

围压与温度共同作用下盐岩的 SHPB 实验 及数值分析

方 秦¹, 阮 征¹, 翟超辰¹, 姜锡权², 陈 力¹, 方文敏²

(1. 解放军理工大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 解放军陆军军官学院 四系, 安徽 合肥 230031)

摘要: 在自主研发的可进行围压和温度共同加载的分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)实验装置 TSCPT-SHPB 基础上, 对盐岩在 5~25 MPa 围压作用下的轴向动力性能以及盐岩在 40 °C~80 °C, 0.0~0.5 MPa 围压下进行实验研究, 分析围压和应变率对盐岩在围压作用下轴向抗压强度动力增长系数(*DIF*)的影响, 以及温度和围压对盐岩动态力学性能的影响。结果表明: 在动态作用下, 围压对盐岩延性的提高有显著影响; 盐岩属率敏感性和温度敏感性材料, 其峰值强度随应变率的提高而提高, 在低围压下的提高幅度比高围压下显著, 并得到实验范围内盐岩材料动力增长系数(*DIF*)与围压和应变率关系的表达式; 在高应变率(400 s⁻¹)条件下, 盐岩的动态峰值强度随温度的升高而降低, 并依据实验数据, 拟合得到峰值强度在各实验温度下随围压变化的计算公式。为考虑应变软化效应, 对 ABAQUS 有限元软件中的 Drucker-Prager 模型进行改进, 并基于单向动态围压下的实验数据拟合的计算参数, 对盐岩 TSCP-SHPB 实验进行数值模拟, 模拟结果与实验结果吻合较好。

关键词: 岩石力学; 盐岩; 分离式 Hopkinson 压杆(SHPB); 围压; 应变率; 动力增大系数(*DIF*); 温度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)09 - 1756 - 10

SPLIT HOPKINSON PRESSURE BAR TEST AND NUMERICAL ANALYSIS OF SALT ROCK UNDER CONFINING PRESSURE AND TEMPERATURE

FANG Qin¹, RUAN Zheng¹, ZHAI Chaochen¹, JIANG Xiquan², CHEN Li¹, FANG Wenmin²

(1. College of National Defence Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China;

2. The No.4 Department, Army Officer Academy of PLA, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: A special split Hopkinson pressure bar(SHPB) under confining pressure and temperature, triaxial static confining pressure and temperature split Hopkinson pressure bar(TSCPT-SHPB), is designed. The uniaxial dynamic mechanical performances of salt rock with the confining pressures ranging from 5 to 25 MPa were studied experimentally and numerically. The salt rock under the condition of temperature ranging from 40 °C to 80 °C and the confining pressure from 0.0 to 0.5 MPa was also tested with the TSCPT-SHPB. The influences of the confining pressure and strain rate on the dynamic increasing factor(*DIF*) of axial compressive strength of salt rock and the effects of the temperature and confining pressure on the dynamic mechanical properties of salt rock were analyzed. It is demonstrated that: (1) The effect of confining pressure on the ductility of salt rock is tremendous under dynamic loading. (2) The salt rock is a rate-dependent and temperature sensitive material; and its maximum dynamic compressive strength increases as the strain rate increases; while the peak dynamic

收稿日期: 2012 - 04 - 27; **修回日期:** 2012 - 05 - 28

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(51021001); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB724608); 江苏省自然科学基金创新学者攀登项目(BK2008002)

作者简介: 方 秦(1962 -), 男, 博士, 1982年毕业于工程兵工程学院防护工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事工程防灾减灾方面的教学与研究工作。E-mail: fangqinjs@139.com

compressive strength of salt rock decreases as the temperature increases under the high strain rate of 400 s^{-1} . It is noted that the increase of the maximum dynamic compressive strength under low confining pressures is more obvious than that under high confining pressures. (3) The approximate expression for the effect of confining pressure and strain rate on *DIF* of salt rock was presented; and the relationship between peak confining strength and temperature under the high strain rate of 400 s^{-1} was also obtained from the test data. The experimental results by the TSCP-SHPB were validated by numerical simulation, in which the modified Drucker-Prager model and its experiment-based parameters were used.

Key words: rock mechanics; salt rock; split Hopkinson pressure bar(SHPB); confining pressure; strain rate; dynamic increasing factor(*DIF*); temperature

1 引 言

由于盐岩具有低渗透性、良好的蠕变行为(能够保证油气储存库的密闭性)和力学稳定性(能够适应储库内压力的变化),因此,赋存于地下几十米甚至 4 000 m 深的盐岩层带被世界各国作为石油、天然气等战略能源储库的首要选址^[1-2]。地下盐岩硐库围岩近区处于高围压状态,初始地应力为 $5 \sim 30 \text{ MPa}$ ^[3],工作温度可达到 $100 \text{ }^\circ\text{C}$,在服役期间要经常承受工作压力波动以及地震、储气库泄露^[4]等动力荷载作用。因此对盐岩在围压下动态力学特性的研究以及盐岩在高温和高围压环境下的动态力学行为对于盐岩硐库的稳定性、工作压力的确定都具有重要的理论研究价值和实际意义。

静载作用下盐岩单轴压缩曲线可分为 3 个阶段:(1) 弹性阶段:盐岩应力增加较快而应变增加缓慢。(2) 屈服塑性强化阶段:盐岩内部晶体界面间产生滑移,甚至出现微裂纹,但微裂纹可能没有贯穿,应变也不断增大;随着应变的不断增大,应力增长缓慢,盐岩内部的微裂纹不断增加,当到达盐岩的强度极限时,应力不再增加。(3) 破坏阶段:在盐岩达到其强度极限以后,并不像其他脆性岩石一样快速崩解,而是在应变不断增加的情况下,应力缓慢降低,表明盐岩具有较好的延性特征。

I. W. Farmer 和 M. J. Gilbert^[5]基于盐岩的三轴静力实验得出,当围压低于或超过 3.5 MPa 时,盐岩分别表现出应变软化或应变硬化特征。在应变软化时,随裂纹的扩展伴随有强烈的扩容变形,随着围压的增高,扩容逐步减小,盐岩表现为从脆性向延性转化。吴文^[6]基于上述实验结论也进行了盐岩三轴压缩实验,结果显示,盐岩峰值应变随围压的增加而增加,即围压能增强盐岩的延性特征,同时,他将剪切波跟踪技术应用于一级轻气炮实验装置上,对盐岩在极高应变率下(平均应变率为 $10^4 \sim$

