

文章编号: 1001-4888(2018)05-0799-08

利用薄片石英测量电子束热激波^{*}

林鹏, 辛督强, 魏燕明

(西京学院, 陕西西安 710123)

摘要: 介绍了在“闪光二号”脉冲电子束加速器上采用 x 切割薄片石英压电传感技术测量热激波的情况。传感器通过对压电信号的积分得到热激波波形, 克服了厚石英晶体传感技术测量有效时间受厚度限制的缺点。实验得出: (1) 一维应变冲击条件下, 在 1400 MPa 应力以下, 薄片石英压电系数平均为 2.10 pc/N; (2) 靶后固定位置的热激波峰值与入射电子束能注量成线性增加关系; (3) 涂层材料对内层靶表面形成了有效保护, 并有效降低了靶中传播的热激波峰值强度; (4) 在一维应变状态下, 石英晶片工作面积大, 压电信号的信噪比高, 特别适合用于复合材料中的热激波测量。

关键词: 热激波; 石英晶体传感器; 压电系数; 电子束; 能注量

中图分类号: O347.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-263

0 引言

Sandia 石英应力传感器是利用石英晶体的压电效应做成的一种冲击波应力传感器, 自 20 世纪 60 年代以来, 广泛用于 2 GPa 以下的冲击波压力剖面测量。该类传感器通常采用具有一定直径 d -厚度 l 比 ($d/l \geq 5$) 的 x 切割石英圆板制成, 以保证晶片处于一维应变状态。传感器结构采用正向设置, 有三种基本结构: 正电极面无保护环的全电极型; 正电极面有断路保护环^[1]; 正电极面有短路保护环^[2]。Jones 和 Halpin^[2]以及 Hayes 和 Gupta^[3]先后对具有短路保护环的 x 切割石英晶片进行了动态标定。Graham 等^[1]和吴嵩毓^[4]分别对全电极型和断路保护环型石英晶片的压电系数进行了轻气炮加载标定, 得到了一致的标定结果, 标定实验结果显示, 当全电极型石英晶片的直径-厚度比 $d/l \geq 20$ 时, 其动态压电系数与具有保护环的晶片趋于一致。由于石英晶体的温度稳定性好, 响应频率高, 国内外学者常将其用于脉冲束流辐照产生的热冲击波(简称热激波)测量^[5-8]。当热激波从负极面进入石英晶体, 在到达正极面之前, 传感器输出的压电电流正比于试样-传感器负极面上的压力。当热激波到达正极面时, 输出信号翻转, 因此, 这种工作方式的传感器的有效测量时间小于或等于热激波通过传感器敏感元件的时间, 与传感器的厚度密切相关。石英晶体需要保持一定的直径-厚度比, 而晶体难以做得很大, 所以这类传感器的有效测量时间较短, 难以满足一些多孔疏松复合材料中的热激波测量。

在“短路电流”工作模式下, 石英晶体传感器可以视为压差传感器。如果将晶片厚度做得很薄(比如 0.2 mm), 则应力波通过晶片厚度方向的时间很短(约 35 ns), 此时可通过对传感器输出压电信号积分得到通过晶片的应力波波形。这种情况下传感器的有效工作时间将不受晶片厚度的影响。Chen 等^[9]1999 年将薄片石英晶片嵌入 SHPB 杆中, 给出了橡胶等软材料的透射信号测试方法。林玉亮等^[10]和王宝珍等^[11]利用嵌入 SHPB 杆中的薄片石英晶片分别对低密度聚氨酯泡沫和猪后腿肉进行了实验测

^{*} 收稿日期: 2017-12-07; 修回日期: 2018-01-11

基金项目: 中央引导地方科技发展专项(2017ZY-CXPT-13)资金资助

通讯作者: 林鹏(1968—), 男, 博士, 副研究员。主要从事辐射热力学效应研究。Email: yjlin2002@163.com

试,成功解决了一维应力状态下软材料在 SHPB 实验中透射应力波信号弱的测试难题。受此启发,在一维应变冲击加载下,利用薄片石英压电信号的积分来获得应力波形,则可克服晶体厚度对测量有效时间的限制。

