DOI: 10.11883/bzycj-2017-0019

文章编号: 1001-1455(2018)02-0258-08

材料动态强度直接测量的磁压剪实验技术及应用*

王桂吉,罗斌强,陈学秒,赵剑衡,陈光华,谭福利,孙承纬,吴 刚

(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 提出一种用于直接测量动载荷下材料强度的新方法,即磁驱动压剪联合加载实验技术。从理论和数值计算上分析了压/剪联合作用下材料的应力偏量与屈服强度关系,计算斜波加载下压/剪联合作用时应力偏量与屈服强度的时空演化特性,给出材料强度数值的计算方法。并基于自行研制的强脉冲电流装置和 10 T准静态磁场发生器,利用多点双光源外差位移干涉仪(dual laser heterodyne velocimetry, DLHV),开展磁压剪实验对 2 种铝样品的动态强度进行测量,得到不同加载压力下铝样品的强度。结果表明:磁驱动压/剪联合加载技术为材料的高压强度直接测量提供了一种新途径,是可靠的实验技术。

关键词: 材料强度;磁压剪;斜波压缩;准静态磁场

中图分类号: O347.3 **国标学科代码:** 1303520 **文献标志码:** A

强度是材料承受偏应力(剪应力)的能力,是强压缩下(高压力、高应变率加载)材料最重要的响应行为之一,材料在高度压缩后仍具有显著的弹塑性响应,材料的强度一般随材料所受的静水压力和加载应变率的增加而升高,随材料温度的增加而下降,与状态方程一起用来表征材料动力学特性,是重要的物理量,也是冲击动力学研究的基本数据。开展相关的实验、计算和理论研究具有十分重要的科学意义和应用前景。学者们建立了多种用于测量材料剪切强度的方法,有间接测量和直接测量 2 个大类。前者的主要代表是利用平板撞击(加载卸载或加载再加载)技术,结合物理模型或经验模型预估冲击状态下材料的屈服强度,纵、横向应力,平均应力等完全应力状态,例如 Fowles[1] 提出的弹塑性分析法、Asay 等[2] 发展的自相似技术、Rayleigh-Taylor(RT)不稳定性即扰动增长法[3-5]。上述方法可用于估算高压下材料强度,但准确性受到模型间接性的影响。直接测量材料强度的压/剪联合加载技术主要有 4 类,即斜撞击法(inclined impact method)[6]、反射剪切波技术(reflected shear wave technique)[7]、斜板撞击法(oblique plate impact method)[8-12] 和各向异性晶体撞击技术[13-15]。这 4 种直接测量强度方法的一个共同特点就是纵波和横波相互耦合在一起,不利于加载压力的提高。上述方法在样品中产生的加载状态、应变率等不尽相同,同时用于计算材料强度的物理模型的假定条件也有差异,得到的高压下材料的强度数据表现出较大的分散性[16-17],因此需要进一步发展新的材料强度测量技术,新的技术能够将相互耦合在一起的因素分解开,可深入分析不同因素例如压力、温度或加载应变率等对材料强度的影响。

近些年发展起来的准等熵(斜波)加载/卸载实验技术为材料强度的测量开辟了新途径。准等熵加载在样品中产生的温升较低,有利于将温度的影响解耦出来。Asay 等[18]、Voglert 等[19] 基于准等熵加载/卸载技术,结合冲击实验中的用于强度测量数据处理的双屈服面方法,开展材料的强度测量。Alexander 等[20] 在 Z 机器上发展了一种新的测量材料动态强度的新方法,即磁压剪实验技术,该方法可直接测量材料的强度,不依赖于物理模型。本文中基于强脉冲电流磁驱动加载装置 CQ-4[21-22] 和 10 T 准静

* **收稿日期:** 2017-01-13; **修回日期:** 2017-02-24。 "第十一届全国爆炸力学学术会议"推荐论文。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272295,11502252,11327803);
四川省青年科技创新团队研究项目(2016TD0022);
中国工程物理研究院流体物理研究所发展基金项目(SFZ201401(04)03)

第一作者: 王桂吉(1977—),男,博士,研究员,guiji_wang@caep.cn。

态磁场发生器[23-24]，以及可同时测量样品纵向和横向粒子速度的光子多普勒测速计[25]，开展用于材料强度直接测量的磁压剪实验研究，利用建立起来的磁压剪实验技术对 2 种不同制备工艺的纯铝材料进行准等熵加载下的剪切强度测量，并通过数值计算分析准等熵加载下压/剪联合作用时应力偏量与屈服强度的时空演化特性，并给出计算材料强度的方法，得到铝样品强度的实验结果。