10^6 s^{-1})的动力学行为进行了研究,结果表明,盐岩在冲击速度高于 200 m/s 时很快进入破坏阶段,而在 $70 \sim 200 \text{ m/s}$ 时其内部处于动态损伤状态。刘卫国等^[7]进行了盐岩无围压下的 SHPB 实验,结果表明,盐岩是一种应变率敏感材料,主要表现为强度的应变率增强效应。纪文栋等^[8]对盐岩在不同三轴围压下的应变率加载速率对盐岩三轴强度、轴向应变及侧向应变等物理力学性质影响进行了细致研究,得出围压是加载速率对盐岩性质有无影响的先决条件,当应变率为 $7.5 \times 10^{-6} \sim 1.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时属于静力学范畴,未对盐岩的动力学性能给出分析。在温度对盐岩的影响方面,吴文^[6]对不同温度下盐岩的静力学性质进行了实验研究,结果表明,盐岩的强度会随温度的升高而降低。陈剑文等^[9]详细研究了温度从 $24 \text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $270 \text{ }^\circ\text{C}$ 时盐岩力学性能的变化,发现盐岩的动弹性模量和泊松比都随温度的升高而降低。高小平等^[10]使用高温高压三轴流变仪对经历高温后盐岩材料的力学性能进行了研究,实验结果显示,温度的升高会对盐岩材料造成一定损伤,随着温度的增加,盐岩将具有更强的塑性变形能力。实际工程中,盐岩所处的环境往往是温度和围压共同存在的,然而目前国内外对于盐岩材料动力学性能的研究都是将温度和围压的影响分开考虑的。

由以上分析可见,已有的对于盐岩力学特性的研究多是针对其单轴动态特性和三轴静力学特性,受传统 SHPB 实验装置无法考虑围压和温度的局限,缺乏对盐岩在围压以及温度共同作用下动力学特性的研究。

本文利用自行研制的可考虑围压作用的 SHPB 实验装置 TSCP-SHPB(triaxial static confining pressure split Hopkinson pressure bar),基于围压 $5 \sim 25 \text{ MPa}$ 的 SHPB 实验,分析盐岩在围压作用下,围压和应变率对其单轴动态抗压强度或动力增长系数(*DIF*)的影响。在此基础上研制出可以同时进行温度和围压加载的实验装置 TSCPT-SHPB,并通过该装置对

温度和围压共同作用下盐岩材料的动态力学性能进行研究，得到不同温度和围压作用下盐岩的动态应力-应变关系曲线，继而拟合出盐岩在各实验温度下峰值强度随围压变化的函数关系。

2 SHPB 实验装置的研制

2.1 TSCP-SHPB 实验装置研制

基于一维波理论和应力均匀性假设的 SHPB 装置^[11]广泛应用于材料高应变率($10^1 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$)实验中。本文研制的 $\phi 75 \text{ mm}$ TSCP-SHPB 实验装置包括传统的 SHPB 实验装置和三向施压装置，如图 1 所示。其中子弹、入射杆和透射杆的长度分别为 300，3 500 和 2 000 mm。材料均为轴承钢，密度为 $7\,800 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量为 210 GPa。试件在实验过程中的平均应变率由控制子弹撞击入射杆速度的出膛气压决定。为更准确控制实验中围压值大小，降低因加压导致的实验安全隐患，增加试件围压施加的稳定性，该装置中采用液压油泵油加压技术。三向施压装置(如图 2 所示)由环向加压、轴向加压和加压供油装置 3 部分组成。在压杆两侧的 2 根杆承受由于轴压而在系统内部产生的拉力，这种设计使系统内轴向力平衡，避免了在系统外再建设强大的止推装置。故此实验装置可进行不同环向、轴向压力比实验。为更好地控制实验质量，保证实验过程中轴压施加的稳定性，防止试件在击打过程中因变形导致轴压卸载，在轴压装置中加设了蝶形弹簧(如图 2(b)所示)。实验中应变片黏贴位置如图 3 所示，为了对试件中作为率敏感性标尺的应力峰值的测量更加准确，3#应变片(主要测量试件中应力信息的透射波)采用了敏感性程度更高的半导体应变片，其余均为电阻应变片。实验中预先对试件施加围压，并保持一定时间后发射子弹进行实验。

基于 TSCP-SHPB 实验装置测得的典型波形见图 4。

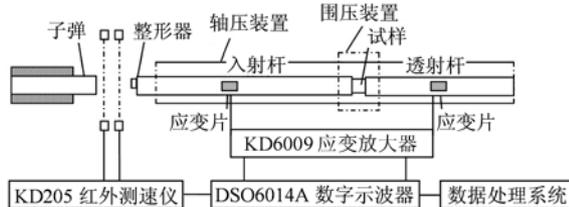


图 1 TSCP-SHPB 实验装置示意图

Fig.1 Schematic illustration of TSCP-SHPB test device



(a) 环压装置



(b) 轴压装置



(c) 供油装置

图 2 三向施压装置

Fig.2 Device of triaxial confining pressure

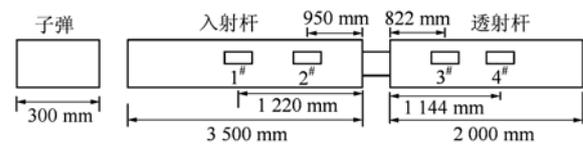
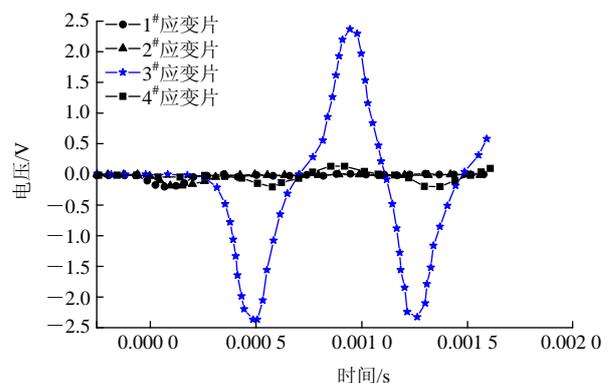


