

磁驱动准等熵加载下 Z 切石英晶体的折射率

张旭平 罗斌强 种涛 王桂吉 谭福利 赵剑衡 孙承纬 刘仓理

Refractive index of Z-cut quartz under magnetically driven quasi-isentropic compression

Zhang Xu-Ping Luo Bin-Qiang Chong Tao Wang Gui-Ji Tan Fu-Li Zhao Jian-Heng Sun Cheng-Wei  
Liu Cang-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 046201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.046201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.046201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I4>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高密度氦相变的分子动力学研究

Molecular dynamics study on the phase transition of high density helium

物理学报.2015, 64(1): 016202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.016202>

基于聚龙一号装置的超高速飞片发射实验研究进展

Recent advances in hyper-velocity flyer launch experiments on PTS

物理学报.2014, 63(19): 196201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.196201>

冲击作用下的摩擦力效应实验研究

Experimental study of friction effect under impact loading

物理学报.2013, 62(11): 116203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.116203>

$\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  陶瓷晶界势垒的交流特性

AC properties of  $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  ceramics

物理学报.2013, 62(2): 026201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.026201>

二硼化钛的高温高压制备及其物性

Characterization of  $\text{TiB}_2$  synthesized at high pressure and high temperature

物理学报.2013, 62(2): 026202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.026202>

## 磁驱动准等熵加载下 Z 切石英晶体的折射率\*

张旭平<sup>1)</sup> 罗斌强<sup>1)</sup> 种涛<sup>1)</sup> 王桂吉<sup>1)</sup> 谭福利<sup>1)</sup> 赵剑衡<sup>1)†</sup>  
孙承纬<sup>1)</sup> 刘仓理<sup>2)</sup>

1)(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

2)(中国工程物理研究院, 绵阳 621900)

(2015年9月28日收到; 2015年12月5日收到修改稿)

基于 CQ4 脉冲功率实验装置开展了 Z-切石英晶体在磁驱动准等熵加载下的窗口折射率修正关系研究. 实验中采用激光波长 1550 nm 的双源光外差测速仪测量获得了 LiF 窗口和 Z-切石英晶体窗口与不同厚度极板界面的粒子速度. 利用反积分方法由实验测得的 LiF 窗口与极板界面粒子速度计算得到了极板的加载磁压力历史; 以获得的磁压力为输入条件, 采用 LS-DYNA 计算软件正向计算得到石英晶体窗口与极板界面的真实粒子速度历史. 由实验获得的 Z-切石英晶体窗口/极板界面表观粒子速度和计算得到的真实粒子速度, 获得了 Z-切石英晶体弹性极限内的连续的折射率修正关系, 将其折射率修正关系的适用压力范围拓宽至 14.55 GPa. 表观粒子速度与真实粒子速度关系采用线性拟合时, 折射率修正关系为  $n = 1.087 (\pm 0.008) + 0.4408\rho/\rho_0$ , 与冲击数据拟合的结果一致. 由折射率实验数据对 Z-切石英晶体的极化率分析认为, 在其弹性极限压力范围内加载路径和温度对折射率的影响可以忽略.

关键词: 磁驱动准等熵加载, 折射率, 弹性极限, Z-切石英晶体

PACS: 62.50.-p, 62.50.Ef, 64.30.Jk

DOI: 10.7498/aps.65.046201

## 1 引言

测量窗口与样品界面粒子速度是材料高压物性研究中获得材料动态响应的一种基本实验方法<sup>[1,2]</sup>. 冲击加载下窗口材料的折射率已有较多报道<sup>[3-9]</sup>. 准等熵/斜波加载技术提供了一条与冲击加载互补的新的加载路径, 其加载压力波形是随时间缓慢上升的非稳定斜波, 在材料动力学响应、固体高压物态方程研究中有重要的应用价值和前景<sup>[10-12]</sup>. 在该类实验技术的推动下, 斜波加载下透明窗口材料的折射率变化成为一个重要的研究问题. 另一方面, 冲击加载是瞬间施加的, 相当部分成为热量耗散, 材料熵增、温升明显. 斜波加载则是“较平缓”施加的, 其能量中转化为耗散热量的比例较低, 温升和熵增随之较低<sup>[10-12]</sup>. 因此, 斜波加

载下窗口折射率实验数据的获得对研究材料折射率与温度、加载路径的关系非常有帮助<sup>[13]</sup>.