1　压剪作用下材料的应力偏量和屈服强度关系

根据 Von-Mises 或 Tresca 屈服准则判据，强度是应力偏量张量的某种不变量，主要与剪切应力有关，材料强度的测量实验技术建立在材料屈服判据或者更一般性的动态本构关系的基础上[26-29]。

一维轴向应变和剪切应变条件下，材料的受力状态可描述为：

$$\boldsymbol{\sigma}=\begin{pmatrix}\sigma_{xx} & 0 & 0\\ 0 & \sigma_{yy} & 0\\ 0 & 0 & \sigma_{zz}\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0 & S_{xy} & 0\\ S_{yx} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{pmatrix} \tag{1}$$

式中：$\sigma_{yy}=\sigma_{zz}$，$S_{xy}=S_{yx}$。假定材料满足 Von-Mises 屈服准则，则其屈服强度与应力张量的第二不变量的关系可表示为：

$$J_2-\frac{1}{3}Y^2=0 \tag{2}$$

展开上式可得：

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

将主轴方向应力分解为球量和偏量两部分，式(3)可写为：

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

一维应变状态下，考虑到：

$$\begin{cases}S_{xx}+S_{yy}+S_{zz}=0\\ S_{yy}=S_{zz}\end{cases} \tag{5}$$

可以得到：

$$\frac{9}{4}S_{xx}^2+3S_{xy}^2=Y^2 \tag{6}$$

从式(6)可以看到，一维轴向应变和剪切应变条件下，材料的屈服强度可表示为 2 个偏应力的函数。磁压剪状态下，剪切应力 S_{xy} 为外部驱动力，S_{xx} 为从动变量，当 S_{xy} 达到其最大值时，从动变量 S_{xy} 将减小至零，此时，轴向应力 σ_{xx} 状态下材料的屈服强度与切向应力的关系为：

$$Y=\sqrt{3}S_{xy} \tag{7}$$

2　磁压剪作用下实验设计的数值分析

2.1　磁压剪作用原理和实验设计计算模型

基于强脉冲电流装置的磁压剪实验的原理，如图 1 所示。装置产生的脉冲大电流 $\boldsymbol{J}$ 与自感应磁场 $\boldsymbol{B}$ 相互作用产生纵向斜波加载压力 $\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B}$，沿驱动电极板厚度方向传播至样品和窗口；与此同时该电流与外加的纵向准静态磁场 $\boldsymbol{B}_0$ 相互作用产生横向加载力 $\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B}_0$，作用于驱动电极、样品和窗口，使样品受到剪切力的作用。图 2 所示为磁驱动实验装置 CQ-4 产生的典型压剪加载压力时程曲线，作为数值计算的初始条件。

由于计算使用流体动力学程序 LS-DYNA 进行，目前该软件还不具备计算磁流体动力学的能力，因此在计算中作了简化，即不考虑磁流体动力学完整过程，直接将装置产生的纵向和横向压力作为初始加载条件，图 3 所示为相关计算模型，模型中载流电极材料为高纯钼，样品材料为纯铝，窗口为 ZrO_2 单晶。计算模型宽度为 12 mm，钼电极板厚度为 1.5 mm，样品铝厚度为 0.1 mm，ZrO_2 窗口厚度为 1.5 mm。纵向应力峰值为 14 GPa，切向应力峰值为860 MPa，计算物理模型参数可参见文献[27]。

