

岩盐冲击过程本构关系和状态方程研究

Investigation on the constitutive relationship and equation of state for rock salt under impact loading

吴文¹, 徐松林², 杨春和¹, 白世伟¹, 郑发金³

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学技术大学 中国科学院材料的力学行为与设计重点实验室, 安徽 合肥 230026; 3. 桂林市城郊供电有限公司, 广西 桂林 541004)

摘要: 采用 Lagrange 分析方法, 对压剪联合冲击加载与单纯的压缩冲击加载下岩盐应力应变关系和状态方程进行了详细的探讨。其结果表明, 冲击压缩过程岩盐的应力应变关系有较强的非线性和应变率效应, 而其 Hugoniot 线则表明此材料有约 3% 的孔洞。由于在冲击过程中, 岩盐因局部缺陷产生高温熔化, 影响到剪切行为的分析, 因此, 未作进一步探讨。岩盐也由于这种熔化而使原始的缺陷得到了修复。

关键词: 岩石力学; 实验研究; 岩盐; 冲击; 本构关系; 状态方程

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)03-0367-06

作者简介: 吴文(1963-), 男, 博士, 副研究员, 1986 年毕业于重庆大学采矿系, 主要从事岩土工程与环境及能源储存方面的研究。

WU Wen¹, XU Song-lin², YANG Chun-he¹, BAI Shi-wei¹, ZHENG Fa-jin³

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Science and Technology of China, Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230027, China; 3. Guilin Suburbs Power Supply Ltd Co, Guilin 541004, China)

Abstract: The Lagrangian analysis method is employed in the present paper to investigate the dynamic constitutive relationship and equation of state for rock salt under impact compression and combined pressure shear impact loading. The results show that the stress-strain relationship is evidently non-linear and rate-dependent. Based on $P-V$ Hugoniot curves, the sample is shown to be a porous material with void volume about 3 percent. With flaws in the meso scale, rock salt sample melts around these flaws during impact loading, and the transversal form of shear wave is greatly changed. Therefore, no further discussions on shear behaviors are conducted. In the process, the flaws seem to be recovered after melting.

Key words: rock mechanics; experimental investigation; rock salt; impact; constitutive relationship; equation of state (EOS)

0 引言*

冲击荷载作用下岩石介质响应的研究对于一些实际的爆破工程设计岩石洞室、隧道的爆破施工及防护工程有着十分重要的意义。由于岩盐在低渗透性、低孔隙率、可以承受较大的变形及损伤的自我恢复等方面有着十分显著的优势, 在能源储藏、核废料处理等领域有着重要的应用背景, 对其物理力学性能的研究已得到广泛的关注。

当材料本构关系已知, 若给出边界条件及初始条件, 则材料内部各处应力、速度、应变时程变化总是确定的。由一组不同位置的波形去确定材料本构, 属于反问题, 由此得到的解的表现形式不唯一^[1-3]。通过作本构假定来处理这类问题, 则具有相当大的随机性和人为性。Fowles 等^[4]引入等速度相速、等应力相速、等应变相速概念, 在已知应力或速度波形情况下, 可以得到其他参数的时空变化。Tang 等^[5]用这种方法研究了冲击波引起的相变。Cowperthwaite 等^[6]从多方介质的应力场、速度场、比容场的理论解出发, 验证了 Fowles 等提出的方法。但是, 当波形有衰减时, 就很难构造等相线。Grady^[7]在研究岩石中球面发散波时, 引

入了路径线。Seaman^[8]基于应力、时间对 Lagrange 坐标三阶导数为零的假设比较系统地研究了这种方法。目前此方法被广泛地用于平板撞击实验研究, 在 Fowles 相速度法之后, 又有路径线法、冲量时间积分函数法、反解法、曲面拟合法和自洽检验法等^[3]。

冲击下岩石类脆性材料主要在其剪切性能上存在差异, 因此, 本文将采用 Lagrange 分析方法, 对岩盐在压剪联合加载以及压缩冲击加载过程的本构关系和状态方程进行详细的探讨。

1 试验与 Lagrange 分析方法

1.1 试验

岩盐冲击试验包括两方面的内容: 压剪联合冲击和单纯冲击压缩。试验在中国科学技术大学轻气炮试验室口径为 57 mm 的一级轻气炮上完成。

联合冲击加载基于平板斜撞击试验采用粒子速度计进行测试。靶内部粒子速度的测量利用自研制的双磁场 IMPS 粒子速度测量系统^[9], 粒子速度计采用自研

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50274065; 10202022)

