

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0142

## 混凝土类材料 SHPB 实验中确定应变率的方法\*

胡亮亮<sup>1</sup>, 黄瑞源<sup>1,2</sup>, 高光发<sup>1</sup>, 蒋 东<sup>2,3</sup>, 李永池<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094;

2. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027;

3. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

**摘要:** 由于混凝土类材料在 SHPB 实验中很难实现恒应变率加载, 为了确定非恒应变率加载下的实验数据所对应的应变率, 本文中针对不同强度 (C20, C45, C70) 和不同钢纤维含量 (0%, 0.75%, 1.50%, 4.50%) 的混凝土进行了 SHPB 实验。对实验得到的 30 组恒应变率加载下的数据进行了分析总结, 结果表明: 实验数据所对应的恒应变率与全段平均应变率之间存在一定的比值关系, 从而混凝土类材料 SHPB 实验数据所对应的应变率可以采用全段平均应变率的 1.38 倍来表征。通过对比非恒应变率加载和恒应变率加载下得到的应力应变曲线, 验证了该确定应变率方法的合理性, 并指出较短恒应变率加载下实验数据对应的应变率直接采用短平台段对应的应变率来表征是不合理的。

**关键词:** 混凝土; SHPB; 应变率效应; 动态力学行为

**中图分类号:** O347

**国标学科代码:** 1301575

**文献标志码:** A

混凝土类材料已被广泛应用于民用建筑及防御工事<sup>[1-3]</sup>, 它在爆炸冲击载荷作用下的动态力学性能和破坏机理, 对于民用建筑及防御工事的设计和防护具有重要指导意义<sup>[4-6]</sup>, 目前一般采用 SHPB 技术来研究不同应变率下混凝土类材料的动态力学性能<sup>[7-9]</sup>。混凝土作为一种脆性材料, 其破坏应变非常小, 通常只有千分之几, 而动态力学性能实验的加载时间又非常短, 产生的高应变率往往会引起试件的结构破坏而非材料破坏, 从而对 SHPB 技术在混凝土材料中的应用提出了挑战<sup>[10-12]</sup>。Frew 等<sup>[13]</sup> 针对波形整形技术, 在脆性材料 SHPB 实验中的应用展开研究, 认为应力均匀性问题相对比较容易解决, 同时指出恒应变率加载却很难实现。卢玉斌等<sup>[14]</sup> 对于脆性材料 SHPB 实验中实现近似恒应变率加载的必要性进行了讨论, 认为恒应变率加载实现难度较大。陶俊林等<sup>[15]</sup> 提出了两种 SHPB 方法来实现对金属材料的恒应变率加载, 但对于混凝土等脆性材料仍很难实现恒应变率加载。周子龙等<sup>[16]</sup> 认为加载应力和试样应力历程具有相同的变化规律时, 试样变形将处于恒应变率状态, 但是对于如何实现恒应变率加载并没有给出明确的方法。由于在 SHPB 实验中很难实现混凝土试件的恒应变率加载<sup>[17-19]</sup>, 部分学者通过采用变截面杆<sup>[20]</sup>、波形整形技术<sup>[21-22]</sup> 以及异形冲头法<sup>[23]</sup> 等对输入波形进行了优化, 从而实现了中低应变率下的恒应变率加载, 但是目前已有的方法仍很难实现混凝土试件在较高应变率下的恒应变率加载。因此, 如何处理非恒应变率加载下的实验数据, 并确定其对应的应变率, 就成为了一个迫切需要解决的问题。

为了确定混凝土类材料在 SHPB 实验中所对应的应变率, 本文中对 3 种不同强度和 4 种不同钢纤维含量的混凝土试件进行 SHPB 实验, 并针对实验得到的 30 组恒应变率加载下的实验数据进行归纳总结, 探索一种混凝土类材料 SHPB 实验中确定应变率的方法, 拟为处理非恒应变率加载下的实验数据并确定其对应的应变率提供合理的解决方法。

\* 收稿日期: 2018-04-26; 修回日期: 2018-06-22

**基金项目:** 国家自然科学基金 (11402266, 11502099, 11672138, 11772160);

装备预研基金 (61426040403162604005); 中央高校基本科研业务费专项 (30916011348);

中国空气动力研究与发展中心超高速碰撞研究中心开放基金 (20181203)