从 1967 年开始, Setchell 等<sup>[2]</sup>, Wackerle<sup>[14]</sup>, Jones 和 Gupta<sup>[5]</sup> 均对非稳定斜波加载下折射率修正做过讨论, 但没有形成一个简单和普适的描述. 2001 年, 美国 Sandia 国家实验室 Hayes<sup>[15]</sup> 从测速激光在窗口中光学厚度的计算出发, 推导了不依赖实验加载波形的真实界面速度和表观速度之间的关系, 为任意的时间不稳定波加载下折射率修正关系计算提供了依据. 在此基础上, 近年来国外已陆续报道了蓝宝石<sup>[16]</sup>、有机玻璃<sup>[17]</sup>、LiF<sup>[13]</sup>、MgO<sup>[18]</sup> 等材料在斜波加载下折射率的实验结果. Z-切石英晶体由于其波阻抗与许多地球物理待研究材料的波阻抗相匹配, 并且在弹性极限范围内变现为简单的弹性响应和良好的光学透明性, 是一种很好的动高压加载实验窗口材料<sup>[5,19,20]</sup>. 因此, 为

\* 国家自然科学基金(批准号: 11327803, 11176002, 11272295)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jianh\_zhao@caep.ac.cn

研究斜波加载下 Z-切石英晶体的折射率及其对路径、温度的依赖关系, 本文借助 CQ4 磁驱动装置开展了磁驱动准等熵加载下 Z 切石英晶体的折射率研究.

## 2 实验方法

### 2.1 磁驱动准等熵压缩实验

本文实验在小型脉冲功率装置 CQ-4 上完成 [12,21,22]. 实验原理和布局见图 1, 装置短路放电产生的强电流从两个平行的正负电极板的内表面流过(趋肤效应), 极板上流过的电流与另一极板上电流产生的磁场相互作用, 在极板内表面(加载面)产生大小与电流密度平方成正比的磁压力. 随着放电电流的逐渐增大, 则在电极板内表面形成一个压力平滑上升的压缩波向样品方向传播. 磁驱动一发实验中可实现多个样品同时测量, 采用优化设计后的电极负载构型, 在样品区极板加载面磁压力的不均匀性 < 1% [21,22].

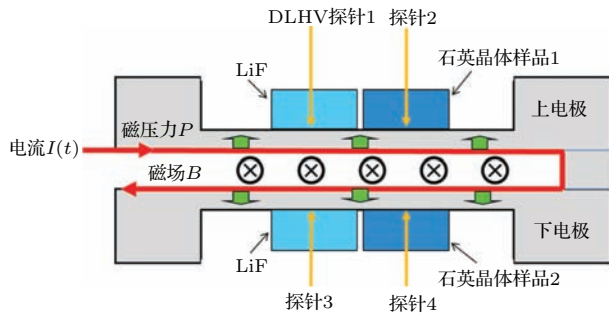


图 1 实验原理和布局示意图

Fig. 1. Experimental principle and configuration.

实验中采用四样品加载, 其中分别在上、下极板对应位置安装一对 LiF 窗口样品用于测量极板加载磁压力. 两个待测 Z-切石英晶体窗口分别紧挨着 LiF 窗口. LiF 和 Z-切石英晶体窗口直径均为 8 mm、厚 3 mm, 采用环氧胶粘接在电极板上. 窗口与极板粘接面均镀 500 nm 厚的铝膜用于反光, 另一面镀波长 1550 nm 增透膜. 电极材料选用阻抗与样品接近、状态参数研究较充分的 1100 铝. 电极板宽 10 mm, 装样品区上电极板厚 0.8 mm, 下电极板厚 1.3 mm. Z-切石英晶体密度为 2.650 g/cm<sup>3</sup>, 晶向角度实测值为 25°17', 与 Z 方向 (25°20') 偏差 3'. 窗口与电极界面的粒子速度采用激光波长 1550 nm 的双源光外差测速仪 (DLHV) 测量.

