

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.05.003

# 膨胀剂对早龄期钢纤维混凝土动态压缩性能影响试验分析

黄伟<sup>1,2</sup>, 徐桂丽<sup>3</sup>

1. 淮南联合大学 建筑工程系, 安徽 淮南 232038;
2. 安徽理工大学 矿山地下工程教育部工程研究中心, 安徽 淮南 232001;
3. 淮南市路桥开发有限公司, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 采用 SEM 和 XRD 微观试验方法研究 HCSA 膨胀剂成份, 利用分离式 SHPB 试验技术, 对不同膨胀剂掺量下 3 d 和 7 d 龄期钢纤维混凝土进行动态单轴压缩性能试验。膨胀剂掺量为 8% 时, 补偿收缩钢纤维混凝土峰值动态抗压强度最高; 3 d 龄期混凝土应力应变曲线有明显的分段性, 主要分为弹性压缩阶段、弹塑性压缩阶段和塑性破坏阶段; 7 d 龄期混凝土应力应变曲线中峰值应力凸显; 随着冲击气压的增大, 试件破坏的离散性增强, 但掺入钢纤维后, 利用其空间约束效应, 使得混凝土破碎块度的尺寸较大。

**关键词:** HCSA 膨胀剂; SHPB; 钢纤维混凝土; 压缩性能

中图分类号: TU528.572

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)05-0009-05

## Experimental Study on the Dynamic Compression Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete at Eearly-age Influenced by Different Dosage of Expansive Agent

HUANG Wei<sup>1,2</sup>, XU Guili<sup>3</sup>

1. Department of Civil Engineering, Huainan Union University, Huainan, Anhui 232038, China;
2. The Mine Underground Engineering Research Center of the Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;
3. Huainan Road and Bridge Development Co., Ltd., Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** The microscopic testing method of SEM and XRD was used to study the composition of HCSA expansive agent and the compatibility between the expansive agent and ordinary Portland cement hydration reaction, in order to prepare shrinkage compensation steel fiber reinforced concrete (SCSFRC). Uniaxial compression test was conducted on the steel fiber reinforced concrete specimens of 3 d and 7 d with different dosage of expansive agent by using separate SHPB techniques. The dosage of expansive agent has certain effects on the dynamic compressive strength of SCSFRC, which peaks when the expansive agent content reaches 8%. Stress-strain curves of the three kinds of specimens are unanimous. The curve of the 3 d specimen is sectional, namely the elastic compression stage, elastic-plastic compression stage and plastic failure stage; whereas the curve of the 7 d specimen presents a more obvious peak stress. With the increment of the impact pressure, the specimen failure becomes more dispersive, while after the addition of steel fiber, the broken pieces of the specimen becomes bigger due to the space restraint effect of the steel fiber.

**Keywords:** HCSA expansive agent; SHPB; steel fiber reinforced concrete; compression performance

补偿收缩混凝土是在普通素混凝土中添加一定掺量的外加剂(膨胀剂)配制而成,水化反应产物有钙矾石和氢氧化钙,造成混凝土产生体积微膨胀。

根据混凝土膨胀应力情况,膨胀混凝土分划分补偿收缩混凝土和自应力混凝土,补偿收缩混凝土指的是自应力大小为 0.2 MPa ~ 1.0 MPa 的混凝土<sup>[1]</sup>,该

