文章编号:1000-5773(2013)03-0417-06

高温下混凝土冲击加载试验研究*

李志武[1],许金余[1,2],戴双田[3],白二雷[1],高志刚[1]

(1.空军工程大学工程学院机场建筑工程系,陕西西安 710038;
2.西北工业大学力学与土木建筑学院,陕西西安 710072;
3.成都军区空军勘察设计院,四川成都 610041)

摘要:在传统的分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar,SHPB)装置的基础上,通过加装管式电阻炉等手段,获得了一套用于测量材料在高温下动态压缩力学性能的SHPB系统,并对200～800 ℃高温下混凝土进行了冲击加载试验,得到了应力-应变关系曲线。研究结果表明,该高温SHPB试验系统可用于研究高温下混凝土的动力特性;混凝土在不同温度下的动态抗压强度、峰值应变随着弹速的增加都有一定程度的提高;高温对混凝土动力特性影响显著,随着温度的提高,峰值应变随之增加,而动态抗压强度呈现先增后微降、600 ℃后迅速下降的趋势。

关键词:混凝土;高温;分离式霍普金森压杆(SHPB);动力特性
中图分类号:O347.3;TU528.1 **文献标识码**:A

1 引 言

自混凝土问世以来,由于其易成型、后期强度高、造价低廉等诸多优点,被人们广泛应用于民用建筑和军事工程中。这些工程结构除要承受正常环境下的荷载外,同时有可能承受一些特殊情况下的荷载,比如爆炸荷载将使材料承受高温和冲击的共同作用,比如火灾中建筑的垮塌将对处于高温环境中的下层建筑产生冲击作用,这些作用都将对构筑物产生巨大的影响,因此对混凝土在这种环境中的力学性能研究显得特别重要。但是目前关于这方面的研究还很少,中国工程物理研究院建立了一套用于高温试验的分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar,SHPB)系统[1],贾彬等利用这套系统,采用微波炉加热试件、石棉包裹保温的办法,研究了混凝土在高温下动态力学特性[2-3]。采用微波炉加热可以克服混凝土热惰性的特点,使试件内外同时加热,但与混凝土在实际环境中的受热差别较大,而石棉包裹保温则只能实现近似的高温实时打击。

本研究采用箱式电阻炉对试件进行批量加热,更接近于混凝土承受高温的实际情况。采用管式电阻炉则可以实现对试件的精确恒高温打击,操作性更强。并以SHPB试验装置为主体设备,完成了混凝土在常温以及200、400、600、800 ℃高温下的冲击压缩试验。

2 试 验

2.1 原材料及配合比

水泥,42.5R级的普通硅酸盐水泥,陕西耀县水泥厂生产;粉煤灰,韩城第二发电厂的一级粉煤灰;硅灰,霖源微硅灰有限公司生产。骨料,灞河中砂,细度模数为2.8;泾阳县石灰岩碎石(5～10 mm,15%;

* **收稿日期**:2011-07-06;**修回日期**:2011-12-11
基金项目:国家自然科学基金(51078350);陕西省自然科学基金(2010JQ6011)
作者简介:李志武(1986－),男,硕士研究生,主要从事防护工程材料研究.E-mail:leezhiwu@163.com

10～20 mm,85%)。外加剂,广州建宝新型建材有限公司生产的 FDN 高效减水剂。基体强度设计为 C50,具体配合比见表 1,测得 28 d 标准立方体平均抗压强度为 60.45 MPa,达到设计要求。

2.2 试件制作

表 1 C50 配合比

Table 1 Mix proportions of C50 concrete (kg/m^3)