**第一作者:** 胡亮亮 (1995—), 男, 硕士研究生, 18362906302@163.com;

**通信作者:** 黄瑞源 (1984—), 男, 博士, 讲师, ryhuang@njjust.edu.cn。

### 1 试 件

试件为 3 种不同强度和 4 种不同钢纤维含量的混凝土。3 种不同强度混凝土材料配比见表 1, 利用设计模具浇铸, 尺寸为  $\varnothing 70 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ 。试件养护过程符合工程要求, 并利用磨床对两端面进行研磨, 其不平行度在 0.02 mm 以内, 试件最终长径误差在  $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。4 种不同钢纤维含量混凝土试件的制作采用二次合成法工艺, 基体强度为 C40, 坍落度为 160~200 mm。采用  $\varnothing 70 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$  的圆柱钢模浇筑并振动成型, 拆模后, 室温条件标准养护 28 d, 实验时混凝土龄期为 80 d 以上。钢纤维采用 0213 型微钢纤, 纤维直径  $d=0.2 \text{ mm}$ 、长度  $l=13 \text{ mm}$ (特征比  $l/d=65$ , 外形平直光洁)。钢纤维混凝土的实际配合比见表 2。

表 1 不同强度混凝土试件配合比

Table 1 Mixture ratio of concrete specimen with different strengths

混凝土	石子/(kg·m <sup>-3</sup> )	砂/(kg·m <sup>-3</sup> )	水/(kg·m <sup>-3</sup> )	水泥/(kg·m <sup>-3</sup> )	水灰比	外加剂/(kg·m <sup>-3</sup> )	28 d 抗压强度/MPa
C20	1 100	725	205	350	0.586	7.5	23.05
C45	950	900	173	500	0.346	12.5	46.20
C70	1 150	600	150	600	0.250	16.0	70.06

表 2 不同钢纤维含量混凝土试件配合比

Table 2 Mixture ratio of steel fiber reinforced concrete specimen

混凝土	钢纤维体积含量/%	钢纤维/(kg·m <sup>-3</sup> )	石子/(kg·m <sup>-3</sup> )	砂/(kg·m <sup>-3</sup> )	水/(kg·m <sup>-3</sup> )	水泥/(kg·m <sup>-3</sup> )	水胶比	外加剂/(kg·m <sup>-3</sup> )
C40	0	0	1 090	698	158	391	0.38	8.1
	0.75	58.5	1 056	676	182	450	0.38	8.1
	1.50	117.0	1 004	645	204	505	0.38	8.1
	4.50	351.0	726	470	280	693	0.38	8.1

### 2 实 验

实验在  $\varnothing 74 \text{ mm}$  的 SHPB 实验装置上完成, 实验装置如图 1 所示。通过贴在入射杆和投射杆中部的应变片采集入射波  $\epsilon_i$ 、反射波  $\epsilon_r$  和透射波  $\epsilon_t$ , 计算试样的动态平均应力  $\sigma$ 、应变  $\epsilon$  和应变率  $\dot{\epsilon}$ :

$$\sigma = \frac{EA}{A_s} \epsilon_t \tag{1}$$

$$\epsilon = -\frac{2c_0}{L} \int_0^t \epsilon_r dt \tag{2}$$

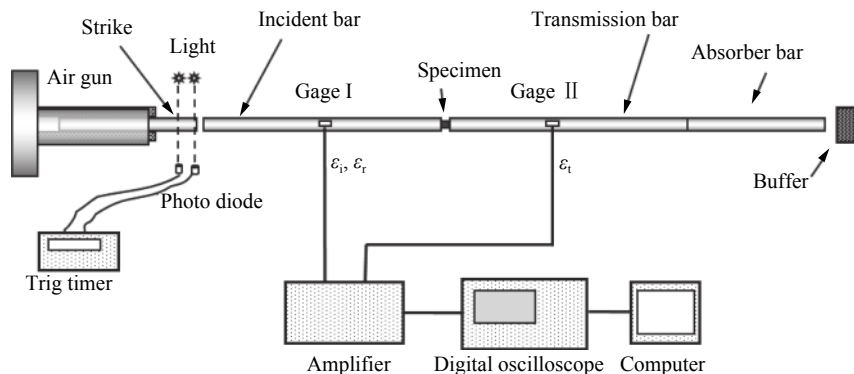


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental device

$$\dot{\epsilon} = -\frac{2c_0}{L} \epsilon_r \quad (3)$$

式中:  $c_0$  为压杆的弹性波速,  $L$  为试件的长度,  $A$  为压杆的横截面积,  $A_s$  为试件的横截面积,  $E$  为压杆的弹性模量。

由式(3)可知, 试样变形的应变率由反射应力波确定, 即应变率和反射波波形呈线性关系, 因此在 SHPB 实验中实现恒应变率加载可以由在有效加载时间内在反射应力波上得到的一个近似恒定平台表征<sup>[24]</sup>。

### 3 恒应变率加载

选取直径 20 mm、厚度 1.0~2.5 mm 的黄铜材料作为波形整形器。为了得到恒应变率加载的实验数据, 通过采用不同几何尺寸的黄铜波形整形器对不同强度 (C20, C45, C70) 和不同钢纤维含量 (0%, 0.75%, 1.50%, 4.50%) 的混凝土进行了大量 SHPB 实验, 获得的典型波形如图 2 所示。

