论文

磁驱动压-剪联合加载下材料动态强度的直接测量

罗斌强, 陈学秒, 王桂吉*, 谭福利, 赵剑衡, 孙承伟

中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900

*联系人, E-mail: wangguiji@126.com

收稿日期: 2016-03-31; 接受日期: 2016-07-05; 网络出版日期: 2016-08-12

国家自然科学基金项目(编号: 11272295, 11502252)、国家自然科学基金委重大科研仪器设备专项(编号: 11327803)和中国工程物理研究院流体物理研究所发展基金(编号: SFZ201401(04)03)资助项目

摘要 动高压下材料的屈服强度测量一直是冲击动力学界长期追求的目标. 本文介绍了一种直接测量材料高压强度的新实验方法, 即磁驱动压-剪联合加载实验技术. 分析了压-剪联合作用下材料的应力偏量与屈服强度关系, 数值计算了斜波加载下压-剪联合作用时应力偏量与屈服强度的时空演化, 给出了强度数值的计算方法. 基于CQ-4装置, 开展了磁驱动斜波加载压-剪联合实验设计并对铝的高压强度进行了测量, 获得了可靠的实验数据. 实验结果表明, 磁驱动压-剪联合加载技术作为一种全新的加载手段, 在材料的动高压强度测量方面展示了广阔的应用前景.

关键词 磁压剪, 斜波压缩, 屈服强度**PACS:** 62.20.Fg, 62.20.Fq, 62.50.Ef

物体微元的应力张量描述可分解为球量部分和偏量部分, 前者对应材料的可压缩性(状态方程), 后者对应材料的剪切强度(本构方程). 在武器物理研究中, 材料的强度一直是影响高压高应变率加载下材料动力学行为的重要因素之一, 在某些情况下, 甚至可能是影响实验成败的关键, 如惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)实验中与材料高压强度关联的界面不稳定性对靶丸聚心压缩的影响.

自20世纪60年代以来, 国内外学者提出了多种方法来测量高压下材料的剪切强度, 如静水压比较法^[1]、横向应力计测量^[2,3]、双屈服面方法^[4,5]、不稳定性方法^[6,7], 以及压剪炮技术^[8,9]等. 受限于不同实验技术的

加载状态、加载应变率, 以及其计算材料强度的基本原理和基础假定的差异, 不同的动高压实验给出的材料高压强度数值往往分散性较大^[10,11]. 发展新的实验技术, 弱化强度计算过程中对实验材料和加载状态的物理约束, 获取不同状态下材料的强度数值, 将有助于深入分析压力、温度、应变率、初始变形等因素对材料强度的影响.

以往测量材料高压强度的加载手段多为冲击加载, 2008年Asay等人^[12,13]将冲击实验中的双屈服面方法应用到等熵压缩实验中, 开辟了研究等熵压缩下材料强度的新途径. 2010年, Alexander等人^[14]提出了磁驱动压剪联合加载测量材料强度的思想, 并进行了验

引用格式: 罗斌强, 陈学秒, 王桂吉, 等. 磁驱动压-剪联合加载下材料动态强度的直接测量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 114601
Luo B Q, Chen X M, Wang G J, et al. Direct measurement of material dynamic strength under high pressure using magnetically driven pressure-shear loading (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 114601, doi: 10.1360/SSPMA2016-00184

证性实验. 该方法物理概念清晰、数据处理简单, 在材料的动高压强度测量方面展示了很大的应用前景. 我们利用流体物理研究所磁驱动加载装置CQ-4^[15,16], 设计了用于磁压剪实验的脉冲强磁场发生器^[17,18], 发展了低速横向测速技术^[19], 在此基础上, 开展了磁驱动压-剪联合加载下纯铝的强度测量实验. 本文详细分析了压剪联合加载下材料强度计算的基本原理, 介绍了磁压剪实验设计和数据处理方法, 并对压剪联合加载下铝的高压强度进行了测量, 获得了可靠的结果.