Water	Cement	Fly ash	Silica fume	Sand	Gravel	FDN
180	375	125	25	690	1 030	5

将长度为 1 000 mm、直径为 100 mm 的钢质圆柱体模具刷油,内垫厚度为 1 mm的聚酯薄膜,以防止粘模具。将新拌的混凝土分两次浇筑到模具中,采用插入式振捣棒振捣。室内放置 1 d 后拆模并放入养护室,标准养护条件下(温度(20±2)℃,相对湿度 95%以上)养护 28 d 后,采用岩石切割机将长圆柱体试件切割成厚度为 50 mm 的试件,之后用双端面磨石机打磨混凝土试件的两个端面,最终得到尺寸约为∅98 mm×48 mm 的圆柱体试件。

2.3 高温 SHPB 技术

分离式霍普金森压杆(SHPB)装置是目前公认的测量材料动态力学性能的主要手段之一,对于混凝土而言,由于粗骨料粒径较大且本身存在裂缝、孔洞等原始缺陷,因此必须采用大直径的压杆。冲击试验在直径为 100 mm 的 SHPB 系统上完成,系统压杆由弹性模量为 210 GPa 的合金钢制成。为获得混凝土可靠的应力-应变关系,采用波形整形技术。李为民等[4]的研究表明,波形整形技术不但可以过滤加载波中由于直接撞击引起的高频分量,减少波形在长距离传播中的弥散;而且可以使加载波变宽,上升沿变缓,从而延长加载时间,有利于实现试件中应力的均匀性,同时也有利于实现近似恒应变率加载。通过前期的研究,本研究采用厚度为 1 mm、直径为 20～30 mm 的 H62 黄铜波形整形器。

试件加热采用箱式电阻炉,可一次对 18 个试件进行加热。升温速率为 10 ℃/min,从室温开始升温,达到目标温度后,恒温 6 h,以使试件内外温度一致,达到稳态温度场[5]。在输入杆与透射杆之间加装一管式电阻炉(图 1),炉子内径为 120 mm,长度为 500 mm。

试验前,用石棉制成的两个塞子将两端塞上,加热使炉内温度达到目标温度。待箱式炉内试件加热完成后,两人配合将试件转移至管式炉中,将两端重新塞上并保持大概 2 min,以补偿放置试件的过程中产生的温度下降,并利用这段时间进行发射装置充气、计算机设置参数等工作。然后将管式炉推到预定位置,将输入杆和透射杆缓缓推入管式炉中,杆端与试件接触后,人员迅速撤离,并实施冲击加载。冲击完成后,将输入杆、透射杆从炉内迅速抽出,并用湿毛巾擦拭杆端,以降低杆端温度。同时,由于冲击加载时间很短,压杆置于高温环境中只有短短几秒钟,因此对应力波在杆中传播的影响可以忽略。

为进一步探索管式炉对 SHPB 测试结果的影响,根据试件在打击前的放置方式,对比研究了细绳悬挂(a)、贴于炉壁(b)、炉壁试件之间加硅酸盐卷毡制成的垫条(c)等 3 种试件放置方式下的测试结果。其中,细绳悬挂放置试件如图 2 所示,贴于炉壁是指直接将试件放置于管式炉内,最后一种放置方式则是采用由硅酸盐卷毡制成的垫条裹住试件下部,以起到将试件垫高等作用,垫条长度以裹住试件圆周的三分之一为宜,宽度要小于试件厚度。

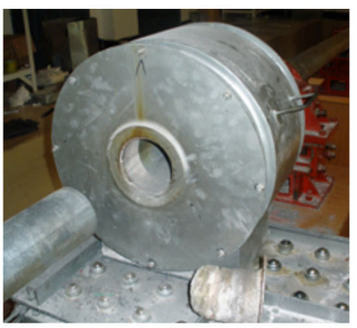


图 1 管式电阻炉

Fig. 1 Tubular electric furnace



图 2 细绳悬挂试件

Fig. 2 Specimen hanged with a thin rope

本研究采用三波法[6]处理数据，通过调节 SHPB 系统发射装置的气压，获得了不同弹速下混凝土的应力-应变关系(图 3)。从图 3 可以看出，在常温情况下，采用细绳悬挂方式得到的应力-应变关系曲线光滑，并且能得到完整的下降段(见图 3(a))；直接贴壁方式造成曲线在峰值应力附近产生严重震荡(图 3(b))；加上硅酸盐卷毡垫片后，曲线上升段光滑，只是在下降段会出现一定震荡(图 3(c))。