本文试图对 x 切割薄片石英晶片传感器的封装工艺、压电系数的实验标定和由此构成的热激波探头的设计开展研究,以期解决厚石英晶片在电子束热激波测量中有效时间较短的问题,为一些新型多功能材料的辐照热力学效应实验提供可靠、实用的测试技术。

1 实验测量原理

1.1 传感器封装

采用直径 20mm、厚度 0.2mm 的 x 切割石英晶片作为传感元件来测量电子束热激波。将石英晶片的两个面抹上适量导电胶,再分别覆盖 $8\mu\text{m}$ 厚的铝膜构成导电电极。采用聚酰亚胺薄膜作为绝缘膜,绝缘膜贴在压板上,膜上涂上适量环氧树脂。最后将晶片封装在两层绝缘膜之间,见图 1。传感器封装后整体厚度约 0.26mm。

将封装好的石英传感器紧贴于靶后,再配上与石英波阻抗匹配的压块构成靶组件。将靶组件安置于金属探头壳体内,构成热激波测量探头,完成热激波的测量。由于传感器有一定的厚度,使用时将会对热激波的上升时间有微小影响,但是因为波通过传感器的时间小于 80ns,远小于热激波脉宽,因此波的失真可以忽略。

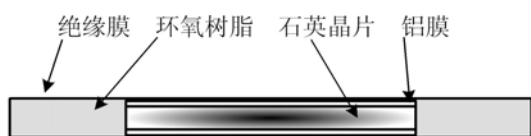


图 1 石英传感器的封装

Fig. 1 Encapsulation of the quartz gauge

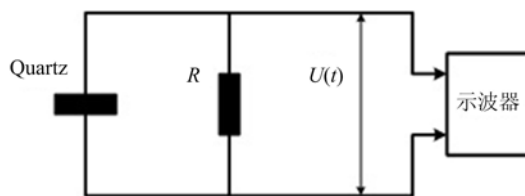


图 2 石英传感器测量电路

Fig. 2 Measurement circuit of quartz gauge

1.2 测量方法

在负极面和正极面之间接上负载电阻 R ,薄片石英晶体采用全电极型工作方式。使用时,将石英传感器的负极面紧贴于被测样品的表面,用于测量该表面上热激波压力 $\sigma(t)$ 随时间的变化。由于石英晶体的内电阻非常大(百兆欧),负载电阻很小(常采用与传输电缆匹配的 50Ω 电阻),采用如图 2 所示的电流输出工作方式时,石英应力传感器相当于在“短路方式”下工作。当热激波压力 $\sigma(t)$ 作用在石英片前电极时,由于压电效应,在测量电路中产生压电电流 $i(t)$,压电电荷 Q 由下式计算:

$$Q(t) = \int_0^t i(t) dt = \int_0^t \frac{U(t)}{R} dt \quad (1)$$

式中, $U(t)$ 为负载电阻 R 上的电压信号。平面一维应变状态下的石英晶体的压电方程为^[12]

$$Q = AK\sigma \quad (2)$$

式中, A 为电极面积; K 为晶片压电系数。由式(1)和(2)可得

$$\sigma(t) = \frac{1}{AKR} \int_0^t U(t) dt \quad (3)$$

式(3)表明,通过测量压电电压信号,并对信号积分即可得到通过晶体的热激波波形。

2 压电系数标定

在 $\Phi 130\text{mm}$ 轻气炮装置上进行薄片石英的压电系数标定。如图 3 所示,将封装好的石英传感器夹在靶组件中,飞片粘在弹托端面,速度由激光测试系统给出。飞片在击靶前先碰撞探针,触发测试系统开始记录数据。

通过控制飞片的速度 w 和材料来得到靶中的不同冲击波平台压力 p 。靶材料选 Ly-12 铝,其波阻抗和石英晶片接近,可以不考虑波在不同材料界面反射带来的误差。飞片材料可以选有机玻璃或 Ly-12 铝。当飞片为 Ly-12 硬铝时,飞片和靶材料相同,称为对称碰撞,靶中粒子速度 u_2 为飞片速度 w 的一半,即 $w/2$ 。