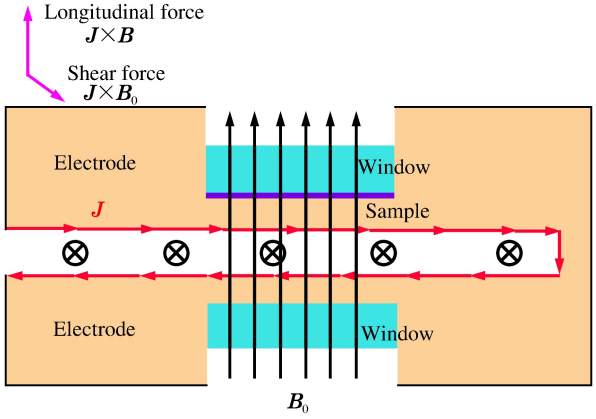


图 1 磁压剪实验示意图

Fig. 1 Schematic of magnetically applied pressure shear loading

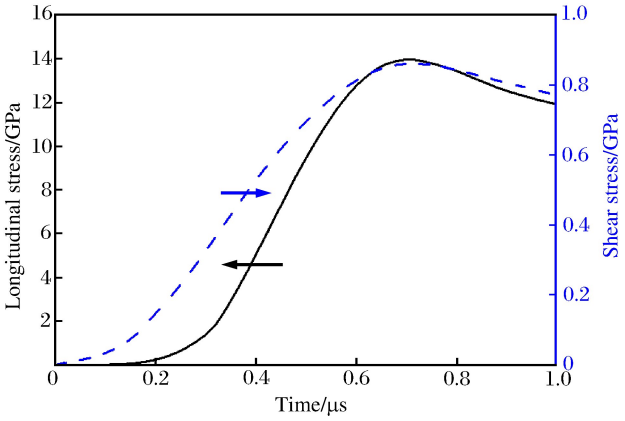


图 2 压剪加载压力时程曲线

Fig. 2 Typical loading pressure histories of longitudinal and shear stresses

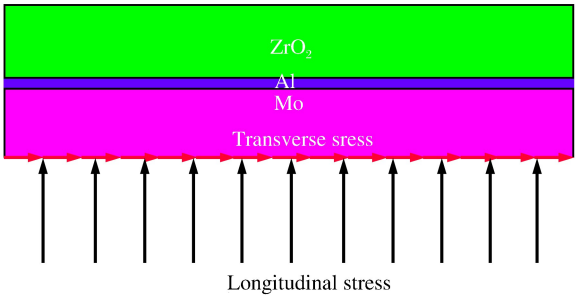


图 3 磁压剪联合加载计算模型

Fig. 3 Calculated model of magnetically applied pressure shear loading

2.2 计算结果分析[26-27]

图 4 所示为样品前、后界面以及样品内部的纵向应力和切向应力的变化情况。结果表明，铝样品整体处于均匀受压状态，但受样品屈服强度的限制，铝样品中切应力的入射波和透射波幅值有明显差异。图 5 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式(6)的满足情况。可以看出，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式(6)。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。

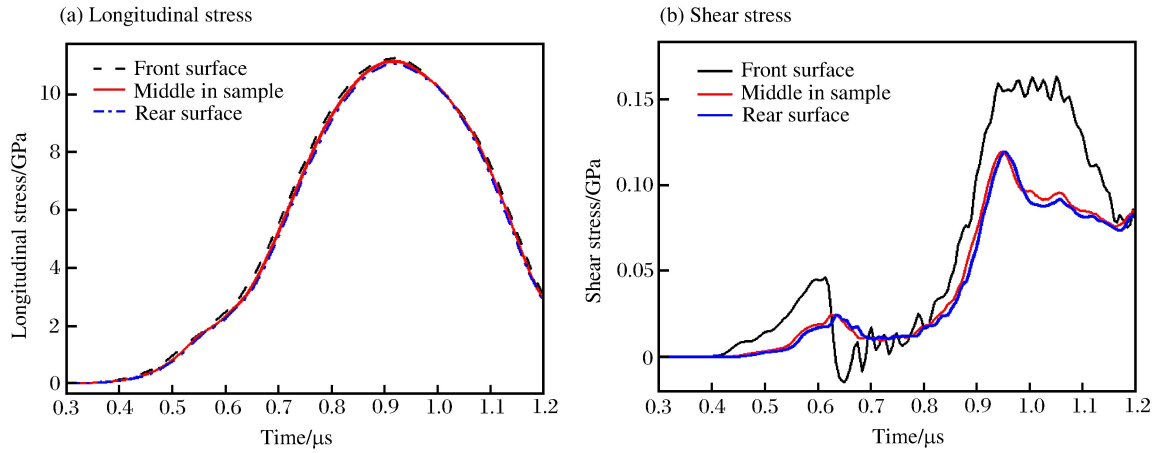


图 4 样品中的纵向应力和切向应力

Fig. 4 Longitudinal stress and shear stresses in the sample

ZrO_2 窗口自由面的横向和纵向速度如图 6 所示，可以看出，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 ZrO_2 自由面纵向速度最大值(566 m/s)计算纵向应力：