1 应力分析

材料的受力状态为一维轴向应变和一维剪切应变的联合时, 其应力状态可表示为

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & S_{xy} & 0 \\ S_{yx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中, $\sigma_{yy} = \sigma_{zz}$, $S_{xy} = S_{yx}$. 假定材料满足 Von-Mises 屈服准则, 则材料的屈服强度与应力张量的第二不变量关系可表示为

$$J'_2 - \frac{1}{3}Y^2 = 0, \quad (2)$$

展开上式可得

$$(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 3S_{xy}^2 - Y^2 = 0, \quad (3)$$

将主轴方向应力分解为球量部分和偏量部分, 上式可写为

$$(S_{xx} - S_{yy})^2 + 3S_{xy}^2 - Y^2 = 0. \quad (4)$$

一维应变状态下, 考虑到

$$\begin{aligned} S_{xx} + S_{yy} + S_{zz} &= 0, \\ S_{yy} &= S_{zz}, \end{aligned} \quad (5)$$

则有

$$\frac{9}{4}S_{xx}^2 + 3S_{xy}^2 = Y^2, \quad (6)$$

因此, 在一维轴向应变和一维切向应变联合加载的情况下, 材料的屈服强度可表示为两个偏应力的函数. 对斜波压缩下的压-剪联合加载实验而言, 剪切应力 S_{xy} 的加入将调整屈服面上的应力状态. 当剪切应力 S_{xy} 增

大到 $Y/\sqrt{3}$ 时, S_{xx} 将减小到零, 此时, 轴向应力处于静水压状态. 通过测量此状态下材料的剪切应力 S_{xy} , 即可获得 σ_{xx} 压力下材料的屈服强度

$$Y = \sqrt{3}S_{xy}. \quad (7)$$

2 数值计算

基于CQ-4装置的加载条件, 采用LS-DYNA软件设计了相应的数值实验以指导物理实验设计. 计算模型如图1所示, 其中载流电极材料为高强度钼板, 样品为纯铝, 窗口材料为高强度 ZrO_2 单晶. 计算模型宽度方向为12 mm, 厚度方向分别为: Mo板1.5 mm, Al样品0.1 mm, ZrO_2 窗口1.5 mm. 材料的状态方程采用 Gruneisen 状态方程, 本构方程分别为SG本构(Mo, Al)和随动硬化模型(ZrO_2), 具体材料参数见表1. 边界加载为沿厚度方向的纵向加载和沿宽度方向的横向加载. 图2给出了横向和纵向加载的应力剖面, 横向应力波形正比于CQ-4装置的放电电流波形, 纵向应力波形正比于放电电流幅值的平方. 纵向应力峰值15.3 GPa, 横向应力峰值875 MPa.

图3给出了样品前后界面以及样品内部的纵向应力和切向应力的变化情况. 由纵向应力剖面可见, 铝样品整体处于均匀受压的状态. 由切向应力剖面可知, 加载过程中铝样品内部的切应力基本均匀. 尽管钼板加载边界的切应力幅值很大, 但由于铝承受剪切应力的能力(屈服强度)远低于钼, 因此铝样品中的最大横向切应力只有102 MPa. 图4给出了样品位置的切向应力分量和 Von-Mises 屈服应力的关系以及各切应力分量对(6)式的满足情况. 在加载过程的后续阶段, 随着驱动切应力 S_{xy} 的增大, 轴向应力分量 S_{xx} 逐渐减小, 但两者的组合与屈服应力一直满足(6)式. 当驱动切应力 S_{xy} 的大小达到屈服面时, 轴向应力分量 S_{xx} 减小至零.

图1 (网络版彩图)压剪联合加载计算模型

Figure 1 (Color online) Calculation model of pressure-shear loading.

表 1 数值计算使用的材料参数

Table 1 Parameters of materials used in calculation

参数	Mo	Al	ZrO ₂
ρ_0 (g/cm ³)	10.2	2.7	5.85
C_0 (km/s)	5.14	5.35	—
λ	1.255	1.34	—
γ	1.59	1.97	—
G_0 (GPa)	125	27.1	—
Y_0 (GPa)	1.6	0.04	8.0
β	20	400	—
n	0.15	0.27	—
dG/dP	1.42	1.767	—
dG/dT (GPa/K)	-1.90×10^{-2}	-1.66×10^{-2}	—
E (GPa)	—	—	221
ν	—	—	0.32
E_t	—	—	10

 图 2 (网络版彩图)压剪联合加载数值实验的加载边界
 Figure 2 (Color online) Loading histories at the boundary of pressure-shear calculation model.