图 3 实验中各应变片位置

Fig.3 Positions of strain gages in the test



(a) 空打情况

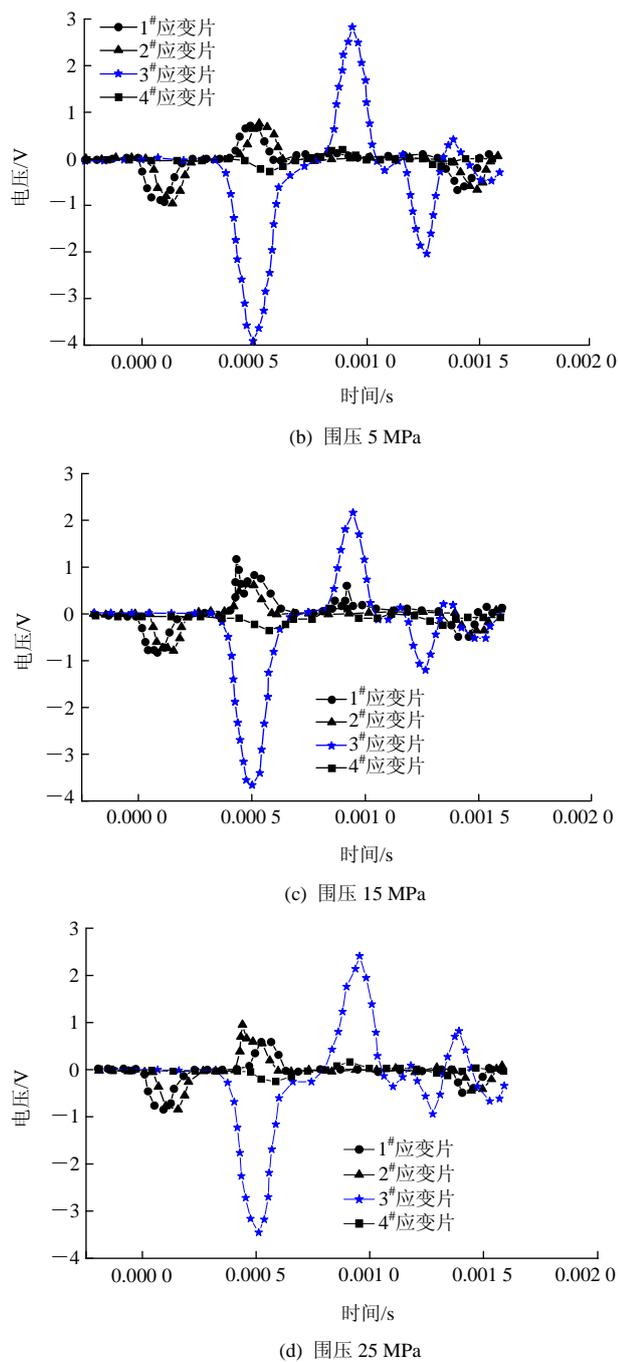


图 4 应变片测得的典型波形

Fig.4 Typical waveforms measured by strain gauges

2.2 TSCPT-SHPB 实验装置研制

基于 TSCP-SHPB 实验装置，安装上温度加载装置，即为 TSCPT-SHPB 实验装置。其设计原理如图 5 所示。

在 SHPB 实验中，一般会采用 2 种方法给试件加热：一是在整个实验系统组装完毕之后将试件和一部分波导杆共同加热；二是先将试件加热，再进行系统组装。第一种方法的实验设备组装过程较为简单，但会在波导杆内产生温度梯度。温度变化导

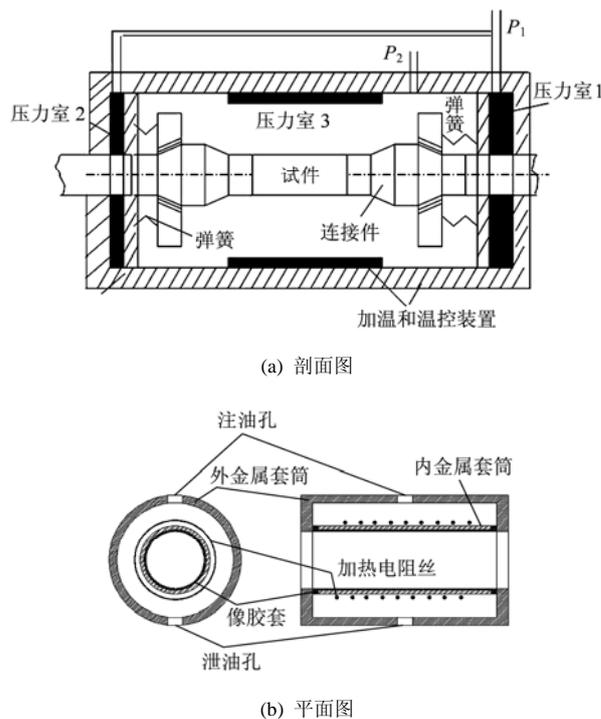


图 5 TSCPT-SHPB 实验装置原理图

Fig.5 Schematic illustration of TSCPT-SHPB test device

致波导杆的弹性模量发生变化，改变了波速和波阻抗，使得应力波在波导杆中传播的过程中发生改变。因此，必须在数据处理中对实验采集到的应力波信号进行修正。第二种方法虽然消除了波导杆中温度梯度的不利影响，但是需要复杂的实验装置、特殊的材料以及操作流程，实验质量难以控制。本文选择了第一种加热方法，即在环向加压腔体中放入加热装置，使液压油升温，传导加热盐岩试件。根据 J. M. Krafft 等^[12-13]的研究成果，温度不超过 300 °C 时，其对波导杆力学性能的影响可以忽略不计，数据处理过程中不需引入温度梯度的修正。本文加载的温度低于 100 °C，因而可以忽略温度对波导杆材料性质的影响，不进行温度梯度的修正。

