DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0929-08

SHPB 试验中岩石试件的端面不平行修正*

袁 璞[1,2],马芹永[1,2]

(1.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;
2.安徽理工大学土木建筑学院,安徽 淮南 232001)

摘要:为研究短圆柱体岩石试件端面不平行对岩石动力学特性测试结果的影响,采用有限元分析软件 LS-DYNA 对 9 种端面不平行度和 5 种杨氏模量的岩石试件开展 SHPB(split Hopkinson pressure bar)试验数值模拟,对岩石选用 HJC(Holmquist-Johnson-Cook)本构模型。数值模拟结果表明,当端面不平行度在 0.40%以内时,端面不平行对动态应力测试结果的影响可忽略不计;但对动态应变测试结果的影响较大。当杨氏模量一定时,平均应变率测试误差和峰值应变测试误差随端面不平行度增大呈线性增大;当端面不平行度一定时,平均应变率测试误差和峰值应变测试误差随杨氏模量增大也呈线性增大。对数值模拟得到的平均应变率测试误差和峰值应变测试误差实施二元线性回归分析,提出了 SHPB 试验中端面不平行岩石试件平均应变率和峰值应变的修正公式。

关键词:岩石;SHPB;不平行度;应变率;峰值应变;误差

中图分类号:O347.4 **国标学科代码**:13015 **文献标志码**:A

分离式 Hopkinson 压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)技术被广泛应用于测试材料在高应变率条件下的动力学特性[1],如岩石[2]、混凝土[3]、陶瓷[4]、胶结砂模型材料[5]、冻土[6]等。一维应力波假定和应力均匀性假定满足程度与压杆的弥散效应、试件的惯性效应、试件与压杆的匹配以及接触面特性等因素密切相关[7]。如何提高 SHPB 试验精度、更准确地测量材料动态本构关系是 SHPB 技术研究的热点和难点问题。从惯性效应、试件与压杆接触特性及截面匹配等方面已见一定的研究报道。陶俊林等[8]在 Gorham 惯性效应分析的基础上,考虑了摩擦力做功的影响,提出了试件最佳尺寸的计算公式。卢玉斌等[9]建立了端面动摩擦模型,并描述了端面动摩擦因数随试件与压杆接触界面最大径向相对滑动速度的关系。张祖根等[10]定量分析了截面不匹配效应产生的压杆与试件表面接触变形对 SHPB 试验应变测量结果的影响。宋力等[11]提出了一种修正 SHPB 试验压杆端面凹陷的方法,该方法能有效提高应变的计算精度。在 SHPB 试验中,被测材料需被加工成特定尺寸的试件,以减弱惯性效应和摩擦效应。然而,尚未见试件加工精度对 SHPB 试验测试结果影响的研究报道。对于岩石类脆性材料,一般采用∅50 mm 钢质 SHPB 装置,岩石经历取芯机钻取、切割机切割以及端面磨平机打磨 3 个过程后被加工成短圆柱体试件,尺寸为∅50 mm×25 mm[8,12]。加工短圆柱体岩石试件时,试件端面的平整度较好,但由于短圆柱试件高度较小,仅为 25 mm,试件端面的平行度较难控制。

为研究端面不平行对岩石动力学特性测试结果的影响,本文中拟采用有限元软件 LS-DYNA 对 9 种端面不平行度和 5 种杨氏模量的岩石试件开展 SHPB 试验数值模拟,定量分析端面不平行度在不同杨氏模量岩石 SHPB 试验测试结果中引入的测试误差,提出消除端面不平行测试误差的修正公式。

* **收稿日期**:2016-03-16;**修回日期**:2016-06-29

基金项目:安徽高校自然科学研究项目(KJ2017A097);
安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2017YF-08);
安徽理工大学青年教师科学研究基金项目(QN201607);
矿山地下工程教育部工程研究中心开放基金项目(2015KF02);
矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地开放基金项目(MDPC201603)