收稿日期: 2003-10-22

制的电磁粒子速度计。整个计尺寸为:长 60 mm,宽 21 mm,包括两层绝缘胶,计厚为 50 μm 。测量计尺寸为:5 个计长度分别为 15.44, 13.44, 11.44, 9.44 和 7.44 mm,计之间的间距为 2 mm,计宽为 100 μm 。

图 1 所示为平板斜碰撞示意图。根据应力波理论,飞片以倾斜角 α ,速度 u_0 与靶发生斜碰撞,将在试样中依次传播四道主要波阵面:加载压缩纵波(P^+)、加载剪切横波(S^+)、卸载纵波(P^-)和卸载剪切波(S^-),形成四波五区。每道波的传播特性与前方区域的材料当时当地状态相关,每道波产生的影响留给了后方区。因此,波特特性实时地反映了材料的动特性,并能在一定程度上体现材料的细观统计特性。其中的剪切波特别重要。加载剪切波在前方纵波压缩应力状态上增添剪切分量,它的传播特性如波速、幅值、弥散等,反映材料经压缩加载后的损伤程度和剩余强度。跟在卸载纵波后的 S^- 波,由于不存在压应力,更能揭示材料经压缩脉冲(P^+ 、 P^-)作用后的实时状态,特别是剩余剪切强度和损伤度。此方法就是剪切波跟踪技术(SWT)^[10]。

在压剪联合冲击加载试验中,我们发现,试样内部除了上述的四道波阵面外,在 S^+ 和 P^- 之间多出了一道卸载波。为了弄清其产生原因,专门进行了单纯的冲击压缩试验。此试验基于平板正撞击试验进行靶内应力测试。靶内应力的测试采用自研制的锰铜应力计,其敏感栅为直径 6 mm 的螺旋形栅,标准电阻为 50 Ω ,基底材料为缩醛胶膜,一般测量应力的范围为 0.05 ~ 20 GPa。与前面的斜撞击不同,平板正碰撞将在试样中依次传播二道主要波阵面: P^+ 和 P^- 。

本次试验的误差约为 5%。

1.2 Lagrange 分析方法

忽略热传导、体积力、内部能源的影响,Lagrange 坐标下的守恒方程为:

$$\left. \begin{aligned} (\partial \varepsilon / \partial t)_h + (\partial u / \partial h)_t &= 0, \\ \rho_0 (\partial u / \partial t)_h + (\partial \sigma / \partial h)_t &= 0, \\ (\partial E / \partial t)_h + \sigma / \rho_0 \cdot (\partial u / \partial h)_t &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 u 是粒子速度; σ 是工程应力; ε 是应变; E 为内能; h 为 Lagrange 坐标; ρ_0 为初始密度。在一维平面应变条件下, $\varepsilon = 1 - \rho_0 V$, V 为比容。同样也可以建立类似的剪切守恒方程。

上述守恒方程中,没有对应力、应变、速度等量进行任何假定,守恒方程适用于任何连续介质。由此方程组可知:①若应力历史已知,那么依次可以得到粒子速度的历史,比容的历史和比内能的历史;②若粒子速度历史已知,则还需要已知应力边界,以上方程组才可解。

守恒方程是 h 、 t 的偏微分方程,而试验得到的只是一组不同 Lagrange 坐标下的速度波形或应力波形、应变波形。只有将对 t 的偏导数转化成对 Lagrange 坐标的偏导数才可以比较方便地求解。复杂材料中传播的应力波一般为非简单波,在其传播过程中会发生衰减、弥散等现象,针对非简单波,Seaman 等引入路径线方法,构造如图 2 的路径线。沿此路径线,函数 f 满足以下关系^[8]:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial h} \right)_t = \frac{df}{dh} - \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_h \frac{dt}{dh}, \quad (2)$$

f 可以是应力、速度、应变。将守恒方程中对 h 的偏导数用式(2)替换。则有:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right)_h + \left(\frac{du}{dh} - \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_h \frac{dt}{dh} \right) &= 0, \\ \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_h + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{d\sigma}{dh} - \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \right)_h \frac{dt}{dh} \right) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中仅有对 t 的偏导数,沿量计线的 $(\partial f / \partial t)_h$ 很容易由试验波形得到。 (df/dt) 是沿路径线的全导。可用插值或多项式,或指数拟合的方式得到 $f(h)$,从而