 图 3 (网络版彩图)样品中的纵向应力和切向应力. (a) 纵向应力曲线; (b) 切向应力曲线
 Figure 3 (Color online) Longitudinal and transverse stress in sample. (a) Profiles of longitudinal stress; (b) profiles of transverse stress.

图5给出了ZrO₂窗口自由面的横向和纵向速度, 由于纵向应力波速和切向应力波速的差异, 切向速度的峰值落后于纵向速度峰值. 由于ZrO₂窗口在加载过程中处于弹性状态, 根据ZrO₂自由面纵向速度最大值(598 m/s)计算纵向应力

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho_0 C_0 u_l = 12.6 \text{ GPa}. \quad (8)$$

根据横向速度最大值(8.8 m/s)计算切向应力

$$\tau = \frac{1}{2} \rho_0 C_0 u_s = 98 \text{ MPa}, \quad (9)$$

其值和图3(a)中的纵向应力峰值以及图3(b)中的切应力峰值吻合. 屈服强度

$$Y = \sqrt{3} \tau = 170 \text{ MPa}, \quad (10)$$

与图4(a)中V-M应力的最大值吻合.

由计算结果可见, 当最大轴向应力到达样品位置时, 最大切向应力并未到达样品位置. 注意到纵向应力达到其最大值时在较宽的时间窗口内近似保持恒值, 因此只要切向应力峰值在该时间窗口内到达样品即可. 对强度测量实验, 样品设计为厚度较小的薄片以满足其厚度方向加载状态的空间均匀性. 选取强度较高的金属材料作为载流电极和高强度非金属材料作为窗口, 而待测材料的强度相对要小. 切应力传到样品位置时, 其透射波幅值被样品承受剪切的能力(屈服强度)限制, 衰减后的切向应力继而传进窗口材料. 通过测量窗口材料表面的横向速度, 即可获得窗口材料承受的最大切应力, 进而可计算样品材料的最大切

图4 (网络版彩图)压剪联合加载过程中铝样品的切应力与等效屈服应力关系. (a) 偏应力与屈服应力随时间变化曲线; (b) 偏应力与屈服应力对(6)式的满足情况

Figure 4 (Color online) Relation of deviatoric stress and yield stress in sample under pressure-shear loadings. (a) History of deviatoric stress and yield stress; (b) relation of deviatoric stress and yield stress constrained by eq. (6).

图5 (网络版彩图)ZrO₂窗口自由面纵向和横向速度
Figure 5 (Color online) Longitudinal and transverse velocities at ZrO₂ window rear surface.

应力和屈服强度. 通过测量窗口材料表面的法向速度, 可获得传进样品材料的最大压力.

3 铝的磁压剪实验

磁驱动斜波压缩下铝的压-剪联合实验在CQ-4装置^[15,16]上开展. 磁驱动压缩负载区的结构示意图如图6所示. 脉冲大电流 J 流过条形金属板构成的回路时, 在载流电极板之间的空腔中生成脉冲强磁场 B . 在负载区域再施加垂直于电极板表面的外部稳恒强磁场 B_0 . 载流导体将在相互垂直的磁场中承受轴向和切向的电磁力. 轴向应力和切向应力同时从载流面位置向电极内部传播, 两者具有相近的应力剖面(图7).

外部稳恒磁场发生器由储能电容器组、半导体开

图6 (网络版彩图)磁驱动斜波压-剪联合加载示意图
Figure 6 (Color online) Sketch of magnetically driven ramp wave pressure-shear loadings.

图7 (网络版彩图)磁压剪实验的应力波剖面示意图
Figure 7 (Color online) Schematic stress profiles of magnetically driven ramp wave pressure-shear loadings.