### 2.2 数据处理方法

Z-切石英晶体样品 1 和样品 2 的表观粒子速度分别由探针 2 和探针 4 直接测量得到. 真实粒子速度借助探针 1 和探针 3 测量的实验数据和数值计算得到. 整体计算过程分以下两步: 第一步, 利用探针 1 和探针 3 测量得到不同厚度铝电极与 LiF 窗口的界面粒子速度, 已知准等熵加载下电极 1100 铝和窗口 LiF 的材料状态参数, 采用反积分计算方法 [23–25] 得到该实验中极板加载面的磁压力; 第二步, 利用 LS-DYNA 流体动力学程序建立模型铝基板和 Z-切石英晶样品模型, 以计算得到的加载面磁压力为输入边界条件, 计算得到电极和石英晶体窗口界面的真实粒子速度.

在反积分和流体动力学计算中 1100 铝、LiF、Z-切石英晶体均采用 Grüneisen 状态方程. 已有研究表明窗口强度效应对反积分计算加载面压力的影响较小, 所以在反积分计算中采用不含本构关系的流体动力学反演计算 [26]. 状态方程参数 [5,19–20,26–28] 见表 1, 其中  $\rho_0$  为初始密度,  $C_0$  和  $\lambda$  分别是常用冲击波关系式  $D = C_0 + \lambda u$  的系数,  $D$  是冲击波速度,  $u$  是粒子速度,  $\gamma_0$  为 Grüneisen 系数.

表 1 材料状态参数表

Table 1. Parameters for materials used in the calculation.

材料名称	密度 $\rho_0/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	常压下声速 $C_0/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	冲击波关系斜率 $\lambda$	Grüneisen 系数 $\gamma_0$
1100 铝 [27]	2.712	5.38	1.34	2.13
LiF [26,27]	2.640	5.148	1.353	1.63
Z-切石英晶体 [5,19,28]	2.650	6.319	1.41	0.66

## 3 实验结果

由探针 1 和探针 3 测量的 LiF 窗口/电极界面表观粒子速度修正后的真实粒子速度(加载段)见图 2, 在所测量的压力范围内 LiF 窗口的折射率修正系数取 1.274( $\pm 0.001$ ) [7–9,17,27]. 利用图 2 中的粒子速度, 采用反积分计算得到的加载面压力曲线(加载段)见图 3. 为验证材料参数选择和计算得到的加载压力曲线的精度, 用 LS-DYNA 以图 3 中压力曲线为边界条件, 计算得到的铝/LiF 窗口界面粒子速度见图 2.

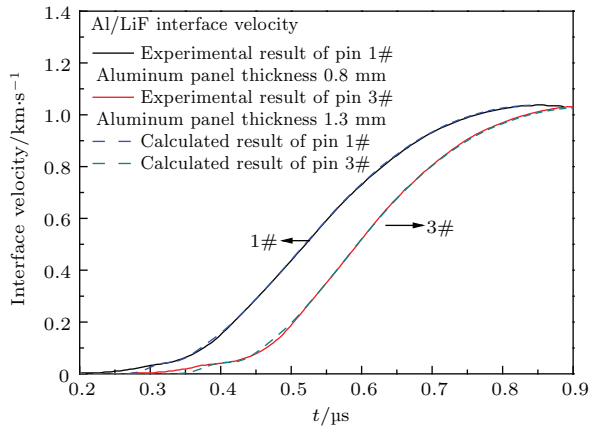


图2 (网刊彩色) 铝/LiF窗口界面粒子速度  
Fig. 2. (color online) Aluminum/LiF interface velocity profiles.

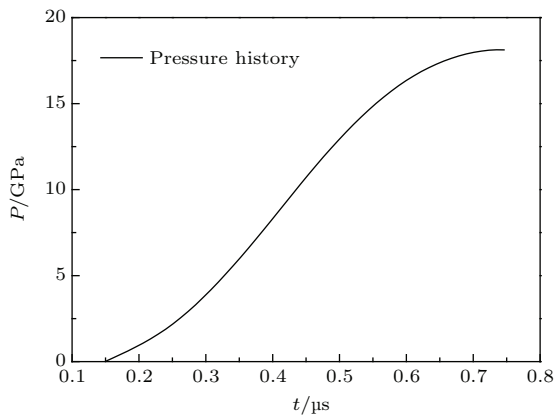


图3 加载面压力历史  
Fig. 3. Pressure history profile.