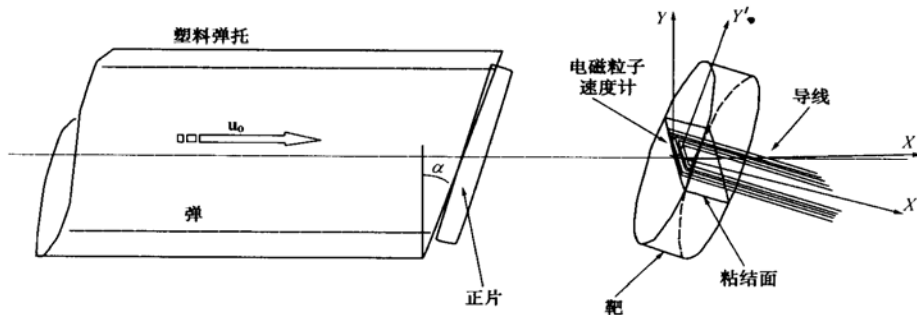


图 1 平板斜碰撞示意图

Fig. 1 An inclined impact of plate

确定 (df/dt) 。Seaman 在处理此问题时,令 $d^3 \sigma / dh^3 \equiv 0$,得到一组包括二阶导数在内的封闭的代数递推

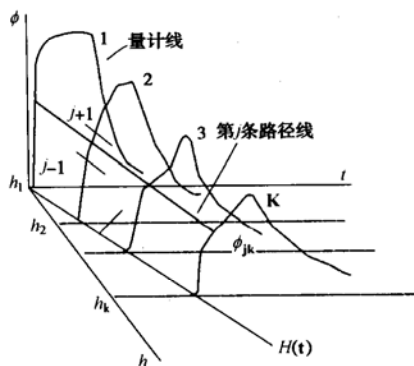


图2 量计线与路径线

Fig. 2 Gauge lines and path lines

方程组^[8],从而可以逐步解出相应的应力波形。当然,具体应用时还应注意很多问题,特别是路径线的划分。

本次试验的岩盐样品为大颗粒材料,局部强烈的不均匀性使得波在传播过程中有明显的弥散和衰减特征。在处理过程中,首先将整个波形分为加载段、准平台或平台段和卸载段。在这些特征段内根据波形的特征建立路径线。计算时在加载和卸载段采用了等粒子速度间隔,准平台段采用等时间间隔,对卸载波进行路径线方法分析时,各个速度计取了相同的卸载幅值。计及这些复杂的因素,在进行 Lagrange 分析时,不能机械地使用所记录的3个、4个或者5个计的波形,应该仔细研究每一个波形的特点,适当分区、合理选取组合。

1.3 典型的试验波形

图3为实测的波形。图3(a)为粒子速度测试波形。根据应力波理论,可以很容易地找到四个主要的波阵面: P^+ 、 S^+ 、 P^- 和 S^- 。但图中显示,在 S^+ 和 P^- 之间多出了一个波阵面。经仔细分析,可以确定为一卸载波。为了弄清产生此卸载波的原因,进行了平板正撞击试验,采用锰铜压阻应力计进行测试,其波形见图3b。同样根据应力波理论可以确定二个主要的波阵面: P^+ 和 P^- 。图中同样显示,在 P^+ 和 P^- 之间多出了一个波阵面。根据细观调查,发现此岩盐材料大晶粒内部较均匀,但是晶粒间晶界处存在微空洞和缺陷。因此,可以推测,产生此卸载波的原因,可能是冲击过程在这些缺陷处产生高温,而局部熔化产生卸载。后来的一些研究初步支持了此观点^[11]。

2 冲击绝热过程

根据以上讨论的 Lagrange 分析方法,对每一个岩盐试件记录的多个 Lagrange 位置的冲击波形进行分析,得到对应该位置的过程线即为其当地的本构关系,而对应每个位置的终态的压力和应变值则为 Hugoniot