$$\sigma=\frac{1}{2}\rho_0 C_0^{(1)} u^{(1)}=11.2\ \text{GPa}$$

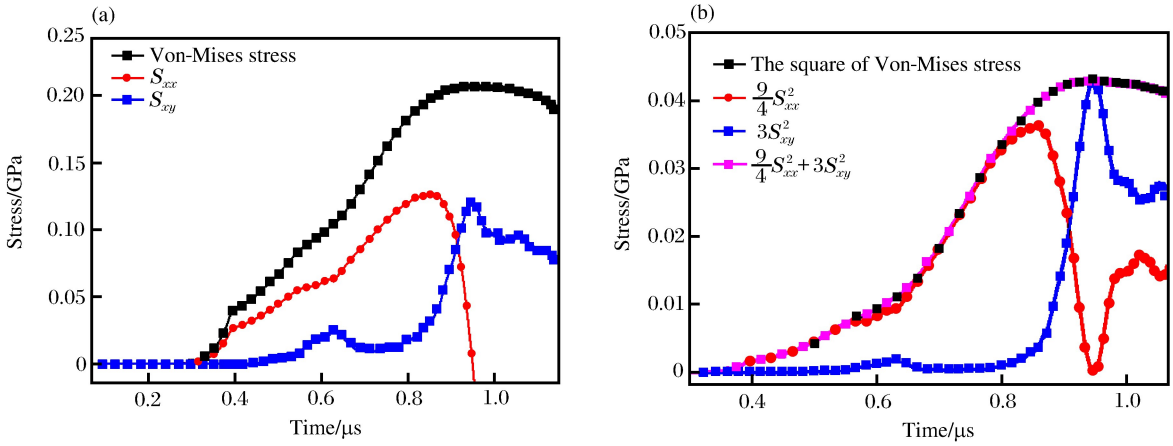


图 5　铝样品压剪状态下切应力分量与等效屈服应力关系

Fig. 5　Relation of deviatoric stress and yield stress in aluminum sample under pressure-shear loadings

根据横向速度最大值(9.8 m/s)计算切向应力和屈服强度：

$$\tau=\frac{1}{2}\rho_0 C_0^{(s)} u^{(s)}=122\ \text{MPa},\qquad Y=\sqrt{3}\tau=211\ \text{MPa}$$

与图 5 中 Von-Mises 应力的最大值吻合。

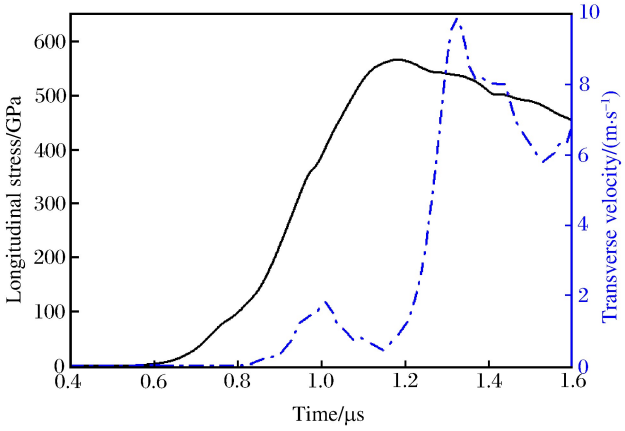


图 6　ZrO_2 窗口自由面纵向和横向速度

Fig. 6　Longitudinal and transverse velocities at rear surface of ZrO_2 window

3　铝的磁压剪实验和强度测量

3.1　实验方法和条件

磁压剪实验基于磁驱动实验装置 CQ-4[21-22]，如图 7 所示；实验所需的准静态磁场由自行研制的 10 T 静态磁场发生器产生[23-24]，如图 8 所示。准静态磁场发生器由储能电容器组、半导体开关和线圈对组成。实验中，在线圈的中心区域，准静态磁场分布均匀，不均匀性差异小于 1%。如图 9 所示，实验条件下，磁场随时间变化曲线的峰值落在 50 μs 的时间窗口内，磁场分布的不均匀性差异小于 0.2%，在CQ-4装置放电的时间周期内(实验所关心的时间内)可看作恒定静态磁场。