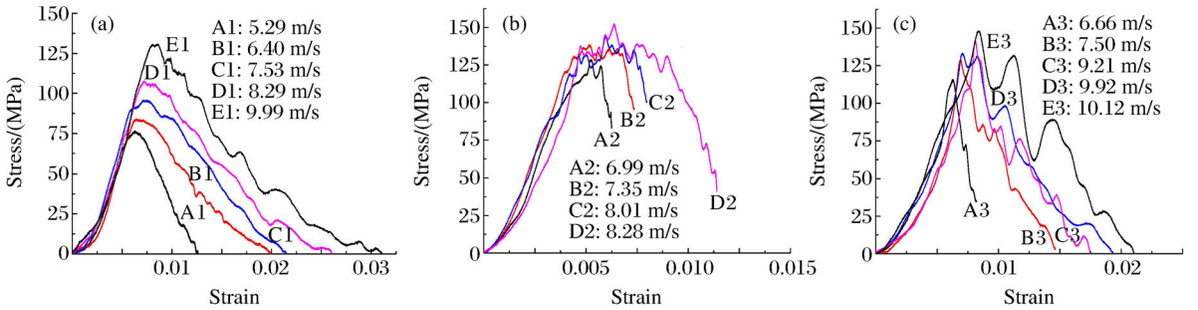


图 3　常温下混凝土的动态应力-应变关系曲线

Fig. 3　Dynamic stress-strain curves of concrete at room temperature

究其原因，在于细绳悬挂只是提供试件一个最初的支撑，在加载过程中试件的支撑主要是靠入射杆与透射杆的挤压，试件破碎后将自由下落，细绳将不起任何作用，因此细绳悬挂对测试结果影响最小，整条应力-应变曲线也就非常光滑。采用试件直接贴壁的方式，首先是试件与压杆无法完全对中，更重要的是将造成炉壁对试件贴壁部分侧向变形的约束，一开始试件变形较小，影响不明显，当试件达到峰值应变附近时，影响将变得显著，从而导致应力-应变曲线在峰值应变附近振荡严重。采用在试件下面加垫条的方式，不仅可以较好地解决试件对中的问题，而且由于硅酸盐卷毡质地柔软，试件贴壁部分的侧向变形将不受影响，因此曲线上升段光滑，而曲线下降段稍有振荡则是因为破碎后的小试块因无法飞溅出去而拥堵在炉内所致。

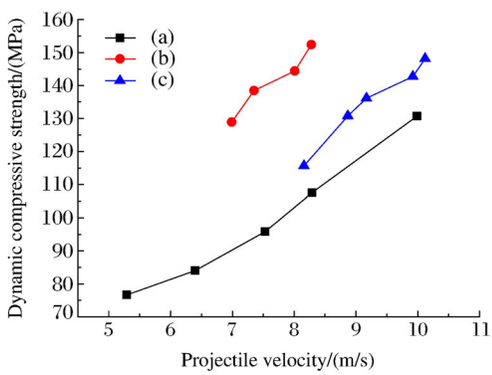


图 4　弹速与动态抗压强度的关系

Fig. 4　The relation between dynamic compressive strength and projectile velocity

为进一步分析其影响，得到 3 种方式下动态抗压强度与弹速关系如图 4 所示。从图 4 可以看出，随着弹速的增加，动态抗压强度迅速增加，3 者增加趋势类似，但是在同一弹速下，试件贴壁时的动态抗压强度远高于另外两者(图 4 中曲线(b)；而加上垫片后，动态抗压强度只是略高于细绳悬挂时的动态抗压强度(图 4 中曲线(c)，说明垫条可以明显减小管式炉对 SHPB 测试结果的不利影响，该系统可用来研究高温下混凝土的动态抗压强度、峰值应变等动力特性。