图2中实验和计算的粒子速度整体符合较好, 粒子速度200 m/s以上范围基本重合, 在200 m/s以下范围计算和实验数据间的偏离也在激光测速系统的测试误差0.5%之内. 认为符合不好有两个原因: 第一, 低速段实验数据的信噪比较差与速度处理方法精度不够, 导致低速段测得的实验数据误差较大; 第二, 反积分计算中没有加入材料强度的影响, 所以计算的压力曲线在铝的弹性极限范围有一定误差. 计算结果显示由于材料强度相比于加载压力较小, 在反积分算加载压力和流体正算加载段粒子速度的过程中影响很小<sup>[23-25]</sup>. 所以, 压力曲线误差主要由实验数据的测试误差决定, 数值计算引入的误差相比可以忽略.

图4为样品1和样品2的表观粒子速度和真实粒子速度. 表观速度由探针2和探针4测量得到. 真实粒子速度利用LS-DYNA以图3中压力曲线为边界条件计算得到. 计算中Z切石英晶体的状态参

数选择为弹性段, 只有小于其弹性极限范围的实验数据是有效的. 实验数据弹性极限的判断有两种方法. 第一, 已知Z切石英晶体样品1和2加载压力条件相同, 由实验测量的探针2和探针4的界面粒子速度采用Lagrange方法<sup>[23,24]</sup>可以得到基板材料铝的声速-粒子速度关系. 由于铝在10—20 GPa压力范围没有相变, 在计算的声速-粒子速度与铝的理论值出现偏离的位置就是Z切石英晶体窗口的弹性极限. 第二, 由表观粒子速度和真实粒子速度差( $\Delta u = u_a - u_t$ )与真实粒子速度 $u_t$ 的关系,  $\Delta u - u_t$ 曲线上拐点的位置即为弹性极限点. 由以上两种方法判断, 实验测量的Z切石英晶体样品1的弹性极限为14.55 GPa, 样品2的弹性极限为14.32 GPa.

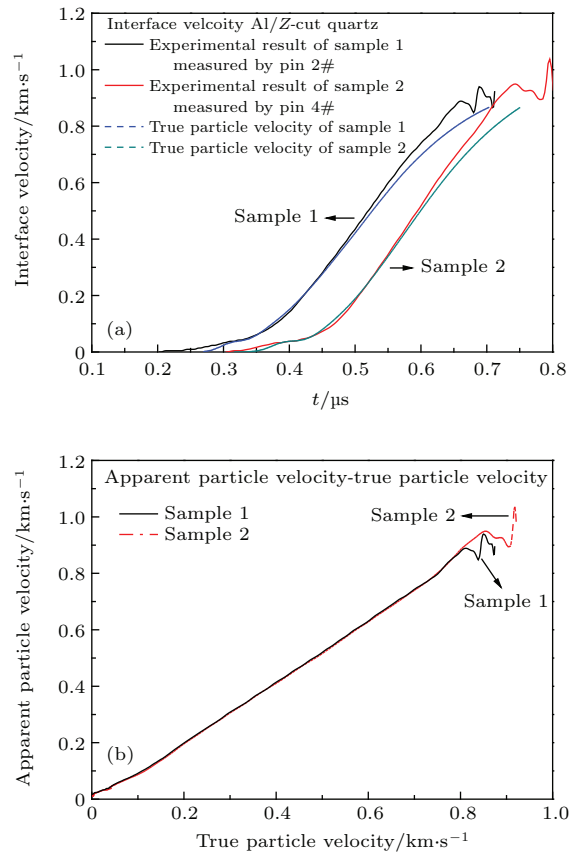


图4 (网刊彩色)(a) 铝/Z切石英晶体界面粒子速度; (b) 表观粒子速度和真实粒子速度  
Fig. 4. (color online) (a) Aluminum/Z-cut quartz interface velocity profiles; (b) apparent and true particle velocity.