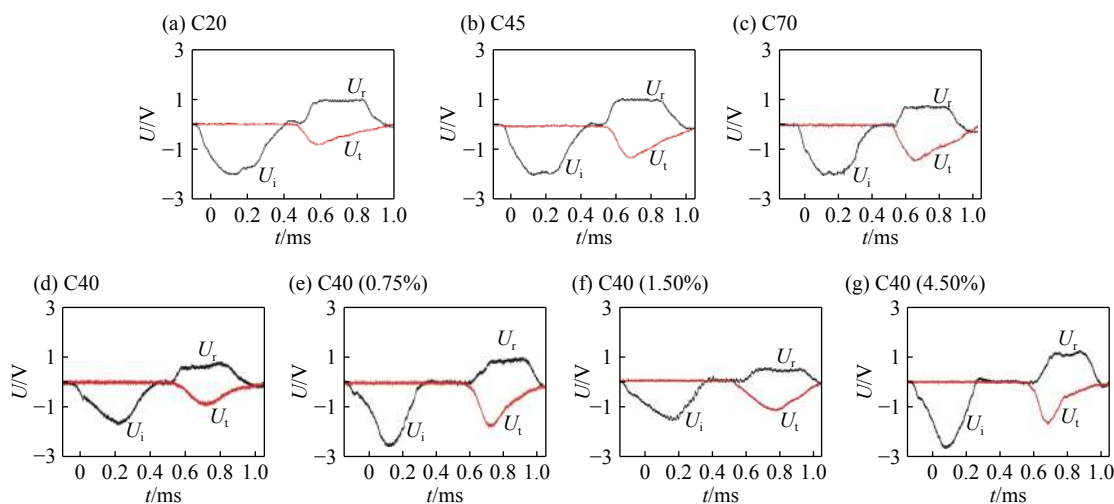


图 2 不同强度和不同钢纤维含量的混凝土材料的典型波形

Fig. 2 Typical waveforms for concrete-like materials with different strengths and different fiber contents

SHPB 实验主要基于两个基本假定: 一维假定和均匀性假定。Ravichandran 等<sup>[25]</sup>认为应力波在试件中传播 3 个来回, 试件可近似达到应力均匀状态。3 个来回的时间为  $\Delta t = 6L/c$ , 波速  $c = \sqrt{E/\rho}$ ,  $\rho$  为试件的密度。以图 2(b) 中 C45 混凝土的典型波形为例, 对应力与应变率曲线进行分析, 其中  $L = 35$  mm、 $E = 33.5$  GPa、 $\rho = 2\ 530$  kg/m<sup>3</sup>, 经计算波速  $c = 3\ 700$  m/s,  $\Delta t = 57$   $\mu$ s, 即试件在 57  $\mu$ s 的时候已经达到应力均匀状态, 而此时对应的应力还不到峰值应力的 15%。由图 3 可以看出, 反射波脉冲上升沿作用时间为 92  $\mu$ s, 即试件达到恒应变率加载段需要的时间为 92  $\mu$ s, 该时刻对应的应力为峰值应力的 50%, 说明通过黄铜整形器得到的实验数据实现了混凝土材料的恒应变率加载并满足加载过程中的应力均匀性假定。图 4 分别给出了 30 组恒应变率实验数据中 C20、C70 和 C40 (0.75%) 混凝土试件在相近恒应变率加载下的应力应变曲线对比, 从图中可以看出, 实验数据重复性较好。

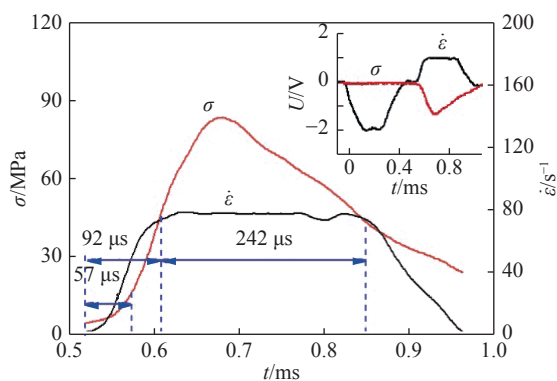


图 3 典型的应力曲线与应变率曲线

Fig. 3 Typical stress curves and strain rate curves

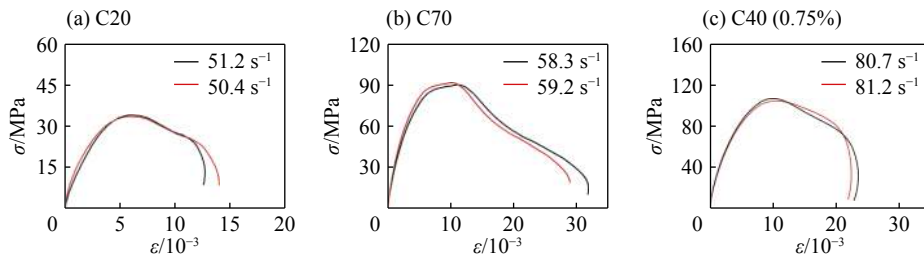


图 4 相近恒应变率加载下的应力应变曲线对比

Fig. 4 Comparison of stress-strain curves under similar constant strain rate loading