综上所述，通过在传统的 SHPB 系统中加装管式电阻炉，可以实现对材料实时高温下的冲击加载；通过在试件与炉壁之间加一硅酸盐卷毡垫片，可以获得混凝土在高温下较为可靠的应力-应变关系及其力学特性。

3　高温实验结果及分析

基于高温 SHPB 技术，研究了混凝土在 200、400、600、800 ℃高温作用下的动态压缩力学性能，图 5 为混凝土在不同弹速冲击下的高温应力-应变关系曲线，从图 5 中可以看出，高温下的应力-应变关系曲线并不如常温下的光滑，但总体上仍然具有较好的规律性。

图 6、图 7 分别是高温下混凝土的动态抗压强度、峰值应变与弹速之间的关系。从图 6 和图 7 可以

看出，动态抗压强度、峰值应变随着弹速的增加都有一定程度的提高；在同一弹速下，200 ℃时混凝土动态抗压强度得到了提高，400 ℃时强度有所下降但基本上仍高于常温，600 ℃时强度继续下降但只是略低于常温强度，而在 800 ℃时混凝土强度显著下降并远低于常温强度。峰值应变随着温度的提高而逐渐增加，并且在 400 ℃后提高幅度加大。根据动态抗压强度、峰值应变随着弹速的变化趋势，以弹速在 9 m/s时为例，从常温到 800 ℃ 5 个温度下的动态抗压强度与峰值应变分别为 129.83、154.04、135.43、117.79、54.81 MPa 和 0.007 1、0.010 5、0.012 4、0.017 1、0.026 1，与常温强度和峰值应变比值分别为 100%、117%、104%、91%、42%和 100%、148%、175%、241%、368%。