当飞片材料和靶不同时,靶中粒子速度 u_2 采用下式计算:

$$u_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \tag{4}$$

其中

$$\begin{cases} a = \rho_{01} \lambda_1 - \rho_{02} \lambda_2 \\ b = -(\rho_{01} C_{01} + \rho_{02} C_{02} + 2\rho_{01} \lambda_1 w) \\ c = \rho_{01} C_{01} w + \rho_{01} \lambda_1 w^2 \end{cases} \tag{5}$$

式(5)中 c 和 λ 为材料的冲击 Hugoniot 参数,下标 1 和 2 分别对应飞片和靶。材料参数如表 1 所示。

由飞片的速度和材料的 Hugoniot 参数计算出靶中的粒子速度 u_2 ,冲击波压力由下式计算:

$$p = \rho_{02} (c_{02} + \lambda_2 u_2) u_2 \tag{6}$$

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料	密度 / (g/cm ³)	C / (m/s)	λ
PMMA(有机玻璃)	1.185	2880	1.327
Ly-12 铝	2.785	5370	1.29

图 4 是标定实验测量得到的典型压电信号和根据压电信号积分得到的冲击波压力平台。实验数据汇于表 2 中,可以看出一维应变冲击条件下薄片石英压电系数随冲击波压力略有变化。在 1400MPa 以下,对测量数据进行统计,得出压电系数平均为 2.10pc/N,与文献[4]给出的 2.04pc/N 和 2.15pc/N 接近。但是,当压力大于 1400MPa 后,薄片石英的压电系数呈现离散且整体下降趋势。在 $\Phi 130\text{mm}$ 轻气炮上的标定实验,采用的是 2.5kg 的大尺寸弹托,弹托上的飞片与靶碰撞时存在一定的倾斜角。当冲击压力大于 1400MPa 时,在平面冲击波扫过整个传感器工作面积前,传感器失效导致压电信号不完整,因此造成压电系数下降。

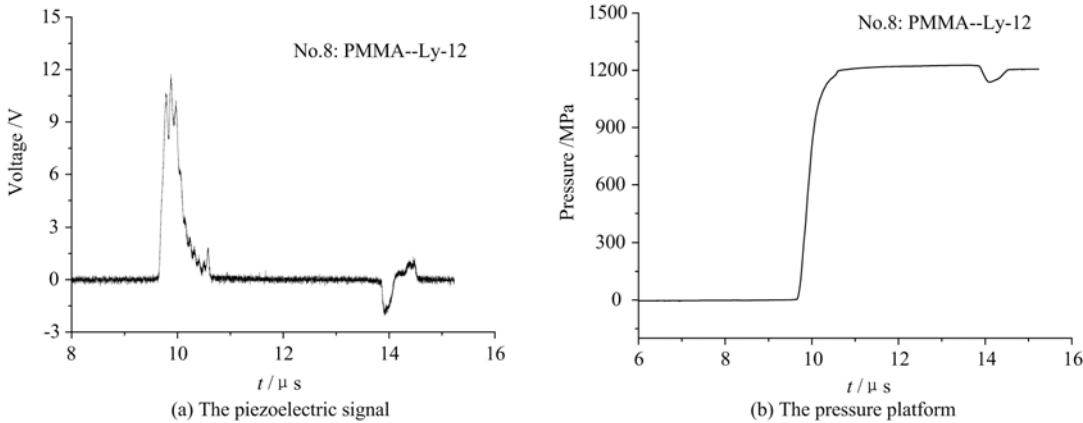


图 4 传感器输出电压波形及压力信号(压电信号积分给出)