### 4 非恒应变率加载下实验数据修正系数的提出

由于 SHPB 实验中很难实现混凝土类材料的恒应变率加载,非恒应变率加载下的实验数据居多。为了处理非恒应变率加载下的实验数据,陶俊林等<sup>[26]</sup>采用应变率时程曲线的算数平均值来表征恒应变率;李为民等<sup>[27]</sup>采用应变率时程曲线的波头至应力峰值之间的算数平均值来表征恒应变率;Wang 等<sup>[28]</sup>认为,应变率时程曲线可以取 80% 至峰值应变率之间为恒应变率加载段。确定应变率方法的不同,将导致同一组实验数据所对应的应变率的确定具有较强的主观性,从而为研究混凝土类材料的应变率效应带来误差,因此如何合理地确定混凝土类材料 SHPB 实验中的应变率尤为重要。

下面,将通过使用不同应变率选取方法来处理恒应变率加载下的实验数据,通过对比不同选取方法得到的应变率数值,探寻不同确定应变率方法之间是否存在一定的规律。图 5 为其中一组恒应变率加载下的实验数据,其对应的原始波形为图 2(b)。如图 5 中所示,其实验数据对应的平台段恒应变率为  $77.3 \text{ s}^{-1}$ ;半段平均应变率选取的是波头至应力峰值这个时间段内应变率算数平均值,通过计算得到的半段平均应变率为  $42.2 \text{ s}^{-1}$ ,整段应变率平均值选取的是曲线波头至波尾这个段曲线内算数平均值,通过计算得到全段平均应变率为  $56.2 \text{ s}^{-1}$ 。因此,可得恒应变率/半段平均应变率  $\eta_1=77.3/42.2=1.832$ ,而恒应变率/全段平均应变率  $\eta_2=77.3/56.2=1.375$ 。

对 30 组恒应变率加载下的应变率曲线进行同样的处理,得到这些曲线对应的恒应变率、半段平均应变率、全段平均应变率,并求得恒应变率/半段平均应变率以及恒应变率/全段平均应变率,见表 3。图 6 对恒应变率/半段平均应变率和恒应变率/全段平均应变率进行了汇总,从图中可以发现,恒应变率/全段平均应变率基本保持在约 1.38,而恒应变率/半段平均应变率浮动比较大,没有一定的规律。

由此可以得到结论:对于恒应变率加载下的实验数据,其对应的应变率可以采用反射波平台段数值直接得到,也能够采用全段平均应

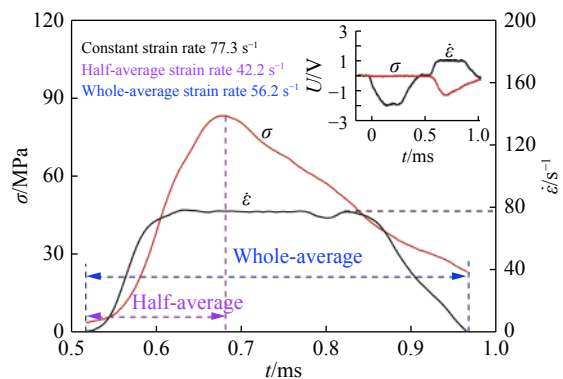


图 5 确定应变率的不同方法

Fig. 5 Ways for determining strain rate

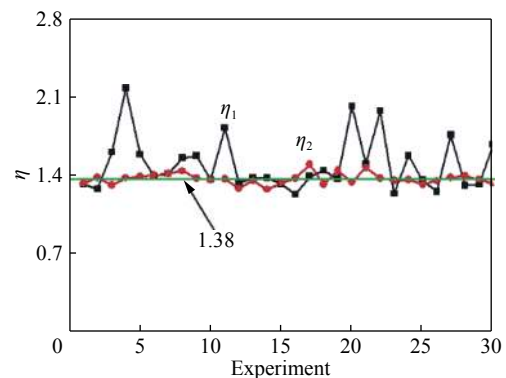


图 6 恒应变率与半段(全段)平均应变率之比  
Fig. 6 Constant strain rate versus average strain rate of half and whole-stage