第一作者:袁 璞(1987—),男,博士,讲师,puy2012@126.com。

1 端面不平行的定量表述

端面不平行 δ 是指试件高度最大值和最小值的偏差。为简化分析，采用端面不平行度 γ[8] 来表示，并假设岩石试件端面不平行仅发生在岩石试件的一个端面，另一端面与轴线垂直，如图 1 所示。端面不平行度 γ 是指试件端面不平行 δ 与试件平均高度 h 的比值，采用百分数表示，计算公式为：

$$\gamma=\delta/h\times 100\% \tag{1}$$

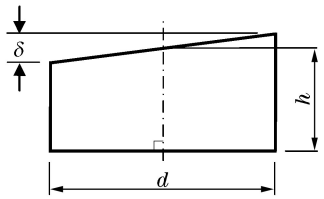

图 1 端面不平行岩石试件

Fig. 1 A schematic drawing for rock specimens with non-parallel end-faces

在静态单轴抗压试验中，规定岩石试件端面不平行不大于 0.05 mm[13]；在 SHPB 试验中，要求高度为 25 mm 的短圆柱岩石试件端面不平行不大于 0.025 mm[12]。岩石端面磨平机能使高度为 100 mm 的长圆柱体岩石试件端面不平行控制在 0.100 mm以内；对于高度为 25 mm 的短圆柱体试件，难以控制其端面不平行；即使采用车床进行加工，依然存在岩石试件端面不平行问题。

对 SHPB 试验进行数值模拟时，岩石试件端面不平行一端与透射杆相接。9 种岩石试件端面不平行度 γ 分别为 0%、0.05%、0.10%、0.15%、0.20%、0.25%、0.30%、0.35%和 0.40%，端面不平行在 0～0.100 mm 范围内；5 种岩石试件杨氏模量 E 分别为 14、21、28、35 和 42 GPa。

2 SHPB 试验数值模拟

2.1 半正弦加载波形

对于岩石类脆性材料，半正弦加载波可减小 SHPB 试验中的波形震荡，实现近似恒应变率加载，是一种理想的加载波形[14]。开展 SHPB 试验数值模拟时，直接在入射杆的撞击端施加一个波幅为 260 MPa、持续时间为 240 μs 的半正弦加载波，如图 2 所示。

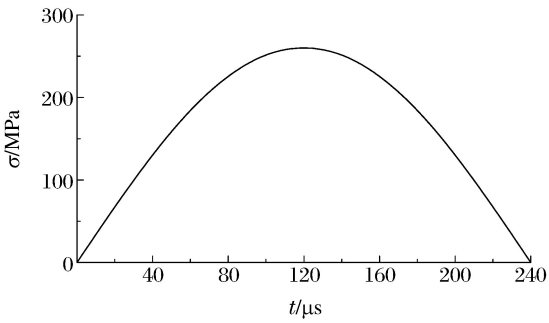

图 2 半正弦加载波

Fig. 2 A half-sine loading waveform

2.2 数值模型

以∅50 mm 钢质 SHPB 装置为原型，建立三维数值计算模型。钢质压杆为等截面直杆，入射杆和透射杆长度均为 2 000 mm，岩石试件长度为 25 mm。为提高计算精度，岩石试件采用精细网格划分。在三维数值计算模型中，采用 Solid164 三维实体单元，入射杆、透射杆和岩石试件均划分了 60 000个单元，如图 3 所示。入射杆、岩石试件和透射杆之间采用自动单面接触。SHPB 试验中，岩石试件与压杆接触面均涂抹润滑剂消弱或避免端面摩擦效应；数值模拟时，不考虑岩石试件与压杆接触端面间的摩擦。

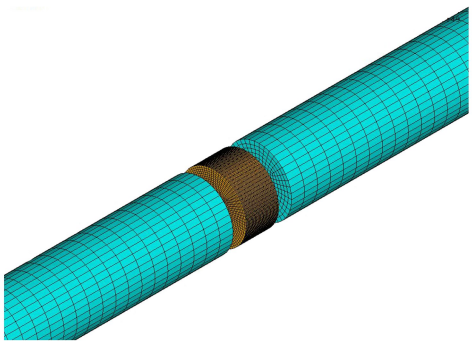

图 3 SHPB 实验数值计算模型

Fig. 3 A numerical calculation model for SHPB test

2.3 模型参数

对钢质压杆采用各向同性线弹性模型，压杆密度为 7.85 g/cm^3，杨氏模量为 210 GPa，泊松比为 0.30；对短圆柱体岩石试件采用 HJC(Holmquist-

Johnson-Cook)动态损伤本构模型[15]。在 HJC 本构模型中，岩石剪切模量 G 和弹性极限时的体积应变 μ_c 与杨氏模量 E 的关系分别为：

$$G=\frac{E}{2(1+\nu)},\qquad \mu_c=\frac{p_c}{K}=\frac{f_c(1-2\nu)}{E} \tag{2}$$