关和线圈组成^[17](图8). 储能电容器组由4台0.5 mF/

15 kV电容器并联构成, 通过一个15 kV/30 kA的半导体硅堆开关向线圈对放电. 单个线圈由50匝铜导线绕成, 线圈截面为2 cm' 2 cm, 线圈外半径4.6 cm, 内半径3 cm. 线圈组电感462 nH, 电阻105 mΩ, 线圈中心区域磁场不均匀性<1%. 图9为充电8 kV时线圈组的放电电流和线圈中心位置磁场随时间变化曲线, 放电电流峰值13.3 kA, 磁场峰值8.8 T. 在磁场峰值50 μs时间窗口内, 磁场变化偏差<0.2%, 在CQ-4装置放电周期($T_{1/4} \approx 500$ ns)内可看作稳恒磁场.

图10为靶区安装结构剖面图, 样品区正负电极之间用聚酰亚胺薄膜绝缘, 两个线圈分别置于正负电极

图8 (网络版彩图)稳恒磁场发生器实物图
Figure 8 (Color online) Photo of static magnetic field generator.

图9 (网络版彩图)稳恒磁场发生器放电电流与磁场曲线
Figure 9 (Color online) Current and magnetic field curves of static magnetic field generator.

图10 (网络版彩图)靶区安装结构剖面图
Figure 10 (Color online) Cross section of assembled loading region.

的顶部. 样品区结构与图6所示相同, 正电极样品区依次为电极板(Mo)-样品(Al)-窗口(ZrO₂单晶), 负电极样品区依次为电极板(Mo)-窗口(ZrO₂单晶), 待测样品和线圈中心空腔同轴. 钼板、铝样品和ZrO₂窗口厚度分别为1.5, 0.12和1.5 mm, 其中铝样品纯度99%, 采用冷轧碾压制成薄片. Mo和ZrO₂窗口表面研磨为0.1 μm粗糙度以增加其黏接面的黏接强度, ZrO₂窗口自由面镀膜成漫反射面以提高倾斜探头的回光强度. 图11(a)为测速探针的安装照片, 两侧测速探针与竖直方向夹角 $\theta=15^\circ$, 测速探针置于线圈的中心空腔. 图11(b)为实验前安装好的负载电极区域照片. 记两侧探针测量的速度分别为 u_+ 和 u_- , 则其与横向速度 u_s 和纵向速度 u_l 关系为

$$\begin{aligned} u_+ &= u_l \cos \theta + u_s \sin \theta, \\ u_- &= u_l \cos \theta - u_s \sin \theta, \end{aligned} \quad (11)$$

由此可计算ZrO₂窗口的横向和纵向速度, 进而计算样品的加载压力和屈服强度.

图12给出了通过光子多普勒速度测量技术(Photonic Doppler Velocimetry, PDV)测速获得的ZrO₂窗口自由面 $\pm 15^\circ$ 倾角方向的速度曲线, 根据(11)式, 计算出纵向和横向速度如图13所示. CQ-4装置放电过程中, 正负电极载流板(Mo)经历了相同的加载历史, 但受应力波传播路径的影响, 正负电极上方的ZrO₂窗口速度历史不尽相同. LS-DYNA计算结果表明, 图13(a)中纵向速度剖面的差异源于低阻抗铝对应力波在钼-

图 11 (网络版彩图)加载区域安装照片. (a) 靶区测速探针结构; (b) 靶区线圈安装结构

Figure 11 (Color online) Loading region photos. (a) PDV probe construction; (b) photo of assembled loading region.

ZrO₂界面的反射和透射, 图13(b)中横向速度剖面的差异则源于低强度铝对剪切波的衰减. 图13(b)中横向速度剖面的差异同时表明, 黏接胶层的强度高于铝样品, 不会对铝样品强度测量造成影响. 由于加载过程中ZrO₂单晶处于弹性状态^[20,21], 可根据ZrO₂窗口的纵

图 12 (网络版彩图)PDV测量的ZrO₂单晶自由面15°倾角方向速度曲线

Figure 12 (Color online) Velocity curves at ZrO₂ window free surface measured by PDV at $\pm 15^\circ$ slope angles.