表 3 恒应变率加载下的实验数据

Table 3 Experimental data at constant strain rate loading

实验	试件	恒应变率/s <sup>-1</sup>	半段平均应变率/s <sup>-1</sup>	全段平均应变率/s <sup>-1</sup>	$\eta_1$	$\eta_2$
1	C20	32.6	24.6	24.5	1.325	1.331
2	C20	44.2	34.4	31.9	1.285	1.386
3	C20	50.4	31.0	37.9	1.613	1.319
4	C20	51.2	28.6	45.1	2.182	1.384
5	C20	65.3	41.0	46.8	1.593	1.395
6	C20	77.2	55.1	54.9	1.401	1.406
7	C20	81.2	57.1	57.0	1.422	1.424
8	C45	37.3	23.9	25.8	1.561	1.446
9	C45	62.5	39.5	45.2	1.582	1.383
10	C45	70.3	51.4	51.5	1.368	1.365
11	C45	77.3	42.2	56.2	1.832	1.375
12	C45	80.7	60.1	62.5	1.343	1.291
13	C70	45.4	32.8	33.3	1.384	1.363
14	C70	53.6	38.7	41.8	1.385	1.282
15	C70	57.7	42.7	42.4	1.328	1.337
16	C70	69.4	56.1	50.2	1.237	1.382
17	C70	77.4	55.4	51.7	1.397	1.503
18	C70	87.1	60.1	65.6	1.449	1.328
19	C40	59.2	43.0	40.8	1.377	1.451
20	C40	66.8	33.0	49.5	2.024	1.349
21	C40	82.1	54.3	55.6	1.512	1.477
22	C40 (0.75%)	62.0	31.3	45.0	1.981	1.378
23	C40 (0.75%)	80.7	64.8	59.2	1.245	1.363
24	C40 (0.75%)	81.2	51.3	59.4	1.583	1.367
25	C40 (1.50%)	59.1	43.4	44.6	1.362	1.325
26	C40 (1.50%)	65.4	51.8	48.2	1.262	1.357
27	C40 (1.50%)	81.2	46.0	58.6	1.765	1.386
28	C40 (4.50%)	34.5	26.2	24.6	1.317	1.402
29	C40 (4.50%)	82.3	62.1	60.1	1.325	1.369
30	C40 (4.50%)	105.3	62.6	78.9	1.682	1.334

变率乘以系数 1.38 来确定, 并把全段平均应变率乘以系数 1.38 定义为等效应变率。由于把等效应变率确定为实验曲线所对应的应变率的方法是由恒应变率加载下的实验数据得到的, 它对于非恒应变率加载下的实验数据是否适用还未进行有效验证。下面对非恒应变率加载下的实验数据采用该确定应变率的方法进行处理, 得到该实验数据对应的等效应变率, 并与相近数值恒应变率加载下的实验数据进行对比。图 7 为恒应变率和非恒应变率加载下的应力应变曲线的对比图, 图中右上角为实验数据分别对应的应变率曲线的加载情况。

由图 7 可以看出, 如果非恒应变率加载下的等效应变率和恒应变率加载下的恒应变率差相近, 则两者对应的应力应变曲线重合度比较高。因此, 采用全段平均应变率乘以系数 1.38 来表示实验数据所对应的等效应变率是完全可行的, 并且该方法对于处理不同强度和不同钢纤维含量的混凝土材料在 SHPB 实验中的数据都适用。

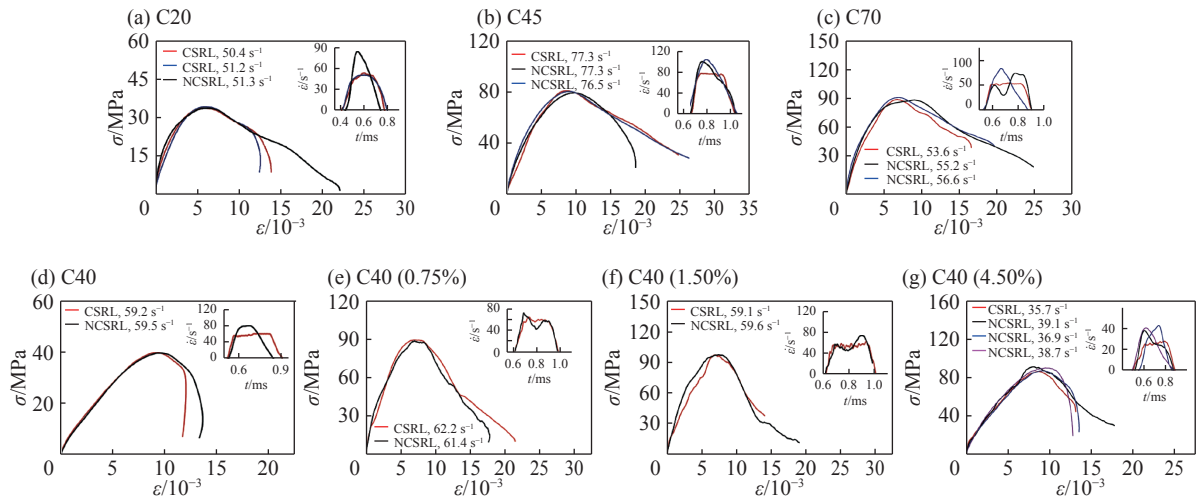


图 7 非恒应变率加载与相近恒应变率加载下的应力应变曲线对比

Fig. 7 Comparison of stress-strain curves under non-constant strain rate loading (NCSRL) and similar constant strain rate loading (CSRL)