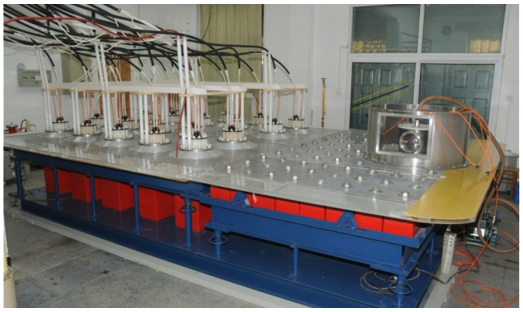


图 7　磁驱动实验装置 CQ-4

Fig. 7　Magnetically driven experimental apparatus CQ-4

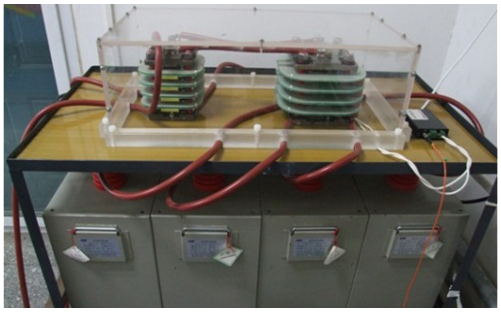


图 8　10 T 准静态磁场发生器

Fig. 8　10 T quasi-static magnetic field generator

图 10 给出了实验负载区的结构三维效果图。线圈对安装固定于上、下传输板上，其中心区域与正、负驱动电极板、样品中心一致，确保样品置于线圈对产生的静态磁场中心均匀区。图 10 中待测样品和线圈中心同轴，正电极负载区依次为钼电极板、铝样品和 ZrO_2 单晶窗口，厚度分别为 1.50、0.12 和

1.50 mm;负电极负载区包括为钼电极板和 ZrO_2 单晶窗口。其中铝样品采用冷轧碾压方式制成薄片,纯度为 99%。为提高窗口表面的粘接强度,ZrO_2 窗口表面粗糙度加工成 0.1 μm。

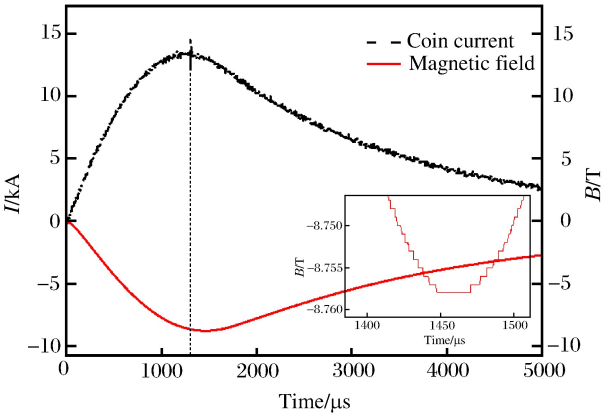


图 9 充电电压 8kV 时线圈对中的放电电流和线圈中心位置磁场随时间变化曲线

Fig. 9 Discharging current in the coil pair and magnetic field in the centre of coil at charging voltage of 8 kV

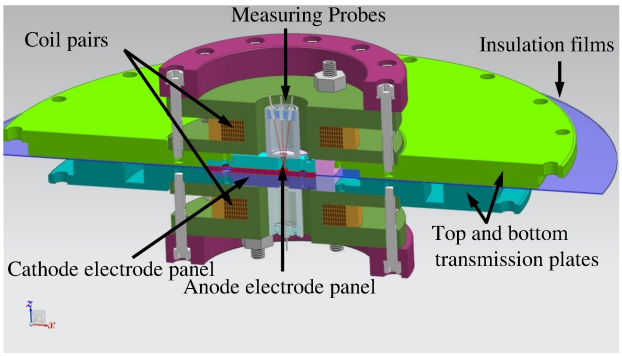


图 10 实验负载区结构三维效果图

Fig. 10 Three-dimensional drawing of experimental loading regime

3.2 纵、横向粒子速度测量

实验采用多点双光源外差激光位移干涉仪(DLHV)测量 ZrO_2 窗口的自由面速度[25],为增大测试探头的回光强度,提高信号的信噪比,将 ZrO_2 窗口自由面镀铝膜成漫反射面。测速探头安装情况如图 8所示,位于线圈的中心,探头之间夹角为 15°。将两侧探头测量的速度分别描述为 u^+ 和 u^-,则其与横向速度 $u^{(t)}$ 和纵向速度 $u^{(l)}$ 关系为:

$$\begin{cases} u^+ = u^{(l)}\cos\theta + u^{(s)}\sin\theta \\ u^- = u^{(l)}\cos\theta - u^{(s)}\sin\theta \end{cases} \tag{8}$$

由此可计算 ZrO_2 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。

4 实验结果分析与讨论

图 11 给出了利用 DLHV 技术获得的一个典型的实验结果[26],为 ZrO_2 窗口自由面±15°倾角方向的速度时程曲线,为更清楚表示,图 11 中将带样品构型的速度曲线的纵坐标下移了 200 m/s。根据式(8)计算得到纵向和横向速度,见图 12。相同加载条件下,有样品与无样品时纵向速度的差异源于加载应力波在样品位置的反射,横向速度幅值的差异则表明粘接面强度高于铝样品的强度,不会对样品强度的测量造成影响。因此,同时设置有样品与无样品的工况,也是为了更好证明实验的可靠性。由于加载过程中 ZrO_2 单晶处于弹性状态[28-29],可根据 ZrO_2 窗口的纵向、横向速度以及 ZrO_2 弹性声速($c^{(l)}$ = 7.37 km/s, $c^{(s)}$ = 3.78 km/s, ρ_0 = 6.07 g/cm^3),计算铝样品承受的最大纵向应力和切向应力。计算得到铝样品承受的最大加载压力为 9.9 GPa,最大切应力为 312 MPa,进而计算出屈服强度为 556 MPa。