向、横向速度以及ZrO₂弹性声速($C_l=7.37$ km/s, $C_s=3.78$ km/s, $\rho_0=5.85$ g/cm³)计算铝样品承受的最大纵向应力和切向应力. 由图13中Mo/Al/ZrO₂构型的窗口纵向速度和横向速度峰值计算给出铝样品承受最大加载压力9.9 GPa, 最大切应力312 MPa, 进而计算屈服强度为556 MPa. 图14给出了CQ-4装置充电50和65 kV时, 采用磁压剪实验测量的冷压成薄片的纯铝强度数据, 以及Asay等人采用等熵压缩实验(Isentropic Compression Experiments, ICE)的双屈服面方法测量的硬铝和纯铝强度数据比较. 实验结果表明, 初始塑性变形对纯铝高压强度有明显的影

图 13 (网络版彩图)带样品/无样品时ZrO₂界面纵向和横向速度曲线. (a) ZrO₂窗口表面纵向速度曲线; (b) ZrO₂窗口表面横向速度曲线

Figure 13 (Color online) Longitudinal and transverse velocity at ZrO₂ window rear surface. (a) Longitudinal velocity at ZrO₂ window rear surface; (b) transverse velocity at ZrO₂ window rear surface.

图 14 (网络版彩图)高压下铝的强度数据比较

Figure 14 (Color online) Comparison of aluminum strength under high pressure.

4 结论

分析了一维轴向应变和一维剪切应变联合加载下材料微元应力偏量与屈服强度的函数关系, 基于理论分析, 设计了相应的数值实验. 数值计算结果很好地验证了理论预测, 并对物理实验设计给出了指导. 在此基础上, 设计了磁驱动压剪联合加载实验, 并进行了铝材料的动高压强度测量, 获得了可靠的实验结果. 实验结果表明, 磁驱动压剪联合加载作为一种新的实验技术, 在高压高应变率下材料的强度测量方面具有广阔的应用前景.

致谢 感谢陈光华研究员、刘俊和雷江波工程师在横向测速方面的指导和帮助, 吴刚、胥超、税荣杰、马晓等人参与了实验装置的运行, 邓顺益参与了激光测速工作, 作者在此一并表示感谢!