数值模拟时，岩石的泊松比 ν 取为 0.2，5 种杨氏模量岩石 HJC 模型参数仅剪切模量 G 和弹性极限时的体积应变 μ_c 不同，其余参数相同。当杨氏模量为 28 GPa 时，岩石 HJC 模型参数为：岩石的密度 $\rho=2.47\ \mathrm{g/cm^3}$；剪切模量 $G=11.67$ GPa；准静态单轴抗压强度 $f_c=130.00$ MPa；抗拉强度 $T=7.07$ MPa；特征化粘结强度因数 $A=0.79$；特征化压力硬化因数 $B=1.60$；应变率影响参数 $C=0.007$；压力硬化指数 $N=0.61$；特征化最大强度 $S_{max}=4.0$；损伤常数 $D_1=0.045$，$D_2=1.0$；最小塑性应变 $\varepsilon_{min}=0.005$；参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0=1.0\times10^{-6}\ \mathrm{s^{-1}}$；弹性极限时的静水压力 $p_c=43.33$ MPa；弹性极限时的体积应变 $\mu_c=0.002\ 78$；压实时的静水压力 $p_{lock}=1$ GPa；压实时的体积应变 $\mu_{lock}=0.1$；压力常数 $K_1=85$ GPa，$K_2=-171$ GPa，$K_3=208$ GPa；失效类型 $f_s=0.004$。

HJC 动态损伤本构模型中采用等效塑性应变和塑性体积应变的累积描述岩石材料的损伤效应，并用损伤参数 D 表征岩石试件的损伤程度，$0\leqslant D\leqslant1$。当 $D=0$ 时，岩石试件无损伤；当 $D=1$ 时，岩石试件完全损伤。损伤参数 D 的计算公式[16]为：

$$D=\sum\frac{\Delta\varepsilon_p+\Delta\mu_p}{D_1(p^*+T^*)^{D_2}} \tag{3}$$

式中：$\Delta\varepsilon_p$ 和 $\Delta\mu_p$ 分别为一个计算循环内的等效塑性应变和塑性体积应变，$p^*=p/f_c$ 为特征化压力，$T^*=T/f_c$ 为最大特征化拉伸强度。

3　端面不平行在岩石 SHPB 试验中引入的误差

3.1　数值模拟结果

在 SHPB 试验中，一般在入射杆和透射杆同一条径线的两端各自粘贴一个应变片组成惠斯通电桥。在分析时，取同一径线两端的 2 个实体单元的平均应变，采用经典二波法进行数据处理[17]。

对于端面不平行岩石试件，由于端面不平行面是一斜面，岩石试件端面和压杆端面之间存在间隙，当入射应力波传播到此处时，首先发生反射，随后岩石试件在应力波作用下产生微小变形，增大岩石试件不平行端面与压杆端面接触面积，入射应力波传播到透射杆。典型端面不平行岩石试件的动态应力应变曲线见图 4～6，9 种端面不平行和 5 种杨氏模量的岩石试件 SHPB 试验数值模拟结果见表 1。

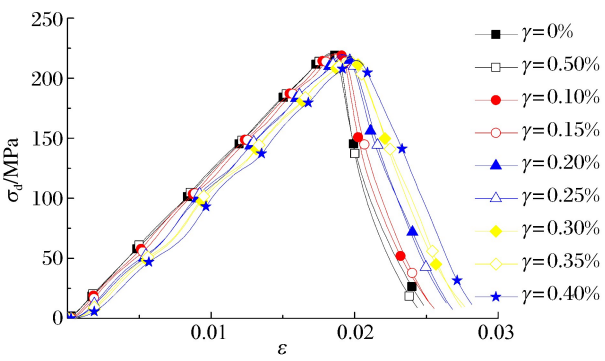

图 4　杨氏模量为 14 GPa，端面不平行度不同的岩石试件动态应力应变曲线

Fig. 4　Dynamic stress-strain curves of rock specimens with Young's modulus of 14 GPa and the end faces of various non-parallelisms

图 4～6 和表 1 表明，当杨氏模量一定时，随端面不平行度的增大，岩石试件动态单轴抗压强度逐渐降低，峰值应变和平均应变率则逐渐增大；当端面不平行度一定时，随杨氏模量的增大，岩石试件动态单轴抗压强度逐渐增大，峰值应变和平均应变率则逐渐减小。同时岩石试件动态应力应变曲线中裂隙压密段随端面不平行度增大而延长，且弹性加载段出现了一定的波动效应。

岩石的变形与其杨氏模量密切相关。在数值模拟时，针对不同的杨氏模量，仅改变了 HJC 模型弹性段的模型参数，未改变 HJC 模型损伤破裂参数。当岩石试件端面不平行度一定时，在相同的入射应力波作用下，杨氏模量较大的岩石试件产生较小的弹性极限应变后进入塑性过渡段，在达到最小塑性应变后破坏。对于 HJC 模型，杨氏模量 E 越大，弹性极限时的体积应变 μ_c 越小，相应塑性过渡段（μ_c～