3 TSCP-SHPB 实验结果及其分析

从图 4(a)可以看出，在空打(无试件)情况下没有发现反射波，说明实验中入射杆和透射杆能无反射对接。考虑到盐岩硐库围岩的真实受力状态，本实验轴压和环压相同，分别取为 5，15 和 25 MPa。盐岩试件如图 6 所示，其直径为 74 mm，厚度为 37 mm，实验结果见表 1，其中 σ_c 为实验围压， $\bar{\epsilon}$ 为测得的平均应变率， σ_p 为峰值应力。

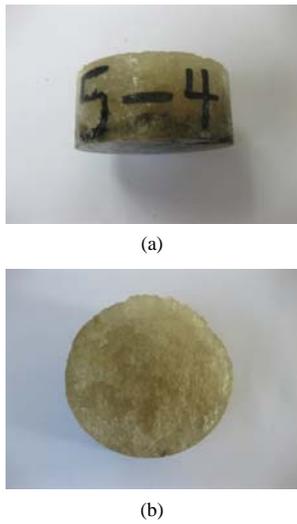


图 6 盐岩试件

Fig.6 Specimens of salt rock

表 1 TSCP-SHPB 实验数据
Table 1 TSCP-SHPB test data

试件编号	σ_c /MPa	$\bar{\epsilon}$ /s ⁻¹	σ_p /MPa
5-1	5	205	113.58
5-2	5	426	145.59
5-3	5	519	158.28
5-4	5	695	167.86
5-5	5	739	193.73
15-1	15	440	150.11
15-2	15	476	158.73
15-3	15	535	163.21
15-4	15	609	165.16
15-5	15	631	175.96
25-1	25	531	163.41
25-2	25	433	142.45
25-3	25	430	140.77
25-4	25	513	155.58
25-5	25	574	155.28
25-6	25	597	186.25

注：平均应变率 $\bar{\epsilon}$ 由子弹撞击速率决定。

3.1 围压对盐岩动态应力 - 应变曲线的影响

为便于对比，图 7 给出了不同围压下盐岩的静态压缩曲线^[6]。从图 7 可以看出，刚施加围压后，盐岩的峰值应力显著提高，延性得到了极大提升，由无围压时峰后应力值陡降的偏脆性行为转变为有围压时的屈服点过后应力缓慢变化并保持较稳定状态的延性行为，这说明静载下围压对于盐岩的峰值应力和延性有明显的增加作用。峰值应力 σ_p 与围压 σ_c 的关系曲线可由下式拟合：

$$\sigma_p = -0.1187\sigma_c^2 + 5.1467\sigma_c + 30.9214 \quad (1)$$

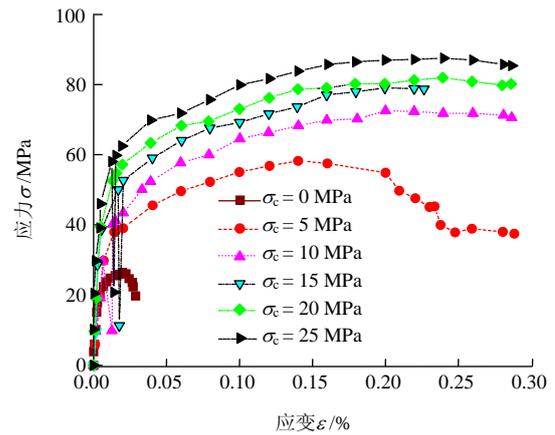
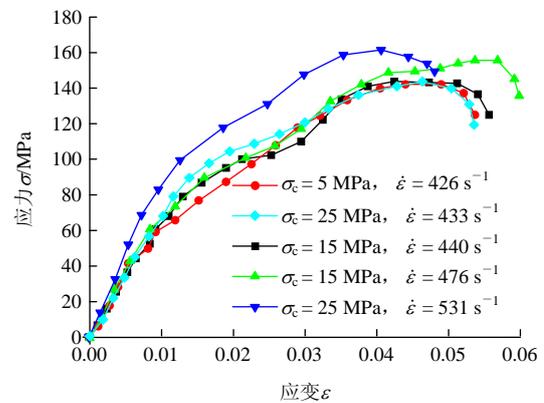


图 7 不同围压下盐岩静态压缩曲线^[6]

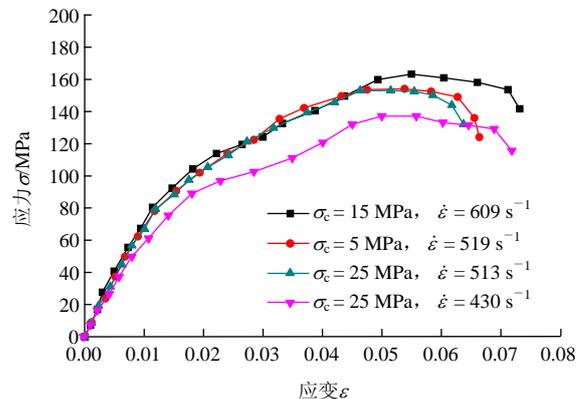
Fig.7 Static compression curves of salt rock under different confining pressures^[6]

图 8 分别给出了 3 种平均应变率下围压对应力 - 应变曲线的影响，其中， ϵ 为被测试件的应变率，可以看出，应变率相近时，围压对盐岩力学行为的影响不如静态压缩下显著。

图 9 给出了试件 5-1 在 $\sigma_c = 0, 5 \text{ MPa}$ ， $\dot{\epsilon} = 205 \text{ s}^{-1}$ 及 $\sigma_c = 0 \text{ MPa}$ ， $\dot{\epsilon} = 0, 196 \text{ s}^{-1}$ 条件下的应力 - 应变曲线。可以看出，应变率相近时，有无围压作用对盐岩的动态力学行为有很大影响，围压使盐岩峰值应力和延性显著提高，这与静态下围压的影响