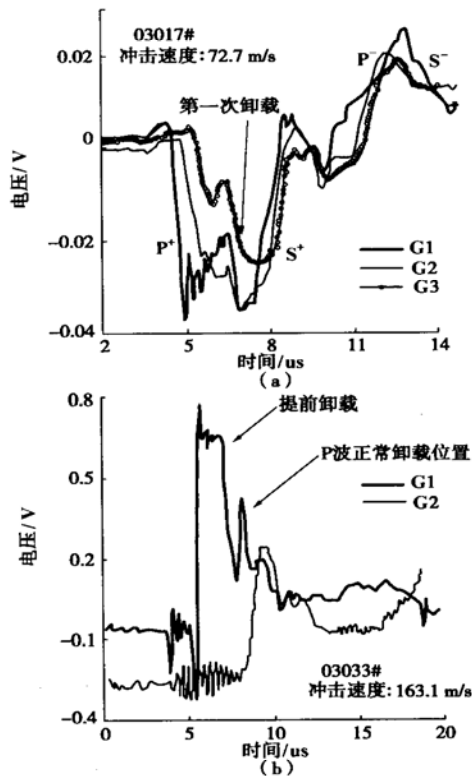


图3 典型的试验波形

Fig. 3 Typical experimental wave profiles

冲击绝热线(状态方程)上的点。一般来说,采用 Lagrange 分析时,有几个记录波形就可以得到相应位置材料的力学响应。

2.1 应力应变本构关系

图4和图5为分别应用粒子速度和锰铜计测试波形进行分析后得到的同一样品不同位置的压缩方向应力应变关系。由于材料内部的耗散、黏性,以及惯性等机制的作用,不同位置的应力应变关系一般存在差异。图4(a)是一个例外。图5(a)在进行 Lagrange 分析时,未考虑第一次卸载的影响,得到一个与前面分析较一致的本构关系。图5(b)在进行路径线分析时,尝试性地对第一次物理卸载阶段也进行了分析,得到了一个较复杂的卸载阶段,在此复杂的卸载本构关系中似乎包含了由于卸载过程温度降低材料再结晶,而变形恢复的机制。

这些曲线表明,岩盐在冲击荷载作用下,具有较强的非线性特征和一定的黏性效应。后者主要表现在随着深度的增加,压力幅值一般要发生衰减,波形发生弥散。由于随着冲击速度的增加,相应的应变率增加,图4中的平均应变率分别为:(a) 4.60×10^4 1/s, (b) 3.26×10^4 1/s, (c) 2.63×10^4 1/s,因此,图4还表明,此岩盐具有较强的应变率效应。

图6为分析得到的压剪过程中剪切方向典型的应

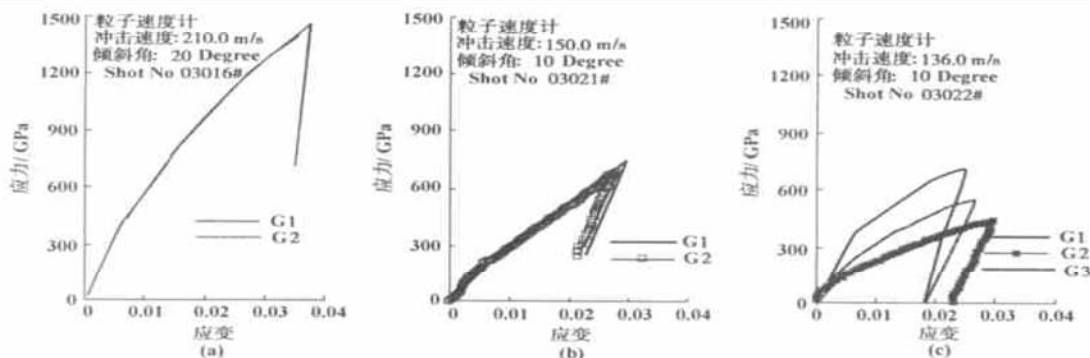


图 4 由粒子速度计测试波形分析得到的岩盐应力应变关系(压缩)

Fig. 4 The constitutive relationship of rock salt obtained by electromagnetic particle velocity gauge(For compression)