#### 4 折射率修正关系计算与讨论

在带窗口测量界面粒子速度的实验中, 如果能忽略在激光进出窗口这段时间内窗口的密度变化,

激光在窗口中的光学厚度可以表示为

$$Z(t) = \int_{\text{窗口厚度}} n(x, t) dx,$$

其中  $Z$  是光学厚度,  $n$  为折射率,  $x$  为空间位置,  $t$  为时间. 则激光干涉测速设备测得的速度即表观粒子速度为  $u_a = -\frac{dZ}{dt}$ , 其中  $u_a$  为表观粒子速度 [13,15,17]. 在以上假定下, Hayes [15] 推导的任意加载波形条件下激光干涉测速窗口的修正关系为

$$\frac{du_a}{du_t} = n - \rho \frac{dn}{d\rho} = f(\rho), \quad (1)$$

其中  $\rho$  为密度,  $u_t$  为真实粒子速度. 当密度和折射率是真实粒子速度的函数时, 积分后即得到折射率密度关系 [13,15] 为

$$n(\rho) = \rho \left[ \frac{n_0}{\rho_0} - \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{f(\rho')}{\rho'^2} d\rho' \right]. \quad (2)$$

当  $f(\rho)$  是常数时,  $f(\rho) = A$ , 则 (2) 式转化为与冲击加载形式相同的折射率密度修正关系

$$n(\rho) = A + (n_0 - A) \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (3)$$

利用图 4 中的实验结果计算  $u_a-u_t$  曲线的斜率  $du_a/du_t$ , 将计算的  $f(\rho)$  结果代入 (2) 式即可得到折射率密度的修正关系. 考虑到低速段实验测量误差和压力误差, 只对粒子速度范围 200 m/s 到弹性极限内的数据拟合.  $u_a-u_t$  曲线采用高阶函数拟合后, 由 (2) 式计算的连续变化的折射率修正见图 5, 本文连续的测量折射率修正至压力 14.55 GPa, 到了  $Z$  切石英晶体的弹性极限. 将图中两个样品的  $u_a-u_t$  数据采用线性拟合结果为  $u_a = -0.021(\pm 0.0004) + 1.087(\pm 0.0008)u_t$ . 计算中初始折射率  $n_0$  取 1.5278,  $u_a-u_t$  在线性拟合下计算的折射率密度关系为

$$n = 1.087(\pm 0.008) + 0.4408\rho/\rho_0. \quad (4)$$

折射率的变化依赖于密度和极化率, 而极化率又是密度和温度的函数, 从而材料折射率与实验加载路径有关. 将本文的准等熵加载实验结果与现有冲击加载实验结果比较, 图 5 显示冲击和准等熵加载下折射率随密度的修正数据基本一致, 则加载路径对折射率的影响可以忽略. 以 Grüneisen 物态方程为参考计算冲击加载与等熵加载温度差 [27] 为

$$T_H - T_S = \frac{1}{\rho_0 \gamma_0 C_V} (P_H - P_S), \quad (5)$$

$$\frac{T_S}{T_0} = \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma_0}, \quad (6)$$

其中  $T_H$  为冲击温度,  $T_S$  为等熵线上的温度,  $\gamma_0$  为 Grüneisen 系数,  $C_V$  为定容比热,  $P_H$  和  $P_S$  分别为冲击线和等熵线上的压力 [29,30]. 在本文实验的压缩比范围内, 冲击与等熵加载的压力差约 0.1%, 等熵加载温升小于 75 K, 冲击与等熵温度差小于 3 K. 由于温度差异非常小, 不能从实验数据直接确定温度对折射率的影响大小.