(a) $\bar{\epsilon} = 425 \text{ s}^{-1}$



(b) $\bar{\epsilon} = 550 \text{ s}^{-1}$

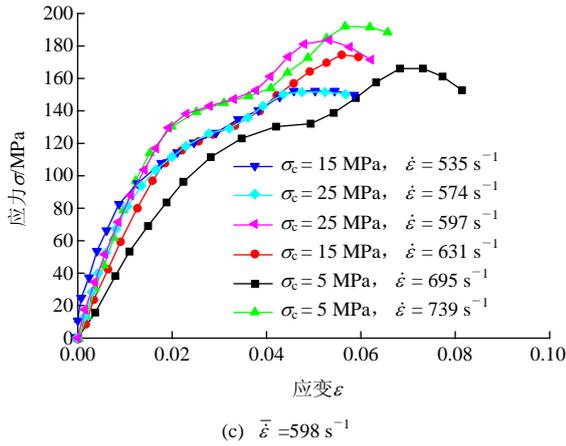


图 8 高应变率下围压对应力 - 应变曲线的影响

Fig.8 Effect of confining pressure on stress-strain curves under high strain rates

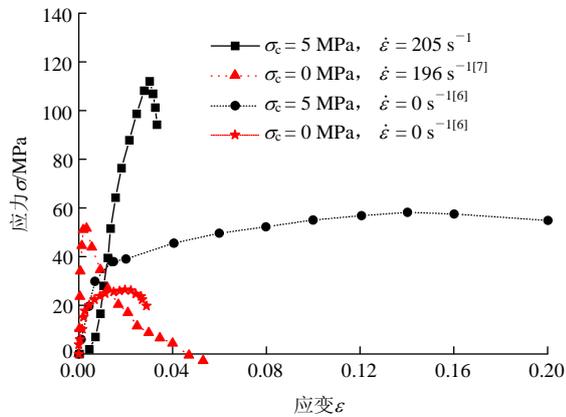


图 9 有、无应变率时围压对盐岩应力 - 应变曲线的影响

Fig.9 Influence of confining pressure on stress-strain curves of salt rock with and without strain rate effect

规律一致；此外，有无围压作用的盐岩力学特性曲线比较发现，动载作用下的峰值应差异比静载下相应的差值更明显。反观围压条件下各实验数据可以看出，在动载作用下围压对盐岩峰值应力的影响(见图 8)不如静载作用下(见图 7)显著，这说明动载作用下围压对盐岩峰值应力的影响规律与静载条件下有所区别。这是由于在单轴 SHPB 实验中，对于静水压力相关材料在转换应变率上的表观压缩强度随应变率的变化主要由惯性导致的围压引起，并不是真正的应变率效应，而高围压条件下的惯性效应不再明显，转换应变率不再清晰^[14]，从而在高围压下盐岩材料的应变率强化效应明显低于低围压以及无围压状态。故高围压下材料 *DIF* 值较低围压偏低(详见后文分析)，而 *DIF* 值正是在各自围压下的动态应力峰值与静态应力峰值之比，因此动态峰值应力的围压效应不如静态下显著。

3.2 围压作用下盐岩的应变率效应研究

图 10 给出了不同应变率下盐岩的单轴压缩曲线^[7]，可以看出，无围压时，应变率增大对盐岩的强度提高有显著影响，但是峰值应变基本保持不变。

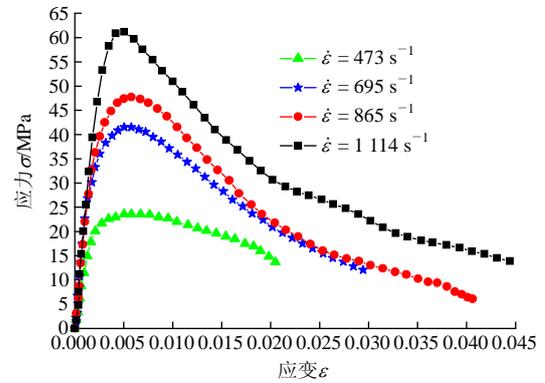
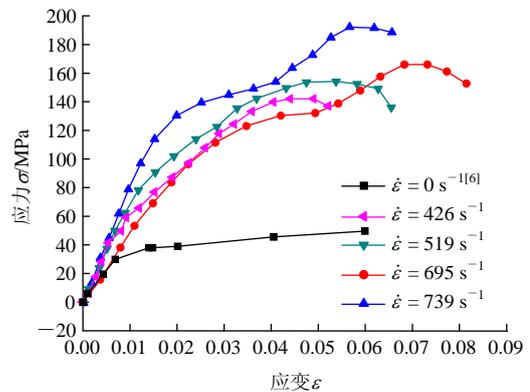


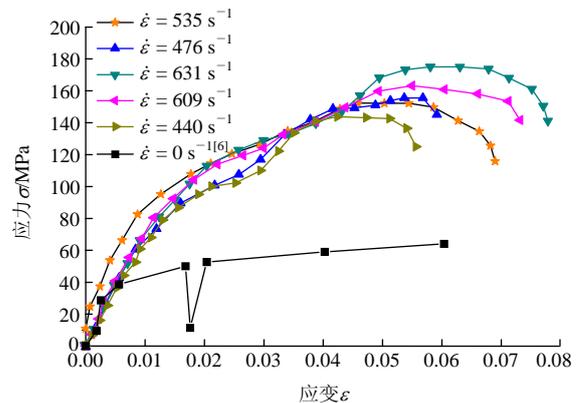
图 10 单轴压缩条件下盐岩的应变率效应^[7]

Fig.10 Strain rate effect of salt rock under uniaxial compression^[7]

图 11 给出了不同围压条件下盐岩动态应力 - 应变曲线。从相同围压下不同应变率的实验数据中可以得出，盐岩在围压作用下仍为率敏感材料，但是高围压(15 和 25 MPa)下应变率强化效应不如低围压(5 MPa)下显著。这同样是由于单轴 SHPB 实验的惯性效应影响，高围压下的应变率强化效应不如低围压下显著(详见节 3.1 中的分析)。