### 5 反射波时程曲线平台段较短的实验数据对应应变率的确定

目前,一般认为实验数据的反射波时程曲线存在平台段,即可认为是恒应变率加载,因此 Wang 等<sup>[28]</sup>把反射波时程曲线只有较短平台段的实验数据认为是恒应变率加载的。由于没有对平台段长度到底多长才算恒应变率的相关报道,因此把反射波时程曲线只存在较短平台段的实验数据认为是恒应变率加载的合理性还有待进步一考究。本文中结合前文所得到的方法,对反射波时程曲线只有较短平台段类型的数据进行处理,图 8 为 C45 混凝土某个反射波时程曲线只有较短平台段类型的一组实验数据的原始波形,其反射波时程曲线的平台段对应的应变率为 72.6 s<sup>-1</sup>,而采用全段平均应变率乘以系数 1.38 得到的等效应变率为 63.4 s<sup>-1</sup>。图 9 给出了 C45 混凝土 5 组恒应变率加载下的实验数据,与其进行对比。从图 9 可以看出,等效应变率为 63.4 s<sup>-1</sup>的较短平台段类的应力应变曲线与恒应变率为 62.5 s<sup>-1</sup>的实验数据重合度较好,与恒应变率为 70.3 s<sup>-1</sup>的实验数据差异较大。因此,反射波时程曲线平台段较短的实验数据对应应变率不能直接采用平台段对应的应变率来表征,而应该采用本文中提出的全段平均应变率乘以系数 1.38 的等效应变率来表征。假如实验数据得到的反射波时程曲线平台段的长度不是太长,那么采用本文中所提的确定应变率的方法会更合理些。

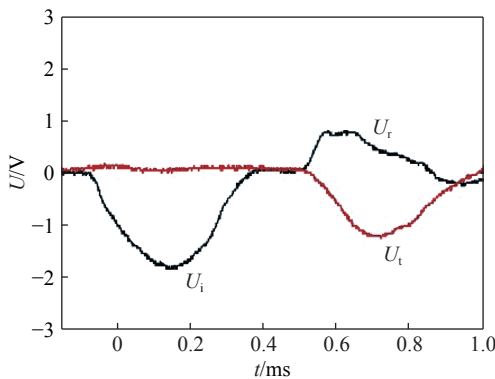


图 8 较短平台段的原始波形  
Fig. 8 Original waveform of short time constant strain rate loading

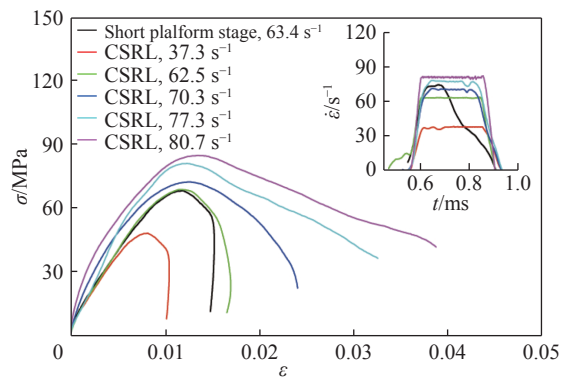


图 9 C45 混凝土在不同加载情况下的应力应变曲线对比  
Fig. 9 Comparison of stress-strain curves of C45 concrete under different loading conditions

## 6 结 论

采用直径 20 mm、厚度 1.0~2.5 mm 的黄铜材料作为波形整形器, 针对不同强度(C20, C45, C70)和不同钢纤维含量(0%, 0.75%, 1.50%, 4.50%)的 $\phi 70 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ 混凝土材料进行了 SHPB 实验, 得到以下结论。

(1) 通过采用不同尺寸的黄铜材料作为波形整形器, 能够得到低应变率下的恒应变率加载实验数据, 但是很难得到高应变率下的恒应变率加载实验数据。

(2) 通过对实验得到的 30 组恒应变率加载下数据进行归纳总结, 提出了混凝土类材料 SHPB 实验数据所对应的应变率可以采用全段平均应变率的 1.38 倍来表征的确定应变率的方法。