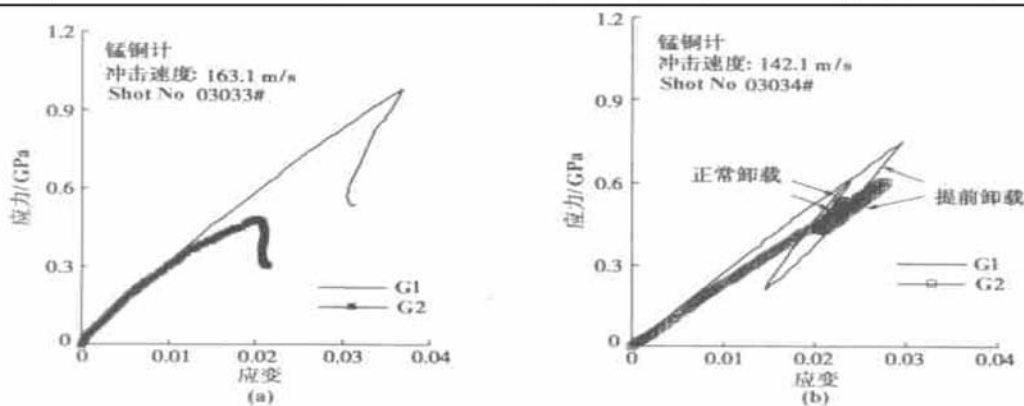


图 5 由锰铜应力计测试波形分析得到的岩盐应力应变关系

Fig. 5 The constitutive relationship of rock salt obtained by Mangnion

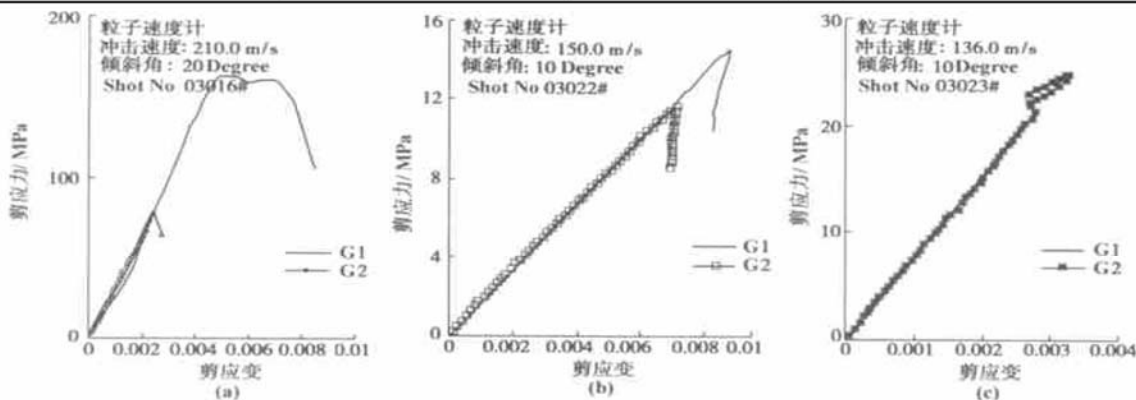


图 6 由粒子速度计测试波形分析得到的岩盐应力应变关系(剪切方向)

Fig. 6 The constitutive relationship of rock salt obtained by electromagnetic particle velocity gauge(For shear)

力应变关系。由于此时材料内部承受压力和剪力的共同作用,应力状态比较复杂,因此,实际测试得到的剪应力响应是一种耦合作用的结果,对其进行单独的讨论似乎意义不大。

2.2 状态方程

2.2.1 $P-V$ Hugoniot 冲击绝热线

岩盐的 $P-V$ Hugoniot 冲击绝热线见图 7。

其数据包括冲击速度 135 m/s 的正撞击试验、冲

击速度 70~210 m/s 倾斜角为 10° 和 20° 的斜撞击试验和冲击速度 140~200 m/s 的锰铜计正撞击试验。由此得到的冲击绝热线有 2 个明显的临界点: A、B。其中 A 为材料的 HEL 点,即 Hugoniot 弹性限; B 对应着本次试验材料的再压缩点。AB 间有 2%~3% 的体积压缩,表明此材料内部含有 3% 左右的孔洞。

由于在冲击压力超过 1.4 GPa 以后试验点较少,因此,压力从 1.4 GPa 到 2.4 GPa 过程,材料的状态我

们实际上是不知道的。由波形分析可知,此阶段恰好包含第二道卸载剪切波消失的临界点。前面提到的SWT方法可以借助剪切卸载波的消失与否来确定材料内部的损伤程度,这在纤维增强水泥砂浆的试验中得到了很好的应用^[10,12],但在本次试验中,由于第一道卸载剪切波的存在以及试验数据点太少的限制,无法得到很好应用。同时,这也要求将SWT方法的应用领域进行拓广。压力2.4 GPa时,数据点较大偏离拟合曲线,表明此阶段可能存在进一步的孔洞崩塌,此时对应的体积压缩量约为3%。此次试验我们可以确定岩盐在冲击压力低于1.5 GPa时的状态方程为:

$$P = 52.813(1 - \frac{V}{V_0}) - 2243.5(1 - \frac{V}{V_0})^2 + 45686(1 - \frac{V}{V_0})^3 \quad (4)$$