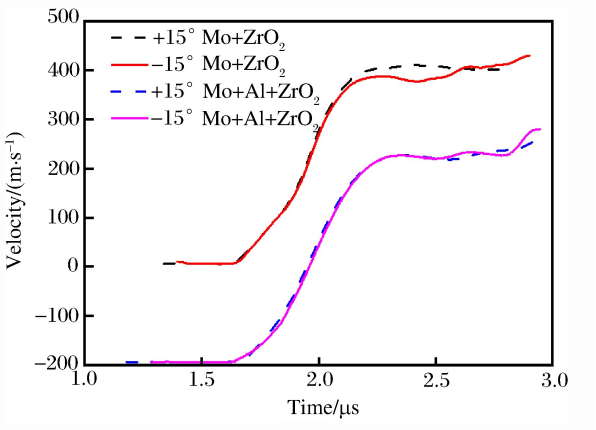


图 11 PDV 测量的 ZrO_2 单晶自由面±15°倾角方向速度时程曲线

Fig. 11 History of velocity at ZrO_2 window free surface measured by PDV at ±15° slope angle

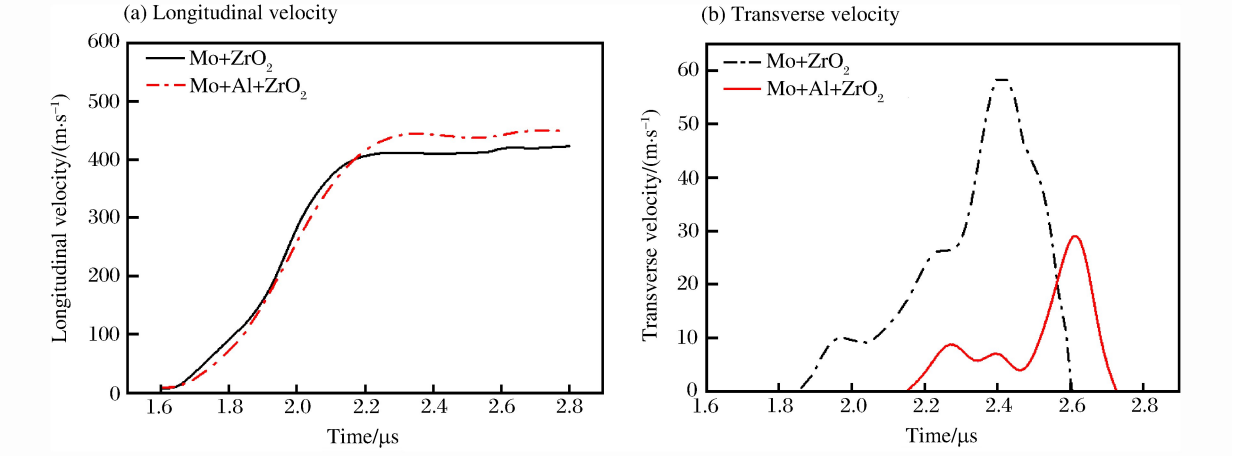


图 12　ZrO_2 界面纵向和横向速度曲线

Fig. 12　History of longitudinal and transverse velocities at ZrO_2 window rear surface

图 13 给出了本文中的实验结果和文献[17-19]中铝的强度数据的对比，实验结果表明不同的初始状态对铝的强度影响较大。由于样品初始塑性变形和微结构的差异，冷轧纯铝的强度明显高于抛光纯铝的强度。当压力低于 10 GPa 时，抛光纯铝的实验结果与采用双屈服面法测量得到的结果一致，这也验证了本实验技术的正确性和可靠性。同时也可以看出，随着加载压力的增大，2 种铝样品的强度随着压力的增大而增大，这也与国外文献冲击中和斜波加载下获得的强度结果表现出的规律一致[17-19]。