(3) 对比非恒应变率加载下的等效恒应变率和恒应变率加载下的恒应变率的数值相近的实验数据, 由于其对应的应力应变曲线重合度非常高, 从而表明采用本文中确定应变率的方法对于非恒应变率加载的实验数据是适用的。

(4) 反射波时程曲线平台段较短的实验数据不能视为恒应变率加载, 其对应的应变率可以采用本文中确定应变率的方法来确定。

### 参考文献:

- [1] 江见鲸, 冯乃谦. 混凝土力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [2] 郑全平, 周早生, 钱七虎, 等. 防护结构中的震塌问题 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 28(8): 1393–1398. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.08.031.  
ZHENG Quanping, ZHOU Zaosheng, QIAN Qihu, et al. Spallation in protective structures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 28(8): 1393–1398. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.08.031.
- [3] 王礼立, 王永刚. 应力波在用 SHPB 研究材料动态本构特性中的重要作用 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(1): 17–25. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)01-0017-09.  
WANG Lili, WANG Yonggang. The important role of stress waves in the study on dynamic constitutive behaviour of materials by SHPB [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(1): 17–25. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)01-0017-09.
- [4] 胡时胜, 王道荣. 冲击载荷下混凝土材料的动态本构关系 [J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(3): 242–246.  
HU Shisheng, WANG Daorong. Dynamic constitutive relation of concrete under impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(3): 242–246.
- [5] XIAO J, LI L, SHEN L, et al. Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading [J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 71: 46–55. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.01.014.
- [6] 李世超, 黄瑞源, 唐奎, 等. 一种基于围压和应变率效应的动态本构模型在钢纤维混凝土中的应用 [J]. *兵工学报*, 2017, 10(S1): 66–72.  
LI Shichao, HUANG Ruiyuan, TANG Kui, et al. Application of a dynamic constitutive model with confining pressure and strain rate effects in steel fiber reinforced concrete [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 10(S1): 66–72.
- [7] 胡时胜, 王礼立, 宋力, 等. Hopkinson 压杆技术在中国的发展回顾 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(6): 641–657. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)06-0641-17.  
HU Shisheng, WANG Lili, SONG Li, et al. Review of the development of Hopkinson bar technique in China [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(6): 641–657. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)06-0641-17.
- [8] AL-SALLOUM Y, ALMUSALLAM T, IBRAHIM S M, et al. Rate dependent behavior and modeling of concrete based on SHPB experiments [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 55: 34–44. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.011.
- [9] DONG J K, SIRIJARONCHAI K, El-Tawil S, et al. Numerical simulation of the split Hopkinson pressure bar test technique for concrete under compression [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(2): 141–149. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.06.012.
- [10] 孟益平, 胡时胜. 混凝土材料冲击压缩试验中的一些问题 [J]. *实验力学*, 2003, 18(1): 108–112.  
MENG Yiping, HU Shisheng. Some problems in the test of concrete under impact compressive loading [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2003, 18(1): 108–112.
- [11] 方秦, 洪建, 张锦华, 等. 混凝土类材料 SHPB 实验若干问题探讨 [J]. *工程力学*, 2014, 31(5): 1–14. DOI: 10.6052/j.issn.