参考文献

- Fowles G R. Shock wave compression of hardened and annealed 2024 aluminum. *J Appl Phys*, 1961, 32: 1475–1487
- Rosenberg Z, Yaziv D, Yeshurun Y, et al. Shear strength of shock-loaded alumina as determined with longitudinal and transverse manganin gauges. *J Appl Phys*, 1987, 62: 1120–1122
- Whiteman G, Millett J C F. Shear stress measurements in stainless steel 2169 under 1D shock loading. *Exp Mech*, 2012, 52: 265–273
- Asay J R, Lipkin J. A self-consistent technique for estimating the dynamic yield strength of a shock-loaded material. *J Appl Phys*, 1978, 49: 4242–4247
- Asay J R, Chhabildas L C, Dandekar D P. Shear strength of shock-loaded polycrystalline tungsten. *J Appl Phys*, 1980, 51: 4774–4783
- Barnes J F, Blewett P J, McQueen R G, et al. Taylor instability in solids. *J Appl Phys*, 1974, 45: 727–732
- Park H S, Lorenz K T, Cavallo R M, et al. Viscous rayleigh-taylor instability experiments at high pressure and strain rate. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 135504
- Abou-Sayed A S, Clifton R J, Hermann L. The oblique-plate impact experiment. *Exp Mech*, 1976, 16: 127–132
- Tang Z P. Progress and application of combined compression and shear wave loading technique (in Chinese). *Adv Mech*, 2007, 37: 398–408 [唐志平. 压剪复合平板冲击加载技术进展及其应用. *力学进展*, 2007, 37: 398–408]
- Yu Y Y, Tan H, Dai C D, et al. Comparison of methods for high-pressure dynamic yield strength measurement (in Chinese). *Chin J High Pressure Phys*, 2013, 27: 821–827 [俞宇颖, 谭华, 戴诚达, 等. 高压屈服强度测量方法比较研究. *高压物理学报*, 2013, 27: 821–827]
- Vogler T J, Chhabildas L C. Strength behavior of materials at high pressures. *Int J Impact Eng*, 2006, 33: 812–825
- Asay J R, Ao T, Davis J P, et al. Effect of initial properties on the flow strength of aluminum during quasi-isentropic compression. *J Appl Phys*, 2008, 103: 083514
- Vogler T J, Ao T, Asay J R. High-pressure strength of aluminum under quasi-isentropic loading. *Int J Plasticity*, 2009, 25: 671–694
- Alexander C S, Asay J R, Haill T A. Magnetically applied pressure-shear: A new method for direct measurement of strength at high pressure. *J Appl Phys*, 2010, 108: 126101
- Wang G, Luo B, Zhang X, et al. A 4 MA, 500 ns pulsed power generator CQ-4 for characterization of material behaviors under ramp wave loading. *Rev Sci Instrum*, 2013, 84: 015117
- Wang G J, Zhao J H, Sun C W, et al. On the loading capability and main application of magnetically driven quasi-isentropic compression device CQ-4 (in Chinese). *Chin J Exp Mech*, 2015, 30: 252–263 [王桂吉, 赵剑衡, 孙承伟, 等. 磁驱动准等熵加载装置CQ-4的加载能力及主要应用. *实验力学*, 2015, 30: 252–263]
- Chen X M, Wang G J, Zhang L W, et al. 10 T quasi-static magnetic field generator for magnetically applied pressure-shear experiment (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2013, 25: 2152–2156 [陈学秒, 王桂吉, 章林文, 等. 用于磁压剪技术的10 T准静态磁场发生器. *强激光与粒*

- 子束, 2013, 25: 2152–2156]
- 18 Chen X M, Wan L M, Wang G J, et al. Thermal and stress analysis of Helmholtz coil for 10 T pulsed magnetic field generation (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2014, 26: 053201 [陈学秒, 万连茂, 王桂吉, 等. 10 T脉冲磁场的亥姆霍兹线圈热和力分析. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 053201]
- 19 Chen G, Wang D, Liu J, et al. A novel photonic Doppler velocimetry for transverse velocity measurement. *Rev Sci Instrum*, 2013, 84: 013101
- 20 Mashimo T, Nakamura A, Kodama M, et al. Yielding and phase transition under shock compression of yttria-doped cubic zirconia single crystal and polycrystal. *J Appl Phys*, 1995, 77: 5060–5068
- 21 Dolan D H, Ao T. Cubic zirconia as a dynamic compression window. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 021908

Direct measurement of material dynamic strength under high pressure using magnetically driven pressure-shear loading

LUO BinQiang, CHEN XueMiao, WANG GuiJi*, TAN FuLi,
ZHAO JianHeng & SUN ChengWei

Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

Material strength measurement under high pressure is a long goal of impact dynamics. In this work, we report a new method for directly measuring material dynamic strength under high pressure, viz. magnetically driven pressure-shear loading technique. The relations of deviatoric stresses and yield stress under pressure-shear loading were analyzed, and simple functions of deviatoric stresses and yield stress were obtained under complex stress state. Using LS-DYNA code, evolutions of deviatoric stresses and Von-Mises stress in sample under ramp wave pressure-shear loading were simulated, and calculation method of material strength is given. Based on numerical simulations results, magnetically driven ramp wave pressure-shear experiments were conducted on pulsed power generator CQ-4, with established quasi-static magnetic field generator and transverse velocity measurement techniques, to explore dynamic strength of aluminum at high pressure. Reliable experimental results are obtained. The results show that, as a potential new technique, magnetically driven pressure-shear combination loading has great application prospect in material dynamic strength measurement under high pressure.

magnetically driven pressure-shear loading, ramp wave compression, yield strength

PACS: 62.20.Fg, 62.20.Fq, 62.50.Ef

doi: 10.1360/SSPMA2016-00184