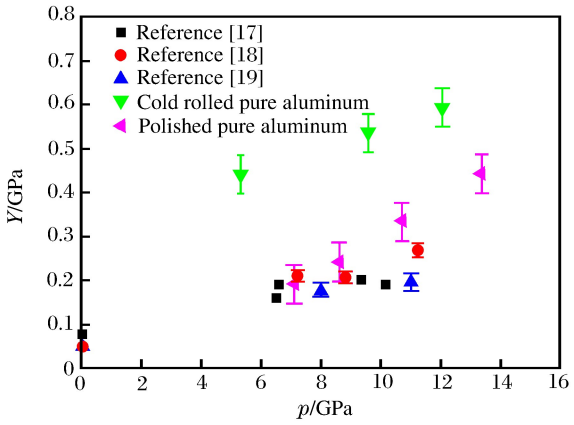


图 13　斜波加载下铝的屈服强度

Fig. 13　Yield strength of aluminum under ramp wave loadings

5　结　论

基于强脉冲电流和准静态磁场发生装置，发展了一种直接测量材料动态强度的新型实验技术，即磁压剪实验技术。理论和数值计算分析得到一维轴向应变和剪切应变条件下材料的微元应力偏量与屈服强度的函数关系，验证了该技术的可行性。理论分析和数值计算结果一致。设计了相应磁驱动压剪联合加载实验，测量得到 2 种不同工艺制备的纯铝在不同加载压力下的剪切强度，并与文献结果进行比较。结果表明，本文中建立的磁压剪实验技术用于直接测量材料的剪切强度，所得到的数据可靠，该技术可广泛用于强度低于钼电极和 ZrO_2 强度的材料的动态强度测量。

感谢流体物理研究所刘俊和雷江波工程师在横向测速方面所做的工作。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，在此一并表示致谢！

参考文献：

[1]　FOWLES G R. Shock wave compression of hardened and annealed 2024 aluminum[J]. Journal of Applied Physics, 1961, 32(8): 1475-1487.

[2]　ASAY J R, LIPKIN J. A self-consistent technique for estimating the dynamic yield strength of a shock-loaded materials[J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(7): 4242-4247.

[3]　IGONIN V V, IGNATOVA O N, LEBEDEV A I, et al. Influence of dynamic properties on perturbation growth in tantalum[J]. AIP Conference, 2009, 1195(1): 1085-1088.

[4]　LORENZ K T, EDWARDS M J, GLENDINNING S G, et al. Accessing ultrahigh-pressure, quasi-isentropic states

of matter[J]. IEEE International Conference on Plasma Science, 2005,12(5):104-104.

[5] PARK H S, LORENZ K T, CAVALLO R M, et al. Viscous Rayleigh-Taylor instability experiments at high pressure and strain rate[J]. Physical Review Letters, 2010,104(13):135504.

[6] KOLLER L R, FOWLES G R. Simultaneous generation and measurement of longitudinal and shear waves in shock compressed media[M]. NewYork: Plenum Press, 1979:927.

[7] YOUNG C, DUBUGNON O. A reflected shear wave technique for determining dynamic rock strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1977,14(15):247-259.

[8] ABOU-SAYED A S, CLIFTON R J, HERMANN L. The oblique-plate impact experiment[J]. Experimental Mechanics, 1976,16(4):127-132.

[9] 唐志平.压剪复合平板冲击加载技术进展及其应用[J].力学进展,2007,37(3):398-408.
TANG Zhiping. Advance and application of pressure shear compound plate shock loading technique[J]. Advances in Mechanics, 2007,37(3):398-408.

[10] 徐松林,唐志平,谢卿,等.压剪联合冲击下 K9 玻璃中的失效波[J].爆炸与冲击,2005,25(5):385-392.
XU Songlin, TANG Zhiping, XIE Qing, et al. Failure wave of K9 glass under pressure shear shock loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(5):385-392.

[11] 唐志平,胡晓军,廖香丽.压剪炮和压剪复合加载技术[J].中南工业大学学报,2001,32(增刊):9-12.
TANG Zhiping, HU Xiaojun, LIAO Lixiang. Pressure shear compound loading technique and pressure shear gun [J]. Journal of Central South University of Technology, 2001,32(Suppl):9-12.

[12] 马维,段祝平.压剪复合应力波作用下材料动态断裂韧性研究[J].固体力学学报,2002,23(1):12-23.
MA Wei, DUAN Zhuping. Dynamic fracture toughness of materials under pressure shear complex stress waves [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2002,23(1):12-23.

[13] JOHNSON J N. Shock propagation produced by planar impact in linearly elastic anisotropic media[J]. Journal of Applied Physics, 1971,42(13):5522-5530. DOI:10.1063/1.1659974.

[14] CHHABILDAS L C, SWEGLE J W. Dynamic pressure-shear loading of materials using anisotropic crystals[J]. Journal of Applied Physics, 1980,51(9):4799-4807. DOI:10.1063/1.328312.