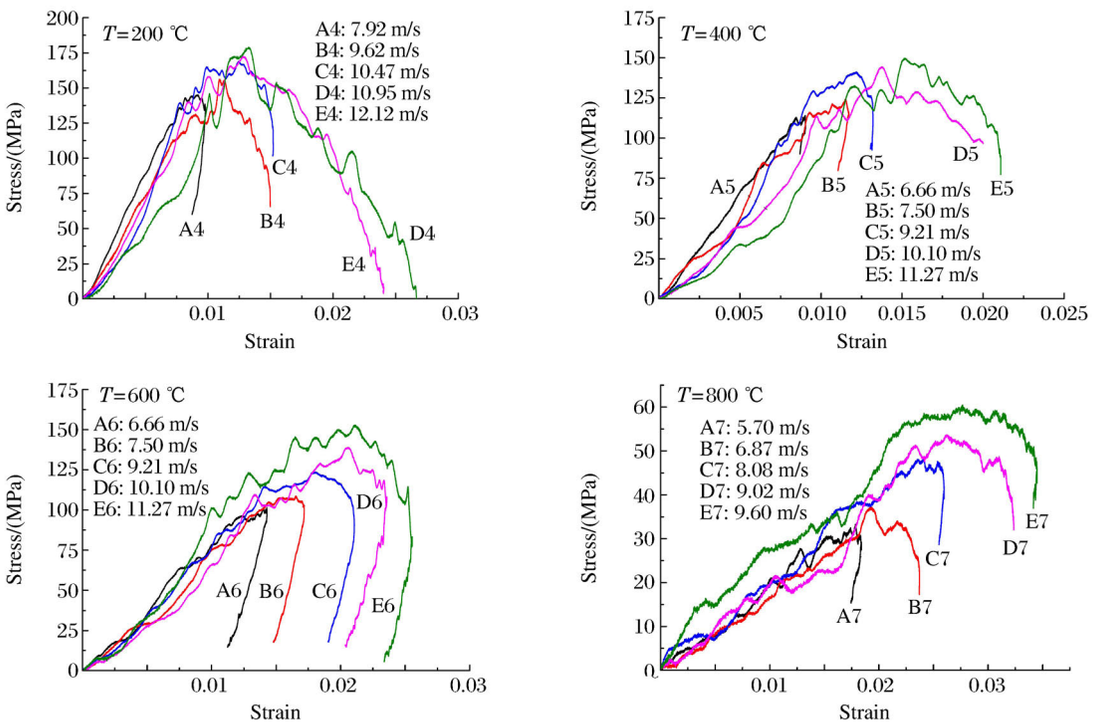


图 5 高温下混凝土动态应力-应变关系曲线

Fig. 5 Dynamic stress-strain curves of concrete at high temperature

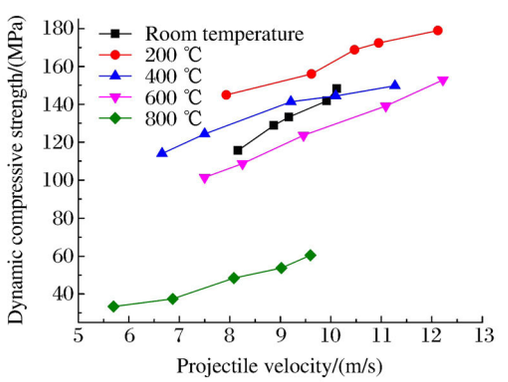


图 6 不同温度下动态抗压强度与弹速关系

Fig. 6 The relation between dynamic compressive strength and projectile velocity at different temperatures

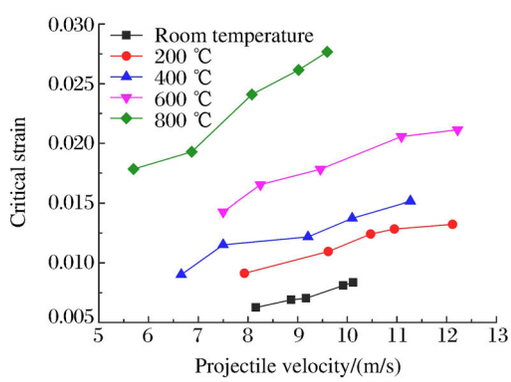


图 7 不同温度下峰值应变与弹速关系

Fig. 7 The relation between critical strain and projectile velocity at different temperatures

由以上分析可知，高温对于混凝土动力特性影响显著。本研究得到的混凝土在高温下的动态力学特性与以往关于混凝土在高温下静、动力特性的研究[2,7-9]在总体规律上类似，但也存在一些差异，主要

体现在两个方面:(1) 高温下混凝土静力抗压强度在 400 ℃以后迅速下降,而动态抗压强度在 600 ℃时只是略低于常温强度,之后才迅速下降;(2) 在 800 ℃高温下,混凝土静力抗压强度约为常温强度的 20%[7-9],而动态抗压强度虽有显著下降,但在同一弹速下仍具有常温时 40%左右的强度。这主要是因为虽然高温使混凝土损伤加剧,强度下降,但同时低强度混凝土动力增长效应也更明显[10],这也是动态加载与静态加载的不同之处。另外,从图 4 中可以看出,动态抗压强度从 600 ℃到 800 ℃下降明显,有可能在 600～800 ℃之间存在一临界温度,超过这一温度,强度就迅速下降。也有可能是从 600 ℃到 800 ℃,只是强度下降幅度在逐步增加而已,还需要进一步研究探索。

4　结　论

设计了一套高温 SHPB 试验技术,对高温下混凝土的动态压缩力学性能进行了初步探索,主要结论有:

(1) 改进的高温 SHPB 试验装置可以获得高温下混凝土可靠的动态压缩应力-应变关系,可用来分析高温下混凝土的动力特性;

(2) 混凝土在不同温度下的动态抗压强度、峰值应变随着弹速的增加都有一定程度的提高;

(3) 高温对混凝土动力特性影响显著。随着温度的提高,峰值应变随之增加,而动态抗压强度呈现先增后微降、600 ℃后再迅速下降的趋势。

References:

[1] Zhang F J, Xie R Z, Tian C J. Auto-assembling technique used in high temperature experiment of SHPB [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(2): 281-284. (in Chinese)
张方举,谢若泽,田常津. SHPB 系统高温实验自动组装技术 [J]. 实验力学, 2005, 20(2): 281-284.

