-pu, WANG Yu-jie, et al. Testing research of mechanics characteristics of concrete affected by high temperature[J]. *Concrete*, 2004,5:9-11.
- [13] Wang Y C, Wong P M H, Kodur V. An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures[J]. *Composite Structures*, 2007,80:131-140.
- [14] da Silva J C C, Martelli C, Kalinowski H J, et al. Dynamic analysis and temperature measurements of concrete cantilever beam using fibre Bragg gratings[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007,45(1):88-92.
- [15] 李卫. 高温下混凝土的强度和变形性能的实验研究[D]. 北京:清华大学,1994.
- [16] 工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册[M]. 2版. 北京:中国标准出版社,2002:41.
- [17] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土高温的高温性能及其计算[M]. 北京:清华大学出版社,2003:73-76.

Experimental investigation on dynamic compression mechanical performance of concrete at high temperature*

TAO Jun-lin¹, QIN Li-bo¹, LI Kui¹, LIU Dan¹,
JIA Bin¹, CHEN Xiao-wei^{1,2}, CHEN Gang²

(1. *Department of Divil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;*

2. *Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: An experimental setup was developed for rapid heating up concrete based on the principle of microwave heating and concrete specimens were manufactured. Dynamic compression experiments were conducted for the manufactured concrete specimens by using a split Hopkinson pressure bar system at different temperatures. The experimental results show that temperature is the primary factor for influencing the dynamic compression mechanical performance of concrete at high temperature and strain rate is the minor factor. Under dynamic compression, the concrete damage at high temperature can be divided into crack and fracture modes.

Key words: solid mechanics; mechanical behavior; rapid heating up; concrete; high temperature; SHPB

* Received 3 November 2009; Revised 23 February 2010

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10602048,10972187)

Corresponding author: TAO Jun-lin, junlintao@126.com

(责任编辑 丁峰)

混凝土高温动态压缩力学性能实验

作者: [陶俊林](#), [秦李波](#), [李奎](#), [刘丹](#), [贾彬](#), [陈小伟](#), [陈刚](#), [TAO Jun-lin](#), [QIN Li-bo](#),
[LI Kui](#), [LIU Dan](#), [JIA Bin](#), [CHEN Xiao-wei](#), [CHEN Gang](#)

作者单位: [陶俊林, 秦李波, 李奎, 刘丹, 贾彬, TAO Jun-lin, QIN Li-bo, LI Kui, LIU Dan, JIA Bin](#)(西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川, 绵阳, 621010), [陈小伟, CHEN Xiao-wei](#)(西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川, 绵阳, 621010; 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川, 绵阳, 621900), [陈刚, CHEN Gang](#)(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川, 绵阳, 621900)

刊名: [爆炸与冲击](#) [ISTIC](#) [EI](#) [PKU](#)

英文刊名: [EXPLOSION AND SHOCK WAVES](#)

年, 卷(期): 2011, 31(1)

参考文献(17条)

1. [过镇海;时旭东](#) [钢筋混凝土高温的高温性能及其计算](#) 2003
2. [《工程材料实用手册》编辑委员会](#) [工程材料实用手册](#) 2002
3. [李卫](#) [高温下混凝土的强度和变形性能的实验研究](#) 1994
4. [da Silva J C C;Martelli C;Kalinowski H J](#) [Dynamic analysis and temperature measurements of concrete cantilever beam using fibre Bragg gratings](#) 2007(01)
5. [Wang Y C;Wong P M H;Kodur V](#) [An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer\(FRP\)and steel reinforcing bars at elevated temperatures](#) 2007
6. [覃丽坤;宋玉普;王玉杰](#) [高温对混凝土力学性能影响的试验研究](#)[期刊论文]-[混凝土](#) 2004(5)
7. [刘利先;吕龙;刘铮](#) [高温下及高温后混凝土的力学性能研究](#)[期刊论文]-[建筑科学](#) 2005(03)
8. [Youssef M A;Moftah M](#) [General stress-strain relationship for concrete at elevated temperatures](#) 2007
9. [Arioz O](#) [Effects of elevated temperatures on properties of concrete](#)[外文期刊] 2007(08)
10. [Sancak E;Sari Y D;Simsek O](#) [Effects of elevated temperature on compressive strength and weight loss of the light-weight concrete with silica fume and superplasticizer](#)[外文期刊] 2008(08)
11. [Tanyildizi H;Coskun A](#) [Performance of lightweight concrete with silica fume after high temperature](#)[外文期刊] 2008(10)
12. [施绍裘;王永忠;王礼立](#) [国产C30混凝土考虑率型微损伤演化的改进Johnson-Cook强度模型](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2006(增刊1)
13. [白以龙](#) [材料与结构的动态力学性能响应](#) 2005
14. [Forquina P;Garyb G;Gatuingt F](#) [A testing technique for concrete under confinement at high rates of strain](#) 2008
15. [Li Q M;Meng H](#) [About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test](#) 2003
16. [Grote D L;Park S W;Zhou M](#) [Dynamic behavior of concrete at high strain rates and Pressures:I. Experimental characterization](#)[外文期刊] 2001(9)
17. [Zhao H A](#) [study on testing techniques for concrete-like materials under compressive impact loading](#) 1998