- 1000-4750.2013.05.ST07.
- FANG Qin, HONG Jian, ZHANG Jinhua, et al. Issues of SHPB test on concrete-like material [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(5): 1–14. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.05.ST07.
- [12] 朱珏, 胡时胜, 王礼立. 率相关混凝土类材料 SHPB 试验的若干问题 [J]. *工程力学*, 2007, 24(1): 78–87. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2007.01.014.
- ZHU Jue, HU Shisheng, WANG Lili. Problems of SHPB technique used for rate-dependent concrete-sort materials [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(1): 78–87. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2007.01.014.
- [13] FREW D J, FORRESTAL M J, CHEN W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split hopkinson pressure bar [J]. *Experimental Mechanics*, 2002, 42(1): 93–106. DOI: 10.1007/BF02411056.
- [14] 卢玉斌, 武海军, 李庆明, 等. 脆性材料 SHPB 实验中脉冲整形技术实现近似恒应变率加载功能的进一步研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(S1): 47–53.
- LU Yubin, WU Haijun, LI Qingming, et al. Further investigation on nearly constant strain rate loading in SHPB tests for brittle materials using a pulse-shaping technique [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(S1): 47–53.
- [15] 陶俊林, 田常津, 陈裕泽, 等. SHPB 系统试件恒应变率加载实验方法研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(5): 413–418.
- TAO Junlin, TIAN Changjin, CHEN Yuze, et al. Investigation of experimental method to obtain constant strain rate of specimen in SHPB [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(5): 413–418.
- [16] 周子龙, 李夕兵, 岩小明. 岩石 SHPB 测试中试样恒应变率变形的加载条件 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(12): 2443–2452.
- ZHOU Zilong, LI Xibing, YAN Xiaoming. Loading condition for specimen deformation at constant strain rate in SHPB test of rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(12): 2443–2452.
- [17] 宋力, 胡时胜. SHPB 测试中的均匀性问题及恒应变率 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(3): 207–216. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)03-0207-10.
- SONG Li, HU Shisheng. Stress uniformity and constant strain rate in SHPB test [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(3): 207–216. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)03-0207-10.
- [18] 张书, 卢玉斌. 混凝土 SHPB 实验中惯性效应的机理及其影响因素研究 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(S2): 281–287.
- ZHANG Shu, LU Yubin. Research on the mechanism of inertial effect and its influencing factors in SHPB tests of concrete [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(S2): 281–287.
- [19] 李玉龙, 索涛, 郭伟国, 等. 确定材料在高温高应变率下动态性能的 Hopkinson 杆系统 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(6): 487–492. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)06-0487-06.
- LI Yulong, SUO Tao, GUO Weiguo, et al. Determination of dynamic behavior of materials at elevated temperatures and high strain rates using Hopkinson bar [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(6): 487–492. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)06-0487-06.
- [20] 刘孝敏, 胡时胜. 应力脉冲在变截面 SHPB 锥杆中的传播特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(2): 110–114.
- LIU Xiaomin, HU Shisheng. Wave propagation characteristics in cone bars used for variable cross-section SHPB [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(2): 110–114.
- [21] 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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2009.03.019.
- LI Weimin, XU Jinyu. Pulse shaping techniques for large-diameter split Hopkinson pressure bar test [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(3): 350–355. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2009.03.019.
- [22] NEMAT N S. Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments [J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1991, 435(1894): 371–391. DOI: 10.1098/rspa.1991.0150.
- [23] 牛雷雷, 朱万成, 李少华, 等. 摆锤冲击加载下砂岩中应变率动力特性的试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(12): 2443–2450. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.12.009.
- NIU Leilei, ZHU Wancheng, LI Shaohua, et al. Experimental study of dynamic characteristic of sandstone under intermediate strain rate by using pendulum hammer driven “SHPB” apparatus [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(12): 2443–2450. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.12.009.
- [24] 于水生, 卢玉斌, 蔡勇. 一种确定岩石类材料真实应变率效应的数值方法 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(S2): 3283–3290.
- YU Shuisheng, LU Yubin, CAI Yong. A numerical method to determine real strain-rate effect for rock-like materials [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(S2): 3283–3290.



- [25] RAVICHANDRAN G, SUBHASH G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split hopkinson pressure bar [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1994, 77(1): 263–267. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1994.tb06987.x.
- [26] 陶俊林, 陈裕泽, 田常津, 等. 应变率历史对应力应变曲线的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(1): 80–84. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)01-0080-05.  
TAO Junlin, CHEN Yuze, TIAN Changjin, et al. Investigation of the effect of strain rate history on the stress-strain curves [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(1): 80–84. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)01-0080-05.
- [27] 李为民, 许金余, 沈刘军, 等.  $\Phi 100$  mm SHPB 应力均匀及恒应变率加载试验技术研究 [J]. *振动与冲击*, 2008, 27(2): 129–132.  
LI Weimin, XU Jinyu, SHEN Liujun, et al. Study on 100 mm-diameter SHPB techniques of dynamic stress equilibrium and nearly constant strain rate loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(2): 129–132.
- [28] WANG S, ZHANG M H, QUEK S T. Mechanical behavior of fiber-reinforced high-strength concrete subjected to high strain-rate compressive loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 31(6): 1–11. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.083.

## A novel method for determining strain rate of concrete-like materials in SHPB experiment

HU Liangliang<sup>1</sup>, HUANG Ruiyuan<sup>1,2</sup>, GAO Guangfa<sup>1</sup>, JIANG Dong<sup>2,3</sup>, LI Yongchi<sup>2</sup>

(1. *National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*

2. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China;*

3. *Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)*

**Abstract:** In this paper, we performed SHPB experiments on concrete-like materials with different strengths (C20, C45, C70) and different steel fiber contents (0%, 0.75%, 1.50%, 4.50%) and analyzed the data drawn. The results showed that the constant strain rate corresponding to the experimental data was co-related with the whole-stage average strain rate to a certain degree and therefore the former could be determined by the 1.38 times of the latter. This method was verified as rational by the comparative analysis of the experimental data of non-constant strain rate with the experimental data of constant strain rate. It was also found that, at the constant strain rate in a relatively short loading time, it is unreasonable to characterize the strain rate corresponding to the experimental data using the constant strain rate corresponding to the short platform stage. In this case, the method proposed in this paper offers a good choice.

**Keywords:** concrete; SHPB; strain rate effect; dynamic mechanical behavior

(责任编辑 丁 峰)