(a) 围压 5 MPa



(b) 围压 15 MPa

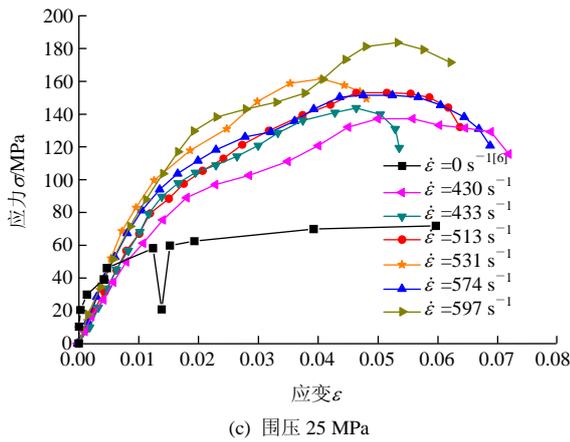


图 11 围压作用下盐岩的应变率效应

Fig.11 Stain rate effect of salt rock under confining pressures

3.3 不同围压下盐岩 DIF 曲线

定义盐岩动力放大系数 $DIF = \sigma_d^c / \sigma_s^c$ ，其中 σ_d^c 和 σ_s^c 分别为同一围压下的动态应力峰值与静态应力峰值。由实验测得的盐岩在不同围压、不同应变率下的应力峰值，可以拟合得出盐岩材料在实验范围内动力放大系数随围压和应变率变化曲线，如图 12 所示。

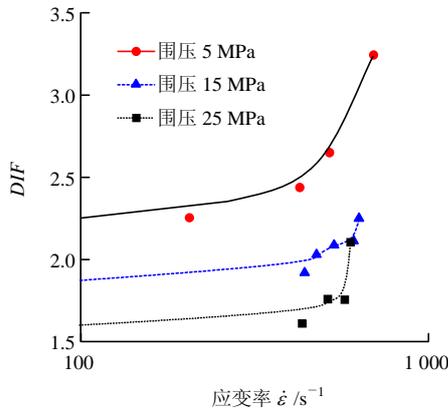


图 12 不同围压下盐岩 DIF 与应变率关系曲线

Fig.12 Relationship curves between DIF and strain rate of salt rock under different confining pressures

拟合曲线方程形式为

$$DIF = A \exp(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}^*) + B \quad (2)$$

式(2)的适用范围为 $10^2 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。对于本文 3 种围压下的实验数据，得到的待定系数 A, B 和 $\dot{\epsilon}^*$ 值见表 2。

4 TSCP-SHPB 数值模拟分析

为进一步验证实验数据及结论，本文按实验模

表 2 式(2)中系数值

σ_c / MPa	A	$\dot{\epsilon}^* / \text{s}^{-1}$	B
5	0.011 25	0.540 75	1.023 53
15	0.014 82	0.637 93	1.009 94
25	0.002 26	1.009 94	0.983 73

型尺寸和参数，基于可考虑围压和应变率效应的 Drucker-Prager 模型进行数值分析，有限元模型如图 13 所示。为了精确捕捉应力波，需要一个足够精细的网格，故在沿杆轴向对网格进行了细化，使撞击荷载发生在至少 10 个单元跨度内^[15]。对围压的处理为：在试件处进行预加载，然后在入射杆端施加与实验相同的撞击荷载。盐岩材料的密度为 $2\ 200 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量取 8 GPa ，泊松比为 0.37，内摩擦角与膨胀角均取为 40° ；入射杆、透射杆尺寸及材料参数均与实验相同。

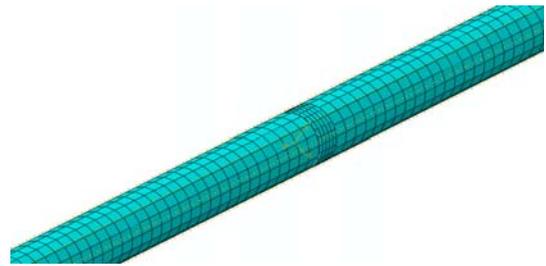


图 13 盐岩 TSCP-SHPB 实验的有限元模型

Fig.13 Finite element model for TSCP-SHPB test of salt rock

盐岩的力学特性不同于一般的岩石，尤其是在塑性阶段，表现出很强的延性特征，故对 Drucker-Prager 模型的塑性阶段进行了改进，在 Drucker-Prager 模型中加入了软化行为的描述，其在不同应变率作用下的屈服应力与塑性应变关系见图 14。对盐岩在围压和应变率共同影响下的实验过程进行数值模拟，部分模拟结果如图 15 和 16 所示，可以看出，数值模拟与实验数据吻合较好。

5 TSCP-SHPB 实验结果及其分析

考虑到盐岩在地下硐库中实际工作温度在 100°C 以下，并基于节 3.1 和 3.2 中研究发现的低围压对盐岩特性影响明显的结论，在节 2.2 基础上开展了表 3 所示的 9 种工况下的实验。在实验中控制子弹出发速度不变，故实验中盐岩应变率基本保持一致，可

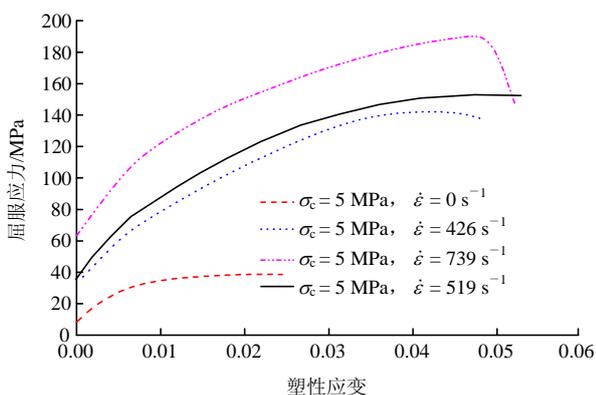
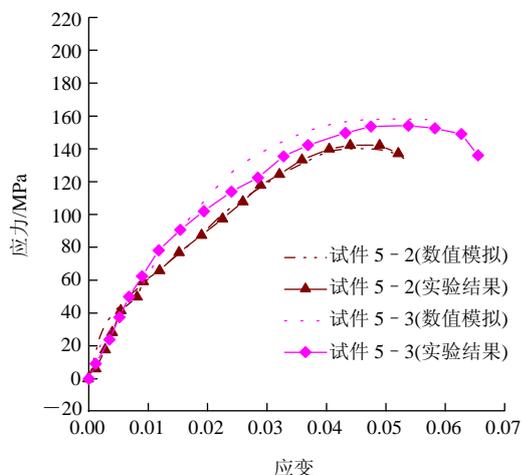