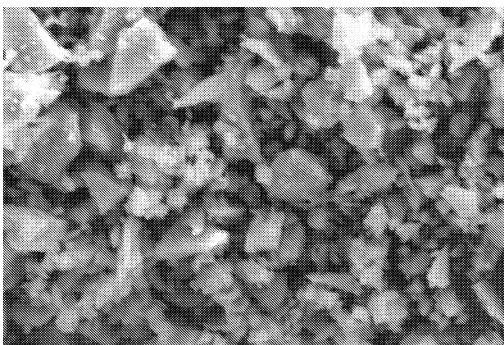
类混凝土具有补偿混凝土干缩和密实作用。钢纤维可以改善混凝土的韧性,控制混凝土初始裂缝发展,增强混凝土的冲击性能。目前煤矿巷道支护混凝土由于施工掘进经常收到爆破荷载冲击作用,尤其是施工班组连续作业,要求支护材料具有早龄期抵抗冲击的能力,另外为了改善巷道的工作条件,要求支护混凝土能够具有防渗效果,上述两种材料组合具有明显的复合叠加效应,膨胀剂与水泥水化产物可以减轻混凝土自收缩,提高混凝土密实度,同时利用钢纤维的空间分布效应,限制了膨胀剂水化产物产生的过度膨胀和混凝土干缩,这种叠加效应,可以显著提高混凝土结构在冲击环境下的使用寿命。

对于膨胀剂和钢纤维对混凝土性能研究较多<sup>[2-4]</sup>,大部分通过混凝土静态力学性能试验来分析其优缺点。对于两种材料组合的动态性能研究甚少,随着 SHPB 试验技术成熟应用,国内外利用 SH-PB 技术各种材料如水泥砂浆<sup>[5]</sup>、混凝土<sup>[6-7]</sup>和钢纤维混凝土<sup>[8-10]</sup>等动态性能广泛开展研究,积累了大量的试验数据,有利于水泥制品类材料在抗冲击、抗爆炸等工程中的应用。结合矿井井巷施工特点和支护材料要求,提出补偿收缩钢纤维混凝土支护结构材料,开展材料的早龄期动态力学性能,有助于推广该类复合材料在冲击环境下的应用程度。

## 1 胶凝材料微观试验及补偿收缩机理

### 1.1 试验方法和试验仪器

材料的组成及其结构特征对混凝土材料的宏观性质影响较大,通过微观试验手段对 P. O42.5 水泥



(a) 普通硅酸盐水泥

和 HCSA 膨胀剂进行测试,可以清楚分析水泥和膨胀剂微观形貌、晶体结构和矿物成份。

为了分析两种材料的颗粒大小、晶体行貌及其微观结构特征,采用 S-3000N 扫描电子显微镜和 XD-3 射线衍射仪对两种材料进行微观实验。SEM 试样的制作,首先将把试样放置在仪器盘中,然后放置在干燥的真空环境中镀一层银膜,最后把试样放入 S-3000N 扫描仪器中进行试验;XRD 试验试样制作:先把粉末样品放入干净的样品板浅槽中,压实后放入 XD-3 试验机中进行 XRD 试验。

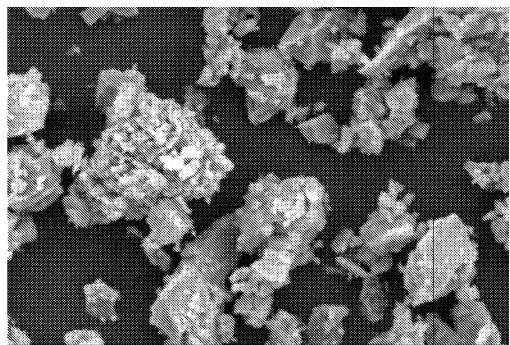
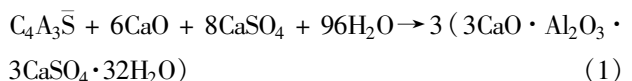
### 1.2 微观试验结果分析

微观试验结果见图 1 和图 2。从图 1 放大 3 000 倍的 SEM 照片可以看出,普通硅酸盐水泥微观颗粒大小比较均匀,近体形貌比较单一,颗粒粒径基本在  $2\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$ 。HCSA 膨胀剂从 SEM 照片看颗粒大小、矿物晶体与水泥差不多。

图 2 为 XRD 试验结果,普通硅酸盐水泥中硅酸三钙和硅酸二钙的衍射峰较强,石膏的衍射峰值较弱,表明硅酸盐水泥中硅酸三钙和硅酸二钙结晶物相对较多,石膏结晶物较少,与硅酸盐水泥水化反应的一般特征基本一致<sup>[11]</sup>。HCSA 膨胀剂中氧化钙结晶物质衍射峰值较强,结晶物质较多,说明该物质属于氧化钙类膨胀剂。