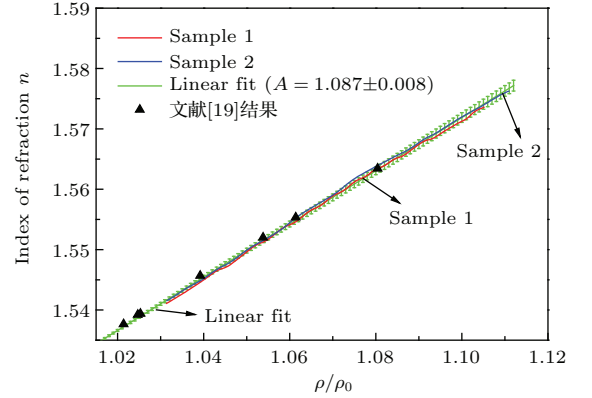


图 5 (网刊彩色) 折射率实验结果

Fig. 5. (color online) Results of refractive index.

利用表征折射率与极化率关系的 Lorentz-Lorenz 方程可以分析实验加载过程极化率的性质. Lorentz-Lorenz 方程 [2,3,6] 为

$$(n^2 - 1)/(n^2 + 2) = K\rho\alpha, \quad (7)$$

其中  $K$  为常数,  $\alpha$  为极化率. 微分后

$$\frac{dn}{d\rho} = \frac{(n^2 - 1)(n^2 + 2)}{6n\rho} \left[ (1 - \Lambda_0) + \rho\tau_0 \frac{dT}{d\rho} \right], \quad (8)$$

其中  $\Lambda_0 = -(\rho/\alpha)(\partial\alpha/\partial\rho)_T$  为应变极化率系数,  $\tau_0 = (1/\alpha)(\partial\alpha/\partial T)_\rho$  为温度极化率系数, 将  $\Lambda' = \Lambda_0 - \rho\tau_0 \frac{dT}{d\rho}$  定义为极化率系数 [2,3,6]. 由 (4) 和 (8) 式计算的极化率系数  $\Lambda'$  见图 6. 随着加载压力由零增加到  $Z$ -切石英晶体弹性极限的范围,  $\Lambda'$  在 0.301—0.305 范围线性增加,  $\Lambda'$  变化很小. 密度固定时温度极化率系数  $\tau_0$  一般在  $10^{-5}$  量级 [3]. 结合 (6) 式, 极化率系数与温度相关项  $\rho\tau_0 \frac{dT}{d\rho}$  可化简为  $\gamma_0\tau_0 T_S$ . 计算得  $\rho\tau_0 \frac{dT}{d\rho}$  约为 0.001 左右, 远小于  $\Lambda'$  值. 因此, 在  $Z$ -切石英晶体的弹性极限内, 温度对石英晶体折射率的影响相比于密度可以忽略.

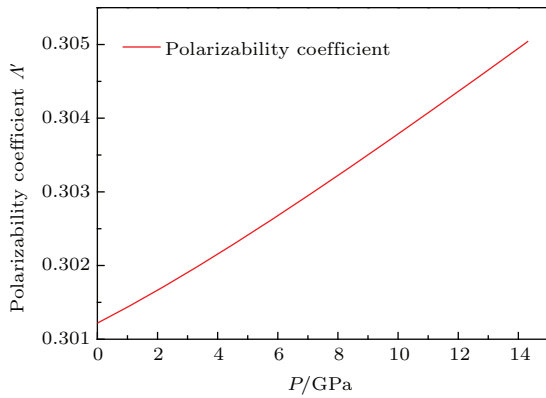


图6 Z-切石英晶体弹性极限内极化系数随压力的变化  
Fig. 6. Polarizability coefficient of Z-cut quartz in the range of its elastic limit.

## 5 结 论

利用CQ-4磁驱动装置和激光波长1550 nm的DLHV激光测速系统,研究了斜波加载下Z切石英晶体做窗口时的折射率修正关系.在数据处理中,利用反积分方法由实验测得的LiF窗口与极板界面粒子速度计算得到极板的加载磁压力历史;以获得的磁压力为输入条件,采用LS-DYNA计算软件正向计算得到石英晶体窗口与极板界面的真实粒子速度历史.由实验测量的连续变化的Z切石英晶体窗口/极板界面表观粒子速度和计算得到的真实粒子速度,获得了Z切石英晶体在其弹性极限内连续的折射率修正关系,并且将折射率修正关系的压力适用范围拓宽至14.55 GPa. Z切石英晶体的弹性极限与加载路径和加载应变率有关,实验所测两个样品的弹性极限值分别为14.55 GPa和14.32 GPa.当表观粒子速度与真实粒子速度采用线性关系拟合时,得到Z切石英晶体的折射率与密度的关系为 $n = 1.087 (\pm 0.0008) + 0.4408\rho/\rho_0$ ,与已有的冲击加载的结果一致.由实验获得的折射率数据计算分析了Z切石英晶体的极化率,结果表明在其弹性极限范围内加载路径和温度对折射率的影响可以忽略.