μ_{lock})越长,相同 HJC 模型损伤破裂参数下岩石试件所能达到的有效应力也越大。因此,数值模拟结果中杨氏模量 E 越大,岩石试件动态单轴抗压强度越大,峰值应变和平均应变率越小。

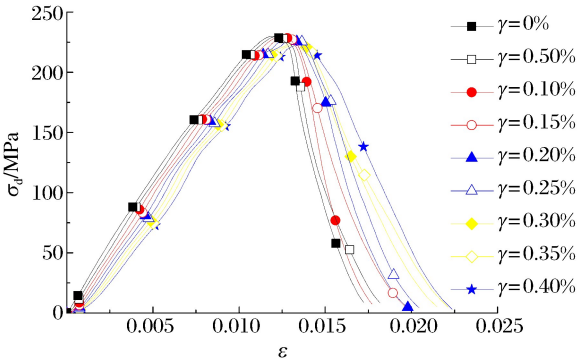

图 5 杨氏模量为 28 GPa,端面不平行度不同的岩石试件动态应力应变曲线

Fig. 5 Dynamic stress-strain curves of rock specimens with Young's modulus of 28 GPa and the end faces of various non-parallelisms

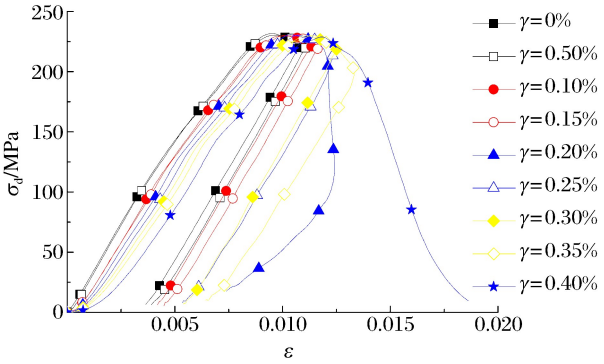

图 6 杨氏模量为 42 GPa,端面不平行度不同的岩石试件动态应力-应变曲线

Fig. 6 Dynamic stress-strain curves of rock specimens with Young's modulus of 42 GPa and the end faces of various non-parallelisms

表 1 不同端面不平行岩石试件 SHPB 数值模拟结果

Table 1 Numerical simulation results of rock specimens in various non-parallelisms

γ/%	σ_d/MPa	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	ε_u	σ_d/MPa	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	ε_u	σ_d/MPa	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	ε_u
	E=14 GPa			E=21 GPa			E=28 GPa		
0.00	220.93	117.8	0.018 4	228.30	95.6	0.014 2	229.85	82.9	0.011 9
0.05	220.55	119.8	0.018 6	228.02	97.6	0.014 4	229.74	84.7	0.012 2
0.10	220.67	121.3	0.018 8	227.01	98.9	0.014 7	229.11	86.8	0.012 3
0.15	219.90	124.8	0.018 7	226.47	101.8	0.014 8	228.94	88.7	0.012 6
0.20	219.85	125.7	0.019 1	225.90	103.2	0.015 1	228.99	90.5	0.012 8
0.25	219.56	127.8	0.019 3	225.86	106.1	0.015 2	228.33	92.3	0.013 2
0.30	218.78	128.6	0.019 7	224.82	107.2	0.015 5	227.83	94.5	0.013 3
0.35	216.98	131.4	0.019 7	223.63	109.6	0.015 7	226.45	96.3	0.013 6
0.40	214.73	132.6	0.020 2	221.08	111.0	0.016 1	224.64	98.3	0.013 9
γ/%	σ_d/MPa	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	ε_u	σ_d/MPa	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	ε_u			
	E=35 GPa			E=42 GPa					
0.00	230.94	74.3	0.010 5	231.59	68.4	0.009 5			
0.05	230.33	76.1	0.010 8	230.33	70.5	0.009 7			
0.10	229.91	77.9	0.011 1	229.69	72.1	0.010 0			
0.15	229.88	80.3	0.011 2	229.89	74.5	0.010 1			
0.20	229.87	81.9	0.011 5	230.59	76.4	0.010 4			
0.25	229.77	84.3	0.011 7	230.29	78.3	0.010 7			
0.30	229.98	85.8	0.012 0	229.85	80.1	0.011 0			
0.35	229.62	87.6	0.012 3	230.18	81.7	0.011 4			
0.40	228.11	89.1	0.012 7	228.87	83.3	0.011 8			