Fig. 4 The output voltage signal and pressure signal

表 2 标定实验数据

Tab. 2 Experimental data of calibration

炮 号	飞片材料	弹速 $w/(m/s)$	应力 p/MPa	压电系数 $k/(pC/N)$
1	Ly-12	234.4	1802	0.82
2	Ly-12	238	1831	1.79
4	Ly-12	244	1877	1.16
6	PMMA	306	930	2.09
7	PMMA	243	726	2.01
8	PMMA	390	1211	2.17
9	PMMA	426	1336	2.05
12	PMMA	272.7	821	2.19
13	Ly-12	155	1182	2.15

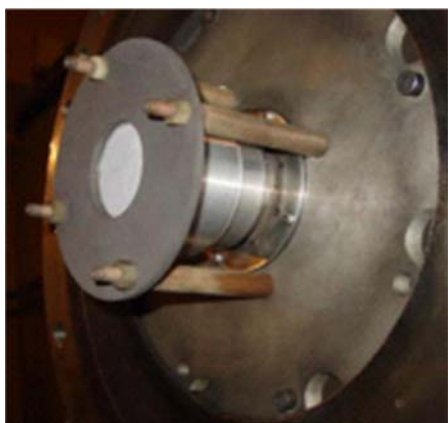


图 5 安装在漂移管中的热激波探头

Fig. 5 The probe installed in drifted tube

3 电子束热激波测量

实验在“闪光二号”电子束加速器上进行。“闪光二号”加速器是一台低能强流脉冲相对论电子束加速器,主要包括 Marx 发生器,水介质传输线(形成线、传输线、输出线、变阻抗线),主开关,预脉冲开关,低阻抗二极管,电子束漂移管,脉冲引导磁场,控制、测量系统和配套的水处理系统,变压器油处理系统。加速器输出强流电子束,主要用于开展电子束模拟软 X 射线对材料的热-力学效应实验^[13]。二极管阴极发射的电子在磁场的作用下,在漂移管中传输,所加磁镜场约束电子束的横向运动,并压缩束斑,提高电流密度。将热激波探头安装在漂移管中心附近固定位置,使得电子束的束斑直径基本一致。图 5

为固定在漂移管中的热激波探头,探头前的石墨挡板用于限制靶受辐照面积并测量电子束的束斑直径。靶上电子束能注量 Ψ 由下式计算:

$$\Psi = 4 K_e E_T / (\pi D_0^2) \quad (7)$$

式中, K_e 为电子束传输效率,其值为 0.7~0.75; E_T 为电子束总束能; D_0 为靶面处的电子束斑直径。

实验材料为 Ly-12 硬铝和自行研制的一种涂层材料。硬铝靶直径 70mm,厚度 10mm。涂层材料涂抹在 10mm 厚的硬铝靶表层,涂层厚度约 2mm,实验目的在于考核涂层材料对热激波的抑制效果。靶组件中压块材料也为 Ly-12 硬铝,其波阻抗和石英匹配,可有效减弱波在传感器和材料界面之间的反射。石英晶片的压电面直径为 20mm,厚度为 0.2mm,直径-厚度比 $d/l=100$,可以视为平面一维应变状态。当全电极型石英晶片的直径-厚度比 $d/l \geq 20$ 时,其动态压电系数与具有保护环的晶片趋于一致。

表 3 给出了两轮共 10 炮实验的电子束参数。表中 U_0 为二极管电压峰值; I_0 为二极管电流峰值; τ 为二极管功率波形的半高宽; E_{av} 为电子束平均能量。两轮实验加速器状态是不同的。

电子束辐照到靶表面,因为瞬时的能量沉积,表面薄层内沉积大量能量,材料比内能升高,表面形成巨大的压力梯度和温度梯度,引起材料的喷发,在靶中形成热激波传播。图 6 给出了硬铝和涂层材料受辐照前后的形貌对比。电子在硬铝中的射程为毫米量级,在硬铝靶表面烧蚀形成了约 0.2mm 深度的物质喷发。涂层材料受辐照后,表面有少量烧蚀喷发,涂层对内层的硬铝基底形成了有效保护。