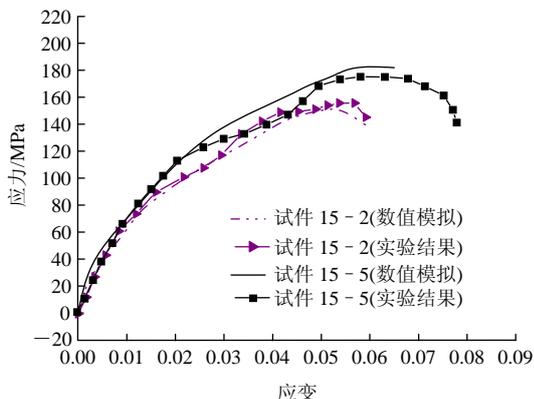
图 14 盐岩屈服应力与塑性应变的关系曲线

Fig.14 Relationship curves between yield stress and plastic strain of salt rock

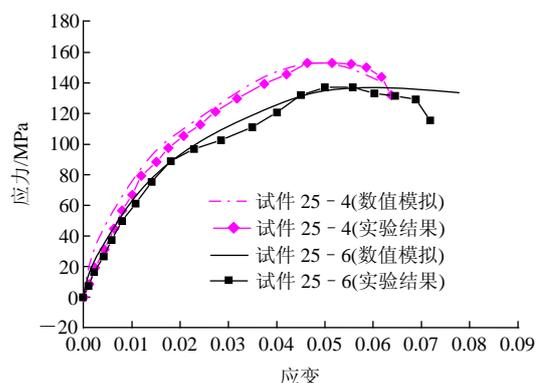
认为是同一应变率下的盐岩应力 - 应变关系, 平均应变率为 400 s^{-1} 。各工况下应力 - 应变曲线如图 17 所示, 可以看出, 盐岩在围压作用下的动力行为也出现出温度软化效应, 表现为应力峰值随温度升高而降低; 施加围压后, 盐岩的峰值应力显著提高, 但围压从 0.25 MPa 变化到 0.50 MPa 时应力峰值增加甚少。



(a) 围压 5 MPa



(b) 围压 15 MPa



(c) 围压 25 MPa

图 15 3 种围压下数值模拟与实验结果对比

Fig.15 Comparisons between numerical simulations and test results under three confining pressures

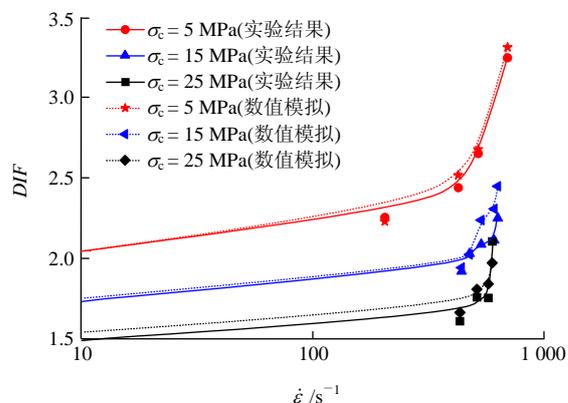


图 16 不同围压下盐岩 DIF- $\dot{\epsilon}$ 曲线的数值模拟与实验结果对比

Fig.16 Comparisons of DIF vs. strain rate curves of salt rock between numerical simulation and test results under different confining pressures

表 3 各工况下峰值应力

Table 3 Peak stresses for different cases

温度/ $^{\circ}\text{C}$	峰值应力/MPa		
	$\sigma_c = 0.00 \text{ MPa}$	$\sigma_c = 0.25 \text{ MPa}$	$\sigma_c = 0.50 \text{ MPa}$
40	76.01	126.88	126.06
60	59.08	109.12	117.51
80	67.42	101.64	109.48

由实验测得的盐岩在不同围压和不同温度下的峰值应力(见表 3), 假设不同温度下的峰值应力 σ_p 与围压 σ_c 的关系仍满足吴文^[6]提出的二次抛物线关系, 即

$$\sigma_p = a\sigma_c^2 + b\sigma_c + c \quad (3)$$

可以拟合得出盐岩材料在实验范围内峰值应力随围压的变化曲线, 如图 18 所示, 得到的特定系数 a , b 和 c 值见表 4。

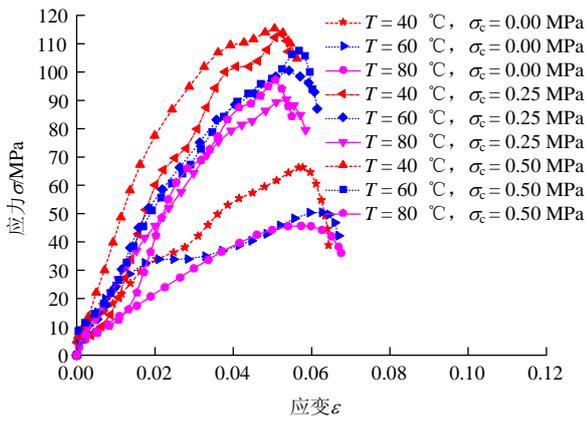


图 17 不同围压和温度下应力 - 应变曲线

Fig.17 Stress-strain curves under different confining pressures and temperatures

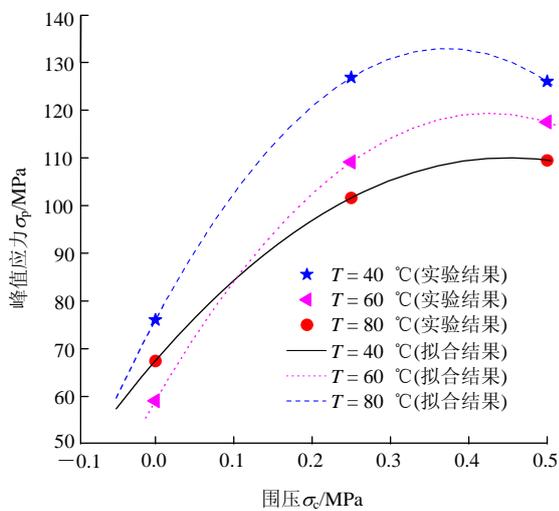


图 18 不同温度下盐岩动态应力峰值与围压关系曲线

Fig.18 Relationship curves between peak stress and confining pressure of salt rock under different temperatures