### 1.3 补偿机理分析

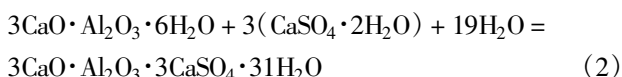
HCSA 膨胀剂水化反应方程式如下:



(b) HCSA 高性能膨胀剂

图 1 水泥与膨胀剂 SEM 试验结果

普通硅酸盐水泥水化反应产物有水化铝酸钙,水化铝酸钙与石膏可进一步发生反应,生成水化硫铝酸钙,具体如化学反应方程式:



根据上述两种材料的水化过程可以看出,两种材料具有相同水化产物,膨胀剂水化产物可以促进混凝土胶凝材料的发展速度,两者具有较好的适宜性。

从上面分析可知,早期湿养环境下,膨胀剂水化反应产生钙矾石,使得混凝土内部产生一定微膨胀,

从而抵消混凝土早期干缩,达到控制混凝土早期裂

缝和增强内部密实性能的作用。

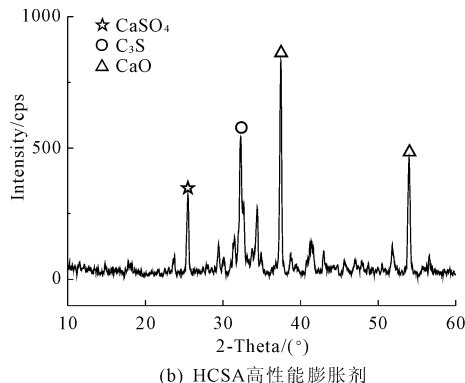
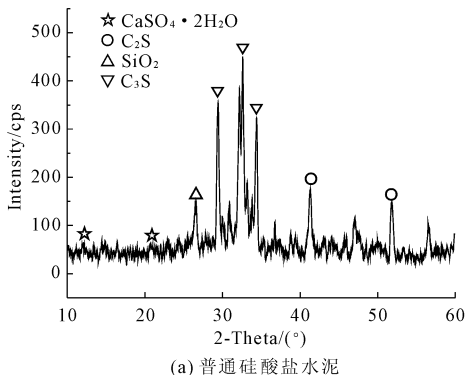


图 2 水泥与膨胀剂 XRD 试验结果

## 2 补偿收缩钢纤维混凝土 SHPB 试验

### 2.1 试验原理及装置

霍普金森压杆实验技术的雏型是由 Hopkinson 提出,当初仅用于测量冲击荷载下的压力脉冲波形。1949 年, Kolsky 建立分离式霍普金森压杆 (SH-PB)<sup>[12]</sup>,将试件放入两根杆中间,来测量试件应力应变曲线。经过后期专家和学者的研究,目前已经形成比较完整的 SHPB 试验技术,由于该类方法操作简便、测量精巧,使得许多学者深入讨论和广泛应用。试验利用安徽理工大学入射杆直径为 74mm 的 SHPB 实验装置开展。

### 2.2 试样制作与方案设计

根据补偿收缩混凝土规程和钢纤维混凝土规范要求设计补偿收缩混凝土配合比。钢纤维采用压痕型波纹型,规格为 0.3 mm × 1.0 mm × 35 mm,长径比 48.5 mm,抗拉强度 ≥ 600 MPa,钢纤维体积掺量为 1.0%,通过改变膨胀剂掺量进行混凝土设计配合比分组,具体见表 1。混凝土试样采用非标准专用试模浇筑养护打磨而成。

表 1 配合比一览表

试验编号	材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )				膨胀剂掺量/%
	水泥	水	砂子	石子	
BGC-0	440.0	220	760	980	0.0
BGC-1	413.6	220	760	980	6.0
BGC-2	404.8	220	760	980	8.0
BGC-3	396.0	220	760	980	10.0