表 3 电子束源参数
Tab. 3 Parameters of electron beam

No.	E_{av}/MeV	U_0/kV	I_0/kA	τ/ns
082	0.391	655	408	154
083	0.438	623	362	152
084	0.430	646	340	155
085	0.387	608	369	155
086	0.446	655	379	149
136	0.402	660	299	94
137	0.210	534	485	85
141	0.369	647	193	68
142	0.226	603	245	74
113	0.537	1280	551	70

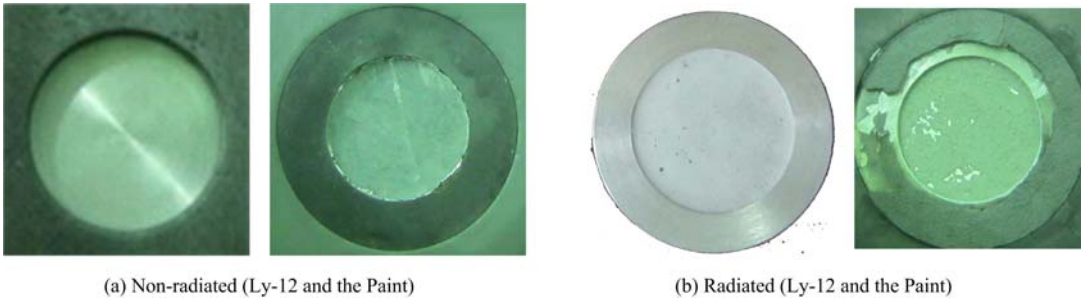


图 6 辐照前后靶形貌变化
Fig. 6 Changes of the target before and after radiation

薄片石英传感器测量的典型信号如图 7(a)所示,图 7(b)为积分得到的热激波波形。因为压电信号高达 100 多伏,因此在测量电缆后端接了一个 20dB 的衰减头,以避免示波器测量通道超量程。采用薄片石英的好处是测量有效时间不受晶片厚度影响,同时晶片的压电面积可以选择做得较大,因此,测量的信号幅度大,信号的信噪比高。当实验材料为产生热激波信号强度较弱的复合材料时,则可去掉衰减头,并将压电面积增大,从而得到信噪比高的压电信号,因此薄片石英传感技术特别适合于复合材料中的热激波测量。图 7(c)是涂层材料实验测量压电信号,图 7(d)为由积分得到的热激波波形。表 4 给出了两轮实验共 10 炮的实验结果。

表 4 电子束热激波测量结果
Tab. 4 Experimental data of thermal shock waves

No.	材料	E_T/kJ	$\Psi/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$
082	Ly-12	25.30	213	696
083	Paint	25.99	202	148
084	Paint	23.18	177	126
085	Paint	23.22	177	124
086	Paint	27.33	217	137
136	Ly-12	16.39	153	705
137	Ly-12	7.39	74	151
141	Ly-12	10.02	94	249
142	Ly-12	11.28	106	280
113	Ly-12	23.4	509	2160