表 4 式(3)中系数值

Table 4 Values of coefficients in Eq.(3)

T/°C	a	b	c
40	-413.52	306.86	76.01
60	-333.20	283.46	59.08
80	-221.04	189.64	67.42

6 结 论

为研究围压作用下盐岩的动态力学性能, 本文基于自主研发的可考虑围压作用的 TSCP-SHPB 实验装置, 进行了 5~25 MPa 围压下盐岩单轴动态响应的实验研究和数值分析, 讨论了围压和应变率对

盐岩应力 - 应变曲线的影响, 在此基础上进一步研制出可同时施加温度和围压的 TSCP-SHPB 实验装置, 并开展了盐岩在同时施加围压和温度条件下的应变率效应实验。本文得到的主要研究结论如下:

(1) 自主研发了考虑围压作用的 TSCP-SHPB 实验装置, 可分别对试件环向和轴向加压, 经实验验证, 在 25 MPa 压力范围内可得到较好的围压作用下的盐岩动态力学特性结果, 并在此基础上研制出可同时施加温度和围压的 TSCP-SHPB 实验装置, 经实验验证, 该装置可以进行室温至 100 °C 和围压不超过 1 MPa 条件下的温度与围压共同加载实验。

(2) 盐岩属于率敏感性和温度敏感性材料, 具有应变率强化效应和温度软化效应, 但在不同围压作用下应变率强化效应不同, 低围压(5 MPa)下强化效应比高围压(15 和 25 MPa)下显著。

(3) 运用改进后的 ABAQUS 有限元软件中的 Drucker-Prager 模型, 以及围压和应变率效应的实验数据拟合得到的计算参数, 对围压和应变率共同作用下的盐岩 TSCP-SHPB 实验进行数值模拟, 模拟结果与实验结果吻合较好。

参考文献(References):

[1] HUNSCHE U. Result and interpretation of creep experiments on rock salt[C]// Proceedings of the 1st Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal, Germany: Trans. Tech. Publications, 1984: 159 - 167.

[2] 杨春和, 李银平, 屈丹安, 等. 层状盐岩力学特性研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(4): 484 - 494.(YANG Chunhe, LI Yinping, QU Dan'an, et al. Advances in researches of the mechanical behaviors of bedded salt rocks[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(4): 484 - 494.(in Chinese))

[3] 唐建新, 王宏图, 李晓红, 等. 深部岩盐矿地应力的确定及特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3 954 - 3 958.(TANG Jianxin, WANG Hongtu, LI Xiaohong, et al. Measurement and characteristics of in-situ stress in deep rock salt mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3 954 - 3 958.(in Chinese))

[4] 谢丽华, 李鹤林, 赵新伟, 等. 盐穴地下储气库事故统计及风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(9): 125 - 131.(XIE Lihua, LI Helin, ZHAO Xinwei, et al. Statistics and risk analysis of underground gas storage accidents in salt caverns[J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(9): 125 - 131.(in Chinese))

- [5] FARMER I W, GILBERT M J. Time dependent strength reduction of rock salt[C]// Proceedings of the 1st Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal, Germany: Trans. Tech. Publications, 1984: 4 - 18.
- [6] 吴 文. 盐岩的静、动力学特性实验研究与理论分析[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2003.(WU Wen. Experimental studies and theoretic analysis of static and dynamic mechanical characteristics of rock salt[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2003.(in Chinese))
- [7] 刘卫国, 王肖钧, 姜锡权. 冲击载荷下盐岩的力学性能和本构关系研究[J]. 防护工程, 2011, 4(33): 6 - 10.(LIU Weiguo, WANG Xiaojun, JIANG Xiquan. Study on the dynamic behavior and constitutive relationship of salt rock[J]. Protective Engineering, 2011, 4(33): 6 - 10.(in Chinese))
- [8] 纪文栋, 杨春和, 姚院峰, 等. 应变加载速率对盐岩力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2 507 - 2 513.(JI Wendong, YANG Chunhe, YAO Yuanfeng, et al. Effects of loading strain rate on mechanical performances of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2 507 - 2 513.(in Chinese))
- [9] 陈剑文, 杨春和, 冒海军. 升温过程中盐岩动力特性实验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 231 - 236.(CHEN Jianwen, YANG Chunhe, MAO Haijun. Experimental research on dynamical properties of rock salt during rising temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 231 - 236.(in Chinese))
- [10] 高小平, 杨春和, 吴 文, 等. 温度效应对盐岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1 775 - 1 778.(GAO Xiaoping, YANG Chunhe, WU Wen, et al. Experimental studies on temperature effect of mechanical properties of rock salt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1 775 - 1 778.(in Chinese))
- [11] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 52 - 60.(WANG Lili. Foundation of stress waves[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985: 52 - 60.(in Chinese))
- [12] KRAFFT J M, SULLIVAN A M, TIPPER C F. The effect of static and dynamic loading and temperature on the yield stress of iron and mild steel in compression[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1954, 221(1 144): 114 - 127.
- [13] CAMPBELL J D, DOWLING A R. The behavior of materials subjected to dynamic incremental shear loading[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1970, 18(1): 43 - 63.
- [14] ZHANG M, WU H J, LI Q M, et al. Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests, part I: experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(12): 1 327 - 1 334.
- [15] 庄 苗, 张 帆, 岑 松, 等. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 214 - 217.(ZHUANG Zhuo, ZHANG Fan, CEN Song, et al. ABAQUS nonlinear finite element analysis and examples[M]. Beijing: Science Press, 2005: 214 - 217.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 地下工程建设安全面临的挑战与对策;
- (2) 隧道软弱围岩挤压大变形非线性流变力学特性研究;
- (3) 汶川地震大光包巨型滑坡动力响应特征研究;
- (4) 岩爆孕育过程的动态调控;
- (5) 溪洛渡特高拱坝建设的岩石工程关键技术;
- (6) 岩体水力劈裂非稳定渗流影响机制初探;
- (7) 回采工作面多巷布置留巷围岩变形特征与支护技术;
- (8) 溪洛渡拱坝施工期岩体质量评价与大坝稳定分析。