3.2 误差分析

引入动态单轴抗压强度测试误差 e_{σ_d}、平均应变率测试误差 $e_{\dot{\varepsilon}}$ 和峰值应变测试误差 e_{ε_u},定量分析端面不平行在岩石动力学特性测试结果中引入的误差;测试误差的计算公式如下:

$$e_{\sigma_d}=\frac{\sigma_{d,\gamma=0}-\sigma_d}{\sigma_{d,\gamma=0}}\times 100\%,\quad e_{\dot{\varepsilon}}=\frac{\dot{\varepsilon}-\dot{\varepsilon}_{\gamma=0}}{\dot{\varepsilon}_{\gamma=0}}\times 100\%,\quad e_{\varepsilon_u}=\frac{\varepsilon_u-\varepsilon_{u,\gamma=0}}{\varepsilon_{u,\gamma=0}}\times 100\% \tag{4}$$

式中：σ_d、$\dot{\varepsilon}$ 和 ε_u 分别为模拟得到的端面不平行岩石试件动态单轴抗压强度、平均应变率和峰值应变；$\sigma_{d,\gamma=0}$、$\dot{\varepsilon}_{\gamma=0}$ 和 $\varepsilon_{u,\gamma=0}$ 分别为模拟得到的端面平行岩石试件动态单轴抗压强度、平均应变率和峰值应变。

经计算，5 种杨氏模量条件下，端面不平行对动态应力测试结果的影响较小，最大动态单轴抗压强度测试误差仅为 3.2%，可忽略不计；但对动态应变测试结果的影响较大。平均应变率和峰值应变的测试误差与端面不平度的关系见图 7；平均应变率和峰值应变的测试误差与杨氏模量的关系见图 8。