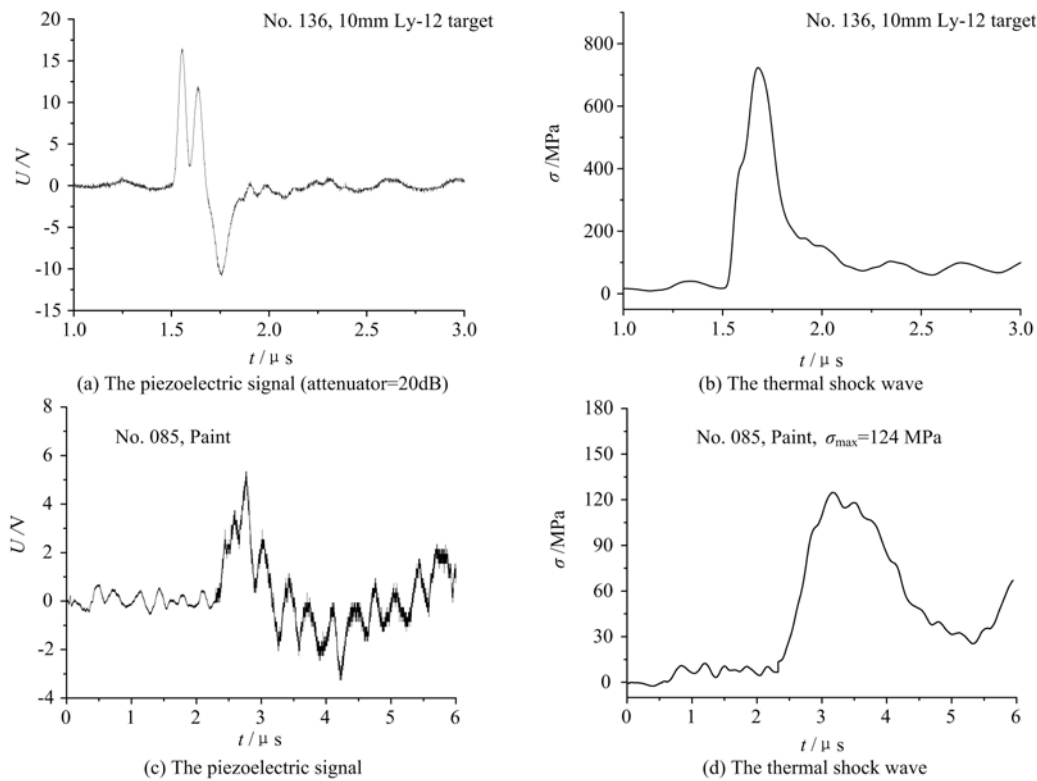


图 7 薄片石英压电信号及热激波波形

Fig. 7 The piezoelectric signal and thermal shock wave

硬铝表层能量沉积区辐照产生的热激波应力值由式(8)计算:

$$\sigma(x) = \Gamma_0 \rho_0 E(x) \quad (8)$$

式中, Γ_0 为格林内森系数, 值为 2.13; ρ_0 为硬铝的密度, 2790 kg/m^3 ; $E(x)$ 为沉积的比内能, 单位为 J/kg 。可见硬铝中热激波峰值的大小与电子沉积能量成正比关系。而沉积的比内能又与电子束表面能注量成正比关系, 因此, 能量沉积区产生的热激波峰值与入射电子束的能注量 Ψ 成正比关系。在进入辐照面后的传播区, 热激波应力峰值可表示为^[14]

$$\sigma_{\max}(x) = A_1 \frac{\Psi}{r} \quad (9)$$

式中, A_1 为常数; r 为距靶面的距离。由公式(9)可见在能量沉积区外的固定位置, 热激波峰值强度与电子束能注量依然呈线性关系。

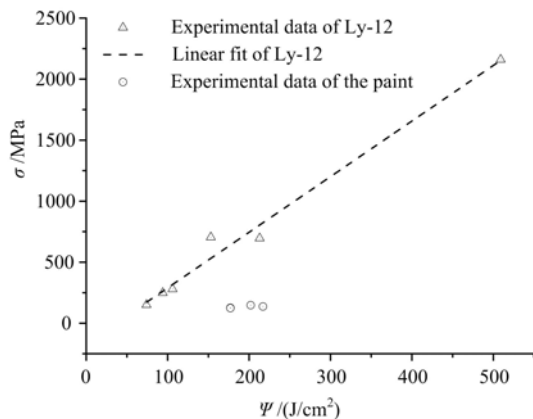


图 8 靶后热激波强度与能注量的关系

Fig. 8 Intensity of thermal shock wave vs energy fluxes

对表 4 中 Ly-12 硬铝的 6 炮测量结果进行分析, 如图 8 所示, Ly-12 靶在 10mm 厚度处的热激波应力峰值与电子束能注量满足线性增加关系, 与公式(9)的理论分析结果一致, 说明测量方法是可靠的。