式中 P 为压力(GPa); V_0 为初始比容。

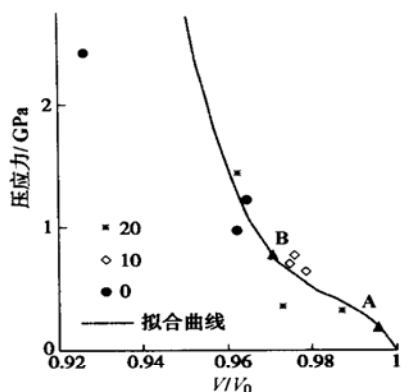


图7 岩盐 $P - V/V_0$ 冲击绝热线

Fig. 7 $P - V/V_0$ Hugoniot curve of rock salt

2.2.2 $D - u$ Hugoniot 冲击绝热线

根据应力波理论^[1,2],材料的 $D - u$ 冲击绝热线一般呈线性关系。因此,采用直线对数据点进行拟合,此直线在 D 轴上的截距即为体波声速。拟合结果见图8和图9。

图8为压缩方向的结果,其数据点基本可以拟合成一条直线,得到的体波声速为4.179 km/s。图9为剪切方向的分析结果,由于数据点较少,比较离散。

2.2.3 $D - u$ 冲击绝热线与 $P - V$ 冲击绝热线对比分析

通过以上的讨论,我们可以得到两类 Hugoniot 冲击绝热线,事实上这两类冲击绝热线是有联系的^[1,2]。研究结果表明,大多数材料的 $D - u$ 冲击绝热线在相当宽的压力范围内呈简单线性关系,并可以表示为^[1]:

$$D_p - u_0 = C_0 + S(u_p - u_0) \quad (5)$$

式中 D_p , u_0 , u_p 分别为冲击波速、初始速度和粒子速度; C_0 和 S 为材料常数; C_0 表示初压声速; S 为斜

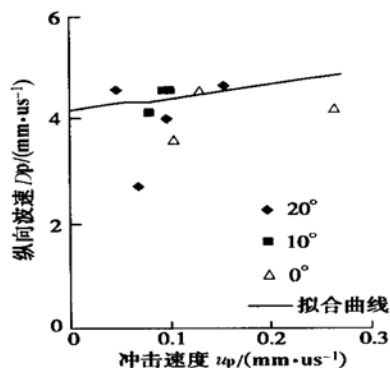


图8 Hugoniot 线之 $D_p - u_p$ 关系(P波)

Fig. 8 $D_p - u_p$ Hugoniot curve of P wave for rock salt

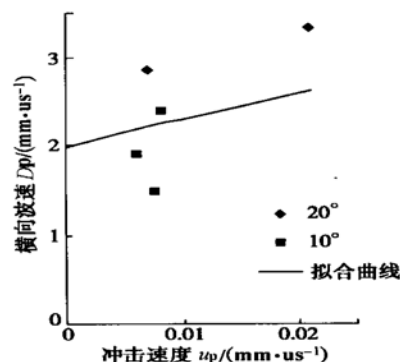


图9 Hugoniot 线之 $D_s - u_s$ 关系(S波)

Fig. 9 $D_s - u_s$ Hugoniot curve of S wave for rock salt

率。

由此可以得到相应的 $P - V$ 表达式为^[1]:

$$P - P_0 = \frac{C_0^2 (V_0 - V)}{[V_0 - S(V_0 - V)]^2} \quad (6)$$

根据图8,可以得到相应的 $P - V$ Hugoniot 线,并和图7进行对比,拟合结果表明,两种分析方法基本是统一的。同样进行剪切方向的分析,拟合结果与倾斜角20°时的结果较一致,但与10°时的结果有一定差异。