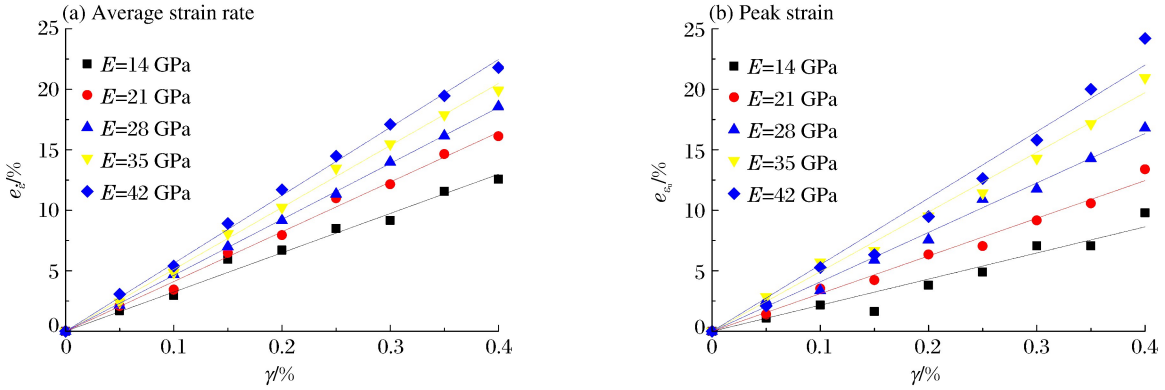

图 7　应变测试误差与端面不平行度的关系

Fig. 7　Relation between strain test error and non-parallelism

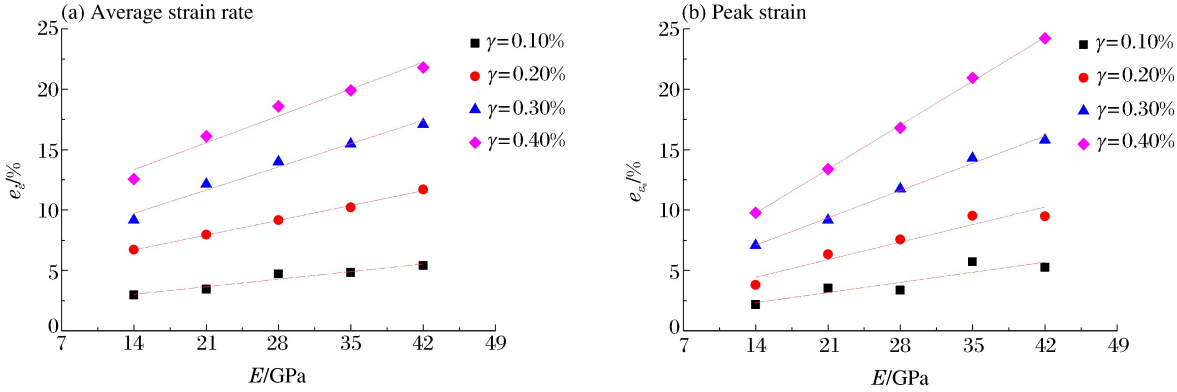

图 8　应变测试误差与杨氏模量的关系

Fig. 8　Relation between strain test error and Young's modulus

图 7 表明，当杨氏模量一定时，平均应变率测试误差和峰值应变测试误差随端面不平行度增大近似呈线性增大；且杨氏模量越大，端面不平行的影响程度越大。图 8 表明，当端面不平行度一定时，平均应变率测试误差和峰值应变测试误差随杨氏模量的增大也近似呈线性增大；且端面不平行度越大，弹性模量的影响程度越大。

当端面不平行度为 0.10%（δ=0.025 0 mm）时，5 种杨氏模量岩石试件的测试误差在 5%左右，与文献[12]中的要求一致。若控制 SHPB 测试误差在一定范围内，不同杨氏模量岩石试件端面不平行度的上限不同。若要求 SHPB 测试误差在 15%以内，5 种杨氏模量岩石试件端面不平行度的上限见表 2。

表 2　5 种杨氏模量岩石试件端面不平行度的上限

Table 2　Upper limit of non-parallelism for rock specimens in five kinds of Young's moduli

E/GPa	γ_{up}/%	δ_{up}/mm	E/GPa	γ_{up}/%	δ_{up}/mm	E/GPa	γ_{up}/%	δ_{up}/mm
14	0.40	0.100 0	28	0.30	0.075 0	42	0.25	0.062 5
21	0.35	0.087 5	35	0.25	0.062 5			

4 端面不平行修正

研究表明,接触面积的大小会明显影响应力波在接触界面的反射和透射,随接触面积的增大,应力波反射因数减小,应力波透射因数增大[18]。岩石试件端面不平行将导致 SHPB 试验中反射应变信号偏大而透射应变信号偏小,因此测得的平均应变率和峰值应变偏大,而动态单轴抗压强度偏小。杨氏模量在 14～42 GPa 范围内,端面不平行度在 0.00%～0.40%范围内岩石试件 SHPB 试验数值模拟结果表明,端面不平行对动态应力测试结果的影响较小,最大动态单轴抗压强度测试误差仅为 3.2%,可不予考虑;但对动态应变测试结果的影响较大,需对其进行修正。

对杨氏模量 E 进行量纲一化处理,量纲一杨氏模量 E' 的计算公式为:

$$E' = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \tag{5}$$

式中:E 为岩石的杨氏模量;$E_{\max}$ 和 $E_{\min}$ 为岩石杨氏模量的最大值和最小值,分别为 42 和 14 GPa。

采用 Matlab 软件对数值模拟得到的平均应变率测试误差和峰值应变测试误差进行二元线性回归分析,得到平均应变率测试误差和峰值应变测试误差的拟合公式为:

$$e_{\dot{\varepsilon}} = 45.06\gamma + 4.627E' - 2.208 \tag{6}$$

$$e_{\varepsilon_u} = 41.07\gamma + 6.645E' - 3.745 \tag{7}$$

进而得到 SHPB 试验中端面不平行岩石试件平均应变率和峰值应变的修正公式为:

$$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{mod}} = \frac{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{test}}}{1 + e_{\dot{\varepsilon}}} = \frac{100\dot{\varepsilon}_{\mathrm{test}}}{97.792 + 45.06\gamma + 4.627E'} \tag{8}$$

$$\varepsilon_{u,\mathrm{mod}} = \frac{\varepsilon_{u,\mathrm{test}}}{1 + e_{\varepsilon_u}} = \frac{100\varepsilon_{u,\mathrm{test}}}{96.255 + 41.07\gamma + 6.645E'} \tag{9}$$

采用上述修正公式对 5 种杨氏模量端面不平行岩石试件数值模拟结果进行修正,修正后的平均应变率和峰值应变见表 3,表中端面不平行度为 0.00%的数据为数值模拟计算结果。表 3 显示,端面不平行岩石试件平均应变率和峰值应变修正结果与端面平行岩石试件 SHPB 试验数值模拟结果基本吻合。

表 3 端面不平行岩石试件动态应变测试结果的修正

Table 3 Corrected dynamic strain test results of non-parallel end-face rock specimens