### 2.3 试验结果分析

#### 2.3.1 试件应力应变曲线对比

利用二波法<sup>[13]</sup>处理试验数据,图 3 为四种方案

SHPB 试验结果,考虑混凝土试件的离散型较大,本文取应变率基本接近的单组数据进行对比分析。

从图 3 中可以看出补偿收缩混凝土 3 d 和 7 d 龄期单轴冲击压缩性能试验应力应变曲线的整体变化趋势基本一致。3 d 龄期混凝土试件应力与变形之间呈现三段式关系,第一段为弹性阶段,应力随变形呈现线性变化;第二段为弹塑性变形阶段,应力基本没有增长,应变持续增大,也反映了 3 d 龄期混凝土的早期刚度小,变形大的特点;第三段为塑性破坏阶段,这是钢纤维混凝土显著特征,应力逐渐减小,应变保持一定范围,变化幅度比较小,显示钢纤维对混凝土的增韧能力。7 d 龄期混凝土试件的应力-应变曲线有一定的峰值凸显,由于试件刚度增大所致。

不掺膨胀剂时,3 d 和 7 d 龄期混凝土典型试件的动态抗压强度表现最好,分别达到 36.45 MPa 和 56.22 MPa,相对普通混凝土而言,膨胀剂对混凝土动态抗压强度没有增强作用。

但对补偿收缩钢纤维混凝土,在应变率基本相同的情况下,3 d 龄期 BGC-1、BGC-2 和 BGC-3 混凝土典型试件对应混凝土动态抗压强度峰值分别为 29.43 MPa、32.05 MPa 和 28.63 MPa;7 d 龄期 BGC-1、BGC-2 和 BGC-3 混凝土典型试件对应混凝土动态抗压强度峰值分别为 54.18 MPa、55.81 MPa 和 51.79 MPa。从结果分布来看,膨胀剂掺量对钢纤维混凝土动态抗压强度有一定影响,幅度不明显,从数据定量分析上看,钢纤维掺量为 1%、膨胀剂掺量为 8% 时,补偿收缩钢纤维混凝土动态抗压强度效果达到最佳。

#### 2.3.2 试件破坏特征

图 4 为典型试件 3 d 和 7 d 龄期时,在三种气压加载作用下的冲压压缩破坏特征,从图 4 中可以看

出,随着冲击气压的增大,试件的离散型明显增强,龄期对混凝土破坏特征影响较大,冲击气压在 0.4 MPa 时,3 d 龄期典型试件破坏比较严重,整个试件截面全面开裂,而 7 d 龄期典型试件基本没有破碎,只有少量碎片;气压在 0.8 MPa 时,3 d 龄期典型试

件,基本完全破碎,破碎块体比较均匀且比较小,钢纤维与混凝土之间大部分完全分离,7 d 龄期典型试件,试件破碎程度也显著增大,破碎块体大小不均匀,有部分混凝土试块尺寸较大,表明水泥胶凝材料与钢纤维之间具有一定的粘结力造成的。