[15] CHHABILDAS L C, SWEGLE J W. On the dynamical response of particulate-loaded materials Ⅰ: Pressure-shear loading of aluminum particles in an epoxy[J]. Journal of Applied Physics, 1982,53(2):954-956. DOI:10.1063/1.330574.

[16] 俞宇颖,谭华,戴诚达,等.高压屈服强度测量方法比较研究[J].高压物理学报,2013,27(6):821-827.
YU Yuying, TAN Hua, DAI Chengda, et al. Comparison of measurement methods of material strength at high pressure[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013,27(6):821-827.

[17] VOGLER T J, CHHABILDAS L C. Strength behavior of materials at high pressures[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,33(1):812-825. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2006.09.069.

[18] 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]. Journal of Applied Physics, 2008,103(8):083514-722.

[19] VOGLERT J, AO T, ASAY J R. High-pressure strength of aluminum under quasi-isentropic loading[J]. International Journal of Plasticity, 2009,25(4):671-694.

[20] 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]. Journal of Applied Physics, 2010,108(12):812.

[21] WANG Guiji, LUO Binqiang, ZHANG Xuping, et al. A 4 MA, 500 ns pulsed power generator CQ-4 for characterization of material behaviors under ramp wave loading[J]. Review of Scientific Instruments, 2013,84(1):015117.

[22] 王桂吉,赵剑衡,孙承纬,等.磁驱动准等熵加载装置 CQ-4 的加载能力及主要应用[J].实验力学, 2015,30(2):252-263.
WANG Guiji, ZHAO Jianheng, SUN Chengwei, et al. On the loading capability and main applications of magnetically driven quasi-isentropic compression device CQ-4[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015,30(2):252-263.

[23] 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[J]. 强激光与粒子束，2013，25(8)：2152-2156.
CHEN Xuemiao, WANG Guiji, ZHANG Linwen, et al. 10 T quasi-static magnetic field generator for magnetically applied pressure shear experiments[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(8):2152-2156.

[24] 陈学秒，万连茂，王桂吉，等. 10T 脉冲磁场的亥姆霍兹线圈热和力分析[J]. 强激光与粒子束，2014，26(5)：053201.
CHEN Xuemiao, WAN Lianmao, WANG Guiji, et al. Thermal and stress analysis of Helmholtz coil for 10T pulsed magnetic field generation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(5):053201.

[25] CHEN G H, WANG D T, LIU J, et al. A novel photonic Doppler velocimetry for transverse velocity measurement[J]. Review of Scientific Instruments, 2013,84(1):013101.

[26] 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[J]. 中国科学：物理学力学天文学，2016，46(11)：114601-8.
LUO Binqiang, CHEN Xuemiao, WANG Guiji, et al. Direct measurement of material dynamic strength under high pressure using magnetically driven pressure-shear loading[J]. Scientia Sinica Physica: Mechanica & Astronomica, 2016,46(11):114601-8.

[27] LUO B Q, CHEN X M, WANG G J, et al. Dynamic strength measurement of aluminum under magnetically driven ramp wave pressure-shear loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017,100(2):56-61.

[28] 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]. Journal of Applied Physics, 1995,77(10):5060-5068.

[29] DOLAN D H, AO T. Cubic zirconia as a dynamic compression window[J]. Journal of Applied Physics, 2008,93(2):021908.

Magnetically applied pressure shear for directly measuring dynamic strength of materials

WANG Guiji, LUO Binqiang, CHEN Xuemiao, ZHAO Jianheng, CHEN Guanghua, TAN Fuli, SUN Chengwei, WU Gang

(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: This paper presents a novel method for directly measuring material strength under dynamic loading, namely the technique of magnetically applied pressure shear (MAPS). The relationship between the stress deviation and the yield strength under MAPS was analyzed theoretically and numerically. The time-space evolutions of the stress deviation and yield strength under MAPS were characterized and calculated. Experiments were conducted based on the CQ-4 and 10 T quasi-static magnetic field generator, both developed by ourselves, using a dual laser heterodyne velocimetry (DLHV), to study the technology of MAPS under ramp wave loadings. The compression strengths of cold rolled pure aluminum and polished pure aluminum under ramp loading were measured and the reliable experimental data were obtained. The results show that the technique of MAPS provides a novel and reliable technique for directly measuring high-pressure strength and can be reliably applied

Keywords: material strength; magnetically applied pressure shear; ramp wave compression; quasi-static magnetic field

（责任编辑　王易难）