感谢吴刚、胥超、税荣杰、马骁对CQ4实验装置的运行和陶彦辉、邓顺益在实验数据测试中的帮助!

## 参考文献

[1] Barker L M, Hollenbach R E 1970 *J. Appl. Phys.* **41** 4208

[2] Setchell R E 1979 *J. Appl. Phys.* **50** 8186  
 [3] Setchell R E 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 2833  
 [4] Fratanduono D E, Eggert J H, Boehly T R, Barrios M A, Meyerhofer D D, Jensen B J, Collins G W 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 083509  
 [5] Jones S C, Gupta Y M 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 5671  
 [6] Cao X X, Li J B, Li J, Li X H, Xu L, Wang Y, Zhu W J, Meng C M, Zhou X M 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 093516  
 [7] Zhao W G, Zhou X M, Li J B, Zeng X L 2014 *Chin. J. High Pressure Phys.* **28** 571 (in Chinese) [赵万广, 周显明, 李加波, 曾小龙 2014 高压物理学报 **28** 571]  
 [8] Li X M, Yu Y Y, Li Y H, Ye S H, Weng J D 2010 *Acta Phys. Sin.* **61** 156202 (in Chinese) [李雪梅, 俞宇颖, 李英华, 叶素华, 翁继东 2010 物理学报 **61** 156202]  
 [9] Ma Y, Li Z R, Hu S L, Li J B, Wang X S, Chen H, Weng J D, Liu J, Yu Y Y, Song P, Xiang Y M 2007 *Chin. J. High Pressure Phys.* **21** 397 (in Chinese) [马云, 李泽仁, 胡绍楼, 李加波, 汪小松, 陈宏, 翁继东, 刘俊, 俞宇颖, 宋萍, 向曜民 2007 高压物理学报 **21** 397]  
 [10] Hall C A, Asay J R, Knudson M D, Stygar W A, Spielman R B, Pointon T D, Reisman D B, Toor A, Cauble R C 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 3587  
 [11] Sun C W, Zhao J H, Wang G G, Zhang H P, Tan F L, Wang G H 2012 *Adv. Mech.* **42** 206 (in Chinese) [孙承伟, 赵剑衡, 王桂吉, 张红平, 谭福利, 王刚华 2012 力学进展 **42** 206]  
 [12] Wang G G, Zhao J H, Zhang H P, Sun C W, Tan F L, Wang G H, Mo J J, Cai J J, Wu G 2012 *Eur. Phys. J. Special Topics* **206** 163  
 [13] Fratanduono D E, Boehly T R, Barrios M A, Meyerhofer D D, Eggert J H, Smith R F, Hicks D G, Celliers P M, Braun D G, Collins G W 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 123521  
 [14] Wackerle J, Stacy H L, Dallman J C 1987 *Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **832** 72  
 [15] Hayes D B 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 648  
 [16] Hayes D B, Hall C A, Asay J R, Knudson M D 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 2331  
 [17] Nazarov D V, Mikhailov A L, Fedorov A V, Manachkin S F, Urlin V D, Men'shikh A V, Finyushin S A, Davydov V A, Filinov E V 2006 *Combust. Explo. Shock* **42** 351  
 [18] Fratanduono D E, Eggert J H, Akin M C, Chau R, Holmes N C 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 043518  
 [19] Li X M, Yu Y Y, Li Y H, Zhang L, Ma Y, Wang X S, Fu Q W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2691 (in Chinese) [李雪梅, 俞宇颖, 李英华, 张林, 马云, 汪小松, 付秋卫 2010 物理学报 **59** 2691]  
 [20] Wackerle J 1962 *J. Appl. Phys.* **33** 922  
 [21] Wang G J, Luo B Q, Zhang X P, Zhao J H, Sun C W, Tan F L, Chong T, Mo J J, Wu G, Tao Y H 2013 *Rev. Sci. Instrum.* **84** 015117  
 [22] Zhang X P, Wang G J, Zhao J H, Tan F L, Luo B Q, Sun C W 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 055110  
 [23] Hayes D B 2001 Sandia National Laboratories Report SAND2001-1440