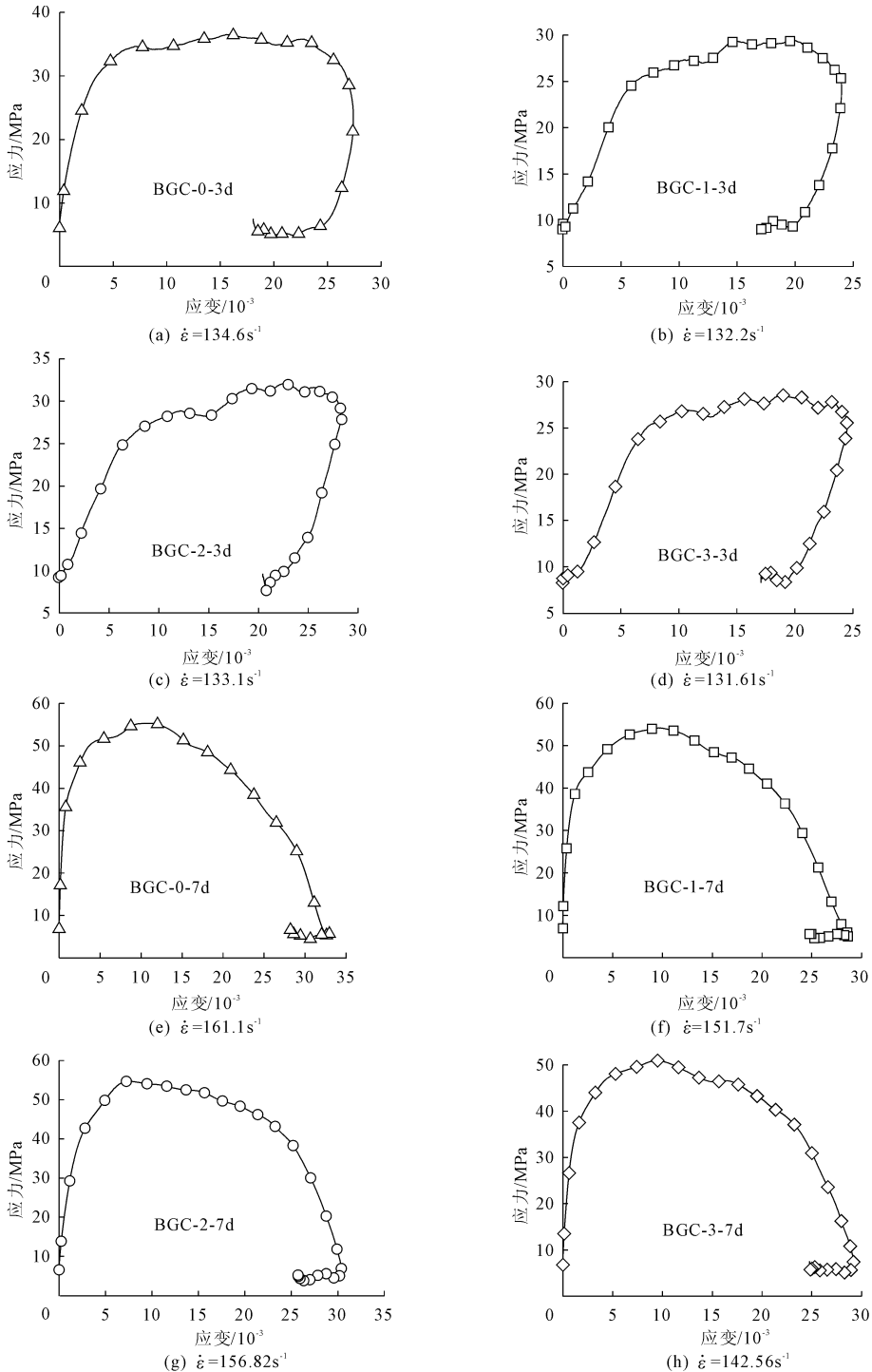


图 3 补偿收缩钢纤维混凝土试件 SHPB 应力 - 应变曲线

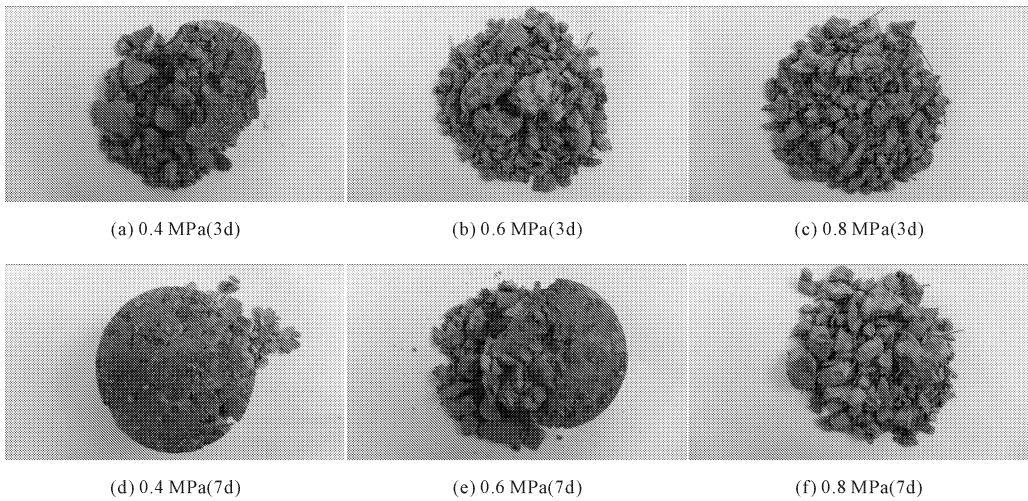


图 4 典型试件破坏图

### 3 结 论

(1) 通过微观试验可以了解水泥和膨胀剂内部结构和矿物成份,分析两种材料的水化反应,得出普通硅酸盐水泥和膨胀剂水化产物一致,两者之间具有较好的适宜性。

(2) 利用 SHPB 实验技术,分析 3 d 和 7 d 龄期补偿收缩钢纤维混凝土的动态抗压强度及其应力与应变变化趋势,得出膨胀剂掺量对动态抗压强度产生一定影响,不掺膨胀剂时,钢纤维混凝土的动态抗压强度最高,表明膨胀剂对早龄期钢纤维混凝土的动态抗压强度有一定的减弱作用;对于补偿收缩钢纤维混凝土而言,膨胀剂掺量在 8%、钢纤维掺量 1%时,混凝土动态抗压强度峰值表现最高,与静态补偿收缩混凝土抗压强度表征一致。

(3) 根据冲击试验试件破坏特征可以看出,补偿收缩钢纤维混凝土的整体性强,冲击气压较低时,混凝土结构基本没有破碎,随着冲击气压增大,试件离散性加大,但是破碎块度由于钢纤维的连接作用,试块尺寸较大。

#### 参考文献:

[1] 吴中伟,张鸿直.膨胀混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1990.  
 [2] 方张平,马芹永.硫酸盐侵蚀下矿用补偿收缩钢纤维混凝土压拉性能试验研究[J].煤炭工程,2011(12):109-111.

[3] 崔朋勃,马芹永.膨胀剂对喷射补偿收缩钢纤维混凝土力学性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2010(5):45-47.  