γ/%	$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{mod}}/\mathrm{s}^{-1}$	$\varepsilon_{u,\mathrm{mod}}$	$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{mod}}/\mathrm{s}^{-1}$	$\varepsilon_{u,\mathrm{mod}}$	$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{mod}}/\mathrm{s}^{-1}$	$\varepsilon_{u,\mathrm{mod}}$	$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{mod}}/\mathrm{s}^{-1}$	$\varepsilon_{u,\mathrm{mod}}$	$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{mod}}/\mathrm{s}^{-1}$	$\varepsilon_{u,\mathrm{mod}}$
	E=14 GPa		E=21 GPa		E=28 GPa		E=35 GPa		E=42 GPa	
0.00	117.8	0.018 4	95.6	0.014 2	82.9	0.011 9	74.3	0.010 5	68.4	0.009 5
0.05	119.7	0.018 9	96.4	0.014 3	82.7	0.012 0	73.5	0.010 5	67.4	0.009 2
0.10	118.6	0.018 7	95.6	0.014 3	83.0	0.011 9	73.7	0.010 5	67.4	0.009 3
0.15	119.4	0.018 3	96.3	0.014 1	83.0	0.011 9	74.3	0.010 4	68.2	0.009 3
0.20	117.7	0.018 3	95.6	0.014 1	82.9	0.011 9	74.3	0.010 5	68.6	0.009 4
0.25	117.2	0.018 1	96.3	0.013 9	82.9	0.012 0	74.9	0.010 5	68.9	0.009 5
0.30	115.5	0.018 1	95.3	0.013 9	83.2	0.011 9	74.8	0.010 6	69.1	0.009 5
0.35	115.7	0.017 8	95.5	0.013 9	83.1	0.011 9	74.9	0.010 6	69.1	0.009 7
0.40	114.5	0.017 9	94.9	0.014 0	83.2	0.012 0	74.7	0.010 8	69.2	0.009 9

5 结 论

采用有限元分析软件 LS-DYNA 对 9 种端面不平行度和 5 种杨氏模量的岩石试件开展 SHPB 数值模拟,研究岩石试件端面不平行对岩石材料动态力学特性测试结果的影响,得到以下结论:

(1)当端面不平行度在 0.40%以内时,端面不平行对动态应力测试结果的影响较小,最大动态单轴抗压强度测试误差仅为 3.2%,可近似忽略不计;但对动态应变测试结果的影响较大。随端面不平行度的增大,动态应力应变曲线中裂隙压密段延长,同时弹性加载段出现一定的波动效应。

(2)当杨氏模量一定时,随端面不平行度的增大,岩石动态单轴抗压强度逐渐降低,峰值应变和平均

应变率则逐渐增大。平均应变率和峰值应变测试误差随端面不平行度的增加近似呈线性增大。

(3)当端面不平行度一定时,随杨氏模量的增大,岩石动态单轴抗压强度逐渐增大,峰值应变和平均应变率则逐渐减小。平均应变率和峰值应变测试误差随杨氏模量的增大也近似呈线性增大。

(4)对数值模拟得到的平均应变率和峰值应变测试误差实施二元线性回归分析,提出了 SHPB 试验中端面不平行岩石试件平均应变率和峰值应变的修正公式。

参考文献:

[1] 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.
Hu Shisheng, Wang Lili, Song Li, et al. Review of the development of Hopkinson pressure bar technique in China [J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(6):641-657.

[2] 袁璞,马芹永. 干湿循环条件下煤矿砂岩分离式霍普金森压杆试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(9):2557-2562.
Yuan Pu, Ma Qinyong. Split Hopkinson pressure bar tests on sandstone in coalmine under cyclic wetting and drying[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013,34(9):2557-2562.

[3] 王世鸣,李夕兵,宫凤强,等. 静载和动载下不同龄期混凝土力学特性的试验研究[J]. 工程力学,2013,30(2):143-149.
Wang Shiming, Li Xibing, Gong Fengqiang, et al. Experimental study on mechanical properties of different ages concrete under static and dynamic load[J]. Engineering Mechanics, 2013,30(2):143-149.

[4] 段士伟,李永池,李平. 陶瓷材料 SHPB 实验的改进垫块法[J]. 实验力学,2013,28(5):607-613.
Duan Shiwei, Li Yongchi, Li Ping. An improved inserts form in SHPB experiment for ceramic material[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013,28(5):607-613.

[5] 袁璞,徐颖. 养护时间对胶结砂相似模型材料抗压性能的影响[J]. 振动与冲击,2015,34(13):200-204.
Yuan Pu, Xu Ying. Influence of curing time on compressive properties of cemented sand similar materials[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015,34(13):200-204.

[6] 马芹永,袁璞,陈文峰,等. 人工冻土单轴与围压状态动力学性能对比分析[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(1):26-29.
Ma Qinyong, Yuan Pu, Chen Wenfeng, et al. Comparative analysis on dynamic mechanical properties of artificial frozen soil under uniaxial load and confining pressure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014,10(1):26-29.