- [24] Zhang H P, Sun C W, Li M, Zhao J H 2011 *Chin. J. Theor. Appl. Mech.* **43** 105 (in Chinese) [张红平, 孙承纬, 李牧, 赵剑衡 2011 力学学报 **43** 105]
- [25] Luo B Q, Wang G J, Tan F L, Zhao J H, Sun C W 2014 *Chin. J. Theor. Appl. Mech.* **46** 241 (in Chinese) [罗斌强, 王桂吉, 谭福利, 赵剑衡, 孙承纬 2014 力学学报 **46** 241]
- [26] Ao T, Knudson M D, Asay J R, Davis J P 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 103507
- [27] LaLone B M, Fat'yanov O V, Asay J R, Gupta Y M 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 093505
- [28] Barrios M A, Boehly T R, Hicks D G, Fratanduono D E, Eggert J H, Collins G W, Meyerhofer D D 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 093515
- [29] Tan H 2007 *Introduction to Experimental Shock Wave Physics* (Beijing: National Defense Industry Press) pp37–91 (in Chinese) [谭华 2007 实验冲击波物理导引 北京 (国防工业出版社) 第37—91页]
- [30] Tang W H, Zhang R Q 2008 *Introduction of Theory and Computation of Equations of State* (Beijing: Higher Education Press) pp230–239 (in Chinese) [汤文辉, 张若棋 2008 物态方程理论及计算概述 (北京: 高等教育出版社) 第230—239页]

## Refractive index of Z-cut quartz under magnetically driven quasi-isentropic compression\*

Zhang Xu-Ping<sup>1)</sup> Luo Bin-Qiang<sup>1)</sup> Chong Tao<sup>1)</sup> Wang Gui-Ji<sup>1)</sup> Tan Fu-Li<sup>1)</sup>  
Zhao Jian-Heng<sup>1)†</sup> Sun Cheng-Wei<sup>1)</sup> Liu Cang-Li<sup>2)</sup>

1) (Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

2) (China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

( Received 28 September 2015; revised manuscript received 5 December 2015 )

### Abstract

The refractive index of Z-cut quartz under magnetically driven quasi-isentropic compression is researched by using the pulsed power generator CQ-4. Its velocities of interface between the aluminum panel and the window are measured by a four-channel dual laser heterodyne velocimeter, which is operated at an incident laser wavelength of 1550 nm. The history profile of magnetic pressure on the electrodes is obtained by a backward integration calculation of the aluminum/LiF interface velocity. And then the pressure history profile is used in the LS-DYNA simulation to get the true particle velocity of the aluminum/quartz interface. Combining with the apparent particle of aluminum/quartz interface which is obtained from experiments, a continuous index of refraction in Z-cut quartz has been obtained at up to a pressure of 14.55 GPa as the longitudinal stress is gradually increased to its elastic limit. The relation between the apparent particle and true particle velocities can be fitted by a polynomial, and the required derivative obtained by differentiation of that polynomial. Refractive index determined from the linear fitting parameters is  $n = 1.087(\pm 0.008) + 0.4408\rho/\rho_0$ , which agrees well with the previous shock results. Results from polarizability analysis suggest that the temperature and loading path should have less effect on the refractive index of Z-cut quartz within its elastic limit.

**Keywords:** magnetically driven quasi-isentropic compression, index of refraction, elastic limit, Z-cut quartz

**PACS:** 62.50.-p, 62.50.Ef, 64.30.Jk

**DOI:** 10.7498/aps.65.046201

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11327803, 11176002, 11272295).

† Corresponding author. E-mail: [jianh\\_zhao@caep.ac.cn](mailto:jianh_zhao@caep.ac.cn)