 [4] 黄 伟.矿井补偿收缩钢纤维混凝土性能试验研究与工程应用[D].淮南:安徽理工大学,2011.  
 [5] 施绍裘,王礼立.水泥砂浆石在一维与准一维应变状态下动态力学响应的比较和讨论[J].岩石力学与工程学报,2001,20(3):327-331.  
 [6] 胡功笠,刘荣忠,齐爱东,等.混凝土材料的 SHPB 试验及动态性能分析[J].南京理工大学学报,2005,29(4):420-424.  
 [7] 焦楚杰,孙 伟,高培正,等.钢纤维混凝土抗冲击试验研究[J].中山大学学报:自然科学版,2005,44(6):41-44.  
 [8] 梁济丰,吕 磊,王 峰.低温下钢纤维混凝土 SHPB 试验研究[J].混凝土与水泥制品,2013(10):43-47.  
 [9] 郑 晨,焦楚杰,张亚芳,等.钢纤维活性粉末混凝土 SHPB 试验研究[J].广州大学学报:自然科学版,2013,12(2):56-60.  
 [10] 严少华,李志成,王明洋,等.高强钢纤维混凝土冲击压缩特性试验研究[J].爆炸与冲击,2002,22(3):237-241.  
 [11] 李伏虎,马芹永.HCSA 膨胀剂对喷射混凝土微观结构的影响[J].矿冶工程,2012,32(4):5-7,12.  
 [12] Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proc Phys Soc, 1949,62:676-700.  
 [13] 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.