[7] 王礼立. 应力波基础[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2010:52-60.

[8] 陶俊林,陈裕泽,田常津,等. SHPB 系统圆柱试件的惯性效应分析[J]. 固体力学学报,2005,26(1):107-110.
Tao Junlin, Chen Yuze, Tian Changjin, et al. Analysis of the inertial effect of the cylindrical specimen in SHPB system[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2005,26(1):107-110.

[9] 卢玉斌,宋丹路,李庆明,等. 分离式霍普金森压杆试验中工程材料断面摩擦模型的确定[J]. 振动与冲击,2012,31(3):18-22.
Lu Yubin, Song Danlu, Li Qingming, et al. Interface friction model in split Hopkinson pressure bar tests for engineering materials[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,31(3):18-22.

[10] 张祖根,李英雷,李英华,等. 压杆/试样表面接触变形对 SHPB 实验应变测量的影响[J]. 爆炸与冲击,2009,29(6): 573-578.
Zhang Zugen, Li Yinglei, Li Yinghua, et al. Influence of bar/specimen contact surfaces' indentation on strain measurement in SHPB experiments[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(6):573-578.

[11] 宋力,胡时胜. SHPB 实验中的端面凹陷修正[J]. 爆炸与冲击,2010,30(2):203-208.
Song Li, Hu Shisheng. Correction of end-face indentation in SHPB test[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(2):203-208.

[12] Zhou Y X, Xia K, Li X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012,49:105-112.

[13] 中国国家标准化管理委员会.煤与岩石物理力学性质测定方法:第 7 部分:单轴抗压强度测定及软化系数计算方法:GB/T 23561.7-2009[S].北京:中国质检出版社,2009.

[14] 果春焕,周培俊,陆子川,等.波形整形技术在 Hopkinson 杆实验中的应用[J].爆炸与冲击,2015,35(6):881-887.
Guo Chunhuan, Zhou Peijun, Lu Zichuan, et al. Application of pulse shaping technique in Hopkinson bar experiment[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(6):881-887.

[15] 赵光明,马文伟,孟祥瑞.动载作用下岩石类材料破坏模式及能量特性[J].岩土力学,2015,36(12):3598-3605.
Zhao Guangming, Ma Wenwei, Meng Xiangrui. Damage modes and energy characteristics of rock-like materials under dynamic load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(12):3598-3605.

[16] 方秦,孔祥振,吴昊,等.岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J].工程力学,2014,31(3):197-204.
Fang Qin, Kong Xiangzhen, Wu Hao, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock[J]. Engineering Mechanics, 2014,31(3):197-204.

[17] 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.
Song Li, Hu Shisheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(4):368-373.

[18] 刘婷婷,李建春,李海波,等.接触面积对波传播规律及节理力学特性影响[J].岩石力学与工程学报,2014,33(9):1749-1755.
Liu Tingting, Li Jianchun, Li Haibo, et al. Effects of contact area on stress wave propagation and joint mechanical properties[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(9):1749-1755.

Correction of non-parallel end-faces of rock specimens in SHPB tests

Yuan Pu[1,2], Ma Qinyong[1,2]

(1. *MOE Research Center of Mine Underground Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan* 232001, *Anhui, China*;
2. *School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan* 232001, *Anhui, China*)

Abstract: To investigate the influence of a non-parallel end-face for a short cylinder rock specimen on dynamic mechanical test results, we carried out numerical simulation of the SHPB test for rock material in 9 non-parallelisms and 5 Young's moduli using the finite element analysis software LS-DYNA, with the HJC constitutive model chosen for the rock material. The numerical simulation results show that when the non-parallelism of the rock specimen end-face is below 0.40%, the influence of the non-parallel end-face on the dynamic stress test results is negligible, while the influence of the non-parallel end-face on the dynamic strain test results is much bigger. When the Young's modulus remains the same, there is an approximately linear relation between the test error of the average strain rate and the non-parallelism or between the test error of the peak strain and the non-parallelism. When the non-parallelism remains the same, there is also an approximately linear relation between the test error of the average strain rate and the Young's modulus or between the test error of the peak strain and the Young's modulus. After conducting the binary linear regression analysis for the test error of the average strain rate and the test error of the peak strain obtained from numerical simulation, a correction formula for the average strain rate and the peak strain is proposed for the SHPB test of non-parallel end-face rock specimens.

Keywords: rock; SHPB; non-parallelism; strain rate; peak strain; error

(责任编辑 张凌云)