对前 5 炮实验进行分析, 将 4 炮涂层和 1 炮硬铝的实验结果进行比较(见图 8), 可以看出, 加涂层后的硬铝中的热激波峰值强度只是直接受辐照靶中热激波强度的 20% 左右, 说明该涂层材料对内层靶形成了有效保护。这是因为当电子束辐照涂层材料时, 能量全部沉积在涂层表面, 避免了硬铝的直接烧蚀破坏, 同时由于涂层的密度和格林内森系数均小于硬铝的密度和格林内森系数,

由式(8)可知在涂层中产生的热激波峰值强度要小于直接辐照硬铝产生的热激波峰值强度。涂层材料降低了产生的热激波峰值,延长了热激波宽度;透射入硬铝靶的热激波再经传播衰减,脉宽进一步展宽,峰值会进一步降低。图7(d)显示了这种特点。

4 结论

采用x切割薄片石英晶片和适当的封装工艺,研制了一种新型的热激波测量探头,并对电子束辐照硬铝和涂层材料产生的热激波进行了有效测量。研究表明:

- (1) 在一维应变冲击条件下,1400MPa 峰值应力以下,x切割石英的压电系数平均为2.10pC/N;
- (2) 薄片石英热激波测量技术采用信号积分方法得到应力波形,测量有效时间不受厚度限制,测量信号信噪比高,特别适合复合材料中弱信号的热激波测量;
- (3) 对硬铝的测量结果表明,靶后的热激波峰值与入射能注量成线性增加关系,与理论分析一致,该测量方法正确可信;
- (4) 实验所用涂层材料对内层靶材形成了有效保护,并有效降低了内层靶中传播的热激波峰值强度。

参考文献:

- [1] Graham R A, Neilson F W, Benedick W B. Piezoelectric current from shock-loaded quartz-a submicrosecond stress gauge[J]. Journal of Applied Physics, 1965, 36(5):1775—1783.
- [2] Jones G A, Halpin W J. Shorted guard-ring quartz gauge[J]. Review of Scientific Instruments, 1968, 39(3):258—261.
- [3] Hayes D B, Gupta Y M. Impact response of a shorted guard-ring quartz gauge between 20 and 26 kilobar[J]. Review of Scientific Instruments, 1974, 45(12):1554—1560.
- [4] 吴嵩毓. 短路电流石英传感器及其动态标定[J]. 爆炸与冲击, 1984, 5(4):61—66 (WU Songyu. Piezoelectric current quartz-gauge and its dynamic calibration[J]. Explosion and Shock Waves, 1984, 5(4):61—66 (in Chinese))
- [5] Graham R A, Ingram C W. Piezoelectric current from X-cut quartz subjected to short-duration shock wave loading [R]. SAND 78-1911, 1978:61—72.
- [6] Taylor P E, Gilbert P H, Kernthaler C, et al. Quartz gauge response in ion radiation[C]. AIP Conference Proceedings, 1996, 370:1033—1036.
- [7] 林鹏, 王肖钧, 彭常贤, 等. 脉冲辐照下三维多向编织复合材料热激波的实验研究[J]. 实验力学, 2005, 20(1): 28—33 (LIN Peng, WANG Xiaojun, PENG Changxian, et al. Experimental studies of thermal shock wave in 3-d braided composite under pulsed beam radiation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(1):28—33 (in Chinese))
- [8] 林鹏, 李捷, 王等旺. 高碱玻璃布在电子束辐照下热力学效应实验研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(s1):120—124 (LIN Peng, LI Jie, WANG Dengwang. Experimental studies of thermo-mechanical effects in alkali glass-fiber cloth under electron beam irradiation[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(s1):120—124(in Chinese))
- [9] Chen W, Lu F, Zhou B A. A quartz-crystal-embedded split Hopkinson pressure bar for soft materials[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(1):1—6.
- [10] 林玉亮, 卢芳云, 卢力. 石英晶体在霍普金森压杆实验中的应用[J]. 高压物理学报, 2005, 19(4):484—489 (LIN Yuliang, LU Fangyun, LU Li. The application of quartz transducer technique in SHPB[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(4):484—489 (in Chinese))
- [11] 王宝珍, 胡时胜. 肌肉类粘弹性超软材