[2] Jia B, Tao J L, Li Z L. SHPB test for dynamic mechanical performances of concrete at high temperatures [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(S2): 208-212. (in Chinese)
贾　彬,陶俊林,李正良. 高温混凝土动态力学性能的 SHPB 试验研究 [J]. 兵工学报, 2009, 30(S2): 208-212.

[3] Jia B, Li Z L, Tao J L, et al. SHPB test on high temperature dynamical mechanical behavior of concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(21): 34-37. (in Chinese)
贾　彬,李正良,陶俊林,等. 混凝土高温动态特性 SHPB 试验研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(21): 34-37.

[4] Li W M, Xu J Y. Pulse shaping techniques for large-diameter split Hopkinson pressure bar test [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(3): 350-355. (in Chinese)
李为民,许金余. 大直径分离式霍普金森压杆试验中的波形整形技术研究 [J]. 兵工学报, 2009, 30(3): 350-355.

[5] Yan H Q. Mechanical properties of concrete after high temperature exposure [D]. Chengdu: Sichuan University, 2004: 33. (in Chinese)
阎慧群. 高温(火灾)作用后混凝土材料力学性能研究 [D]. 成都:四川大学, 2004: 33.

[6] Song L, Hu S S. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 368-373. (in Chinese)
宋　力,胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 368-373.

[7] Hu H T, Dong Y L. Experimental research on strength and deformation of high strength concrete at elevated temperature [J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(6): 44-47. (in Chinese)
胡海涛,董毓利. 高温时高强混凝土强度和变形的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2002, 35(6): 44-47.

[8] Ding F X, Yu Z W. Study on the compressive mechanical properties of concrete and concrete-filled circular steel tubular stub columns at high temperature [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(6): 9-14. (in Chinese)
丁发兴,余志武. 恒高温下混凝土及钢管混凝土受压力学性能研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(6): 9-14.

[9] Khoury G A. Effect of fire on concrete and concrete structures [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2000, 2(4): 429-447.

[10] Wu X T. Study on dynamic properties of steel fiber reinforced high strength concrete [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006: 59-60. (in Chinese)
巫绪涛. 钢纤维高强混凝土动态力学性质的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006: 59-60.

Experimental Study on Concrete Exposed to High Temperature under Impact Loading

LI Zhi-Wu[1], XU Jin-Yu[1,2], DAI Shuang-Tian[3], BAI Er-Lei[1], GAO Zhi-Gang[1]

(1. *The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an* 710038, *China*;
2. *Department of Civil Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710072, *China*;
3. *Chengdu Military Region Air Force Survey and Design Institute, Chengdu* 610041, *China*)

Abstract: Based on the traditional spilt Hopkinson pressure bar (SHPB) apparatus, a SHPB system for testing dynamic compressive properties of materials exposed to high temperature was established after adding a tubular electric furnace, and the dynamic compressive stress-strain curves of concrete at 200～800 ℃ were measured using the system. The results show that the SHPB experimental system can be used to test the dynamic properties of concrete exposed to high temperature; Dynamic compressive strength and critical strain of concrete at different temperatures increase with the rise of projectile velocity; Effects of high temperature on dynamic properties of concrete are remarkable: the critical strain increases with the temperature increasing, dynamic compressive strength increases firstly and then decreases slightly, and decreases rapidly after 600 ℃.

Key words: concrete; high temperature; spilt Hopkinson pressure bar (SHPB); dynamic property