3 结论与讨论

本文采用 Lagrange 分析方法对岩盐在压剪联合加载,以及压缩冲击加载过程的应力应变关系和状态方程进行了详细的探讨。对于本构关系只给出了具体的曲线,但没有给出表达式。实际上,基于此可以进行进一步的理论研究。

研究结果表明,岩盐冲击压缩过程本构关系表现出一定的非线性特性。而当不同冲击压力应力应变关系进行对比时,由于不同压力对应的加载速率有差别,此本构关系还表现出率相关的性质。由于试验的冲击压力较低,我们得到材料压力低于1.5 GPa时的压缩状态方程。

另外, 由于材料的特殊性, 以及第一道卸载波的影响, 目前尚无法深入探讨岩盐动态剪切特性。

致谢: 感谢中国科学技术大学力学和机械工程系唐志平教授和胡晓军老师给予的帮助与指导。

参考文献:

- [1] 唐志平. 冲击相变原理[M]. 合肥: 中国科学技术大学研究生教材.
- [2] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [3] 唐志平. Lagrange 分析方法及其新进展[J]. 力学进展, 1993, 23(3): 348.
- [4] Fowles R, Williams R F. Plane stress wave propagation in solids [J]. J Appl Phys, 1970, 41: 360.
- [5] Tang Z P, Gupta Y M. Shock-induced phase transformation in Cadmium Sulfide dispersed in an elastomer [J]. J Appl Phys, 1988, 64(4): 1827.
- [6] Cowperthwaite M, Williams R F. Determination of constitutive relationships with multiple gauges in non-divergent waves[J]. J Appl Phys, 1971, 42: 456.
- [7] Grady D E. Experimental analysis of spherical wave propagation [J]. J Geophys Res, 1973, 78: 1299.
- [8] Seaman L. Lagrangian analysis for multiple stress or velocity gages in attenuating waves[J]. J App Phys, 1974, 45(10): 4303.
- [9] 唐志平, 胡晓军, 廖香丽, 等. 双磁场 IMPS 粒子速度测试系统[J]. 试验力学, 2000, 15(1): 16.
- [10] 徐松林. s 波跟踪技术与水泥基复合材料的压剪联合冲击特性研究[R]. 中国科学技术大学博士后研究报告, 2003.
- [11] 吴文. 岩盐的静、动力学特性试验研究与理论分析[D]. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2003.
- [12] 唐志平, 刘文彦. 水泥基复合材料的压剪联合冲击试验研究[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2001, 32(专辑): 23.

全国建筑物纠倾移位 增层加载 基础托换及古建保护学术研讨会通知

由同济大学土木工程学院、浙江大学建筑工程学院、浙江省建筑业行业协会地下工程分会、中国建筑学会工程勘察分会等四单位联合发起, 中国土木工程学会支持的全国建筑物纠倾移位、增层加载、基础托换及古建保护学术研讨会定于 2004 年 12 月在浙江省杭州市召开。

近一二十年来, 建(构)筑物的倾斜扶正、移位搬迁、增层加载、基础托换及古建筑物保护技术在我国各地渐渐兴起, 大量的工程实践证明, 此类技术不仅具有重大的技术经济效益, 而且具有十分重要的历史文化意义。

本次会议将是我国南北各地专家学者专以地基基础领域中此类特殊技术为主要议题进行总结交流的首次盛会, 期望能展示迄今为止此类特殊技术的发展水平和具有特色的一批成果。

本次会议将特别邀请多位著名专家作主题报告, 同时, 竭诚欢迎全国各地(含港澳台地区)勘察、设计、科研、施工及政府主管部门等有关单位从事相关工作的科技人员、考古与文物研究人员、高校师生等来稿并参加会议。来稿一经选用将与主题报告汇编成集, 由著名出版社正式出版。要求作者在 2004 年 6 月 20 日前, 先将论文摘要寄至会议秘书处, 会议秘书处对初审合格的摘要将通知作者按照统一格式提交论文全文。作者也可从“浙江地工”网 www.zjuca.com 下载“论文格式”, 而在 9 月 10 日前直接投寄论文全文。

会议秘书处地址: 310012 浙江省杭州市学院路 85 号, 浙江科技学院土木工程系, 联系人: 夏建中、吴礼泉; 电话: 0571-85124601, 85021310; 传真: 0571-85124601, 85021310; 手机: 13336087719 (夏), 13858184111(吴); E-mail: xjz90815@163.com。

(浙江科技学院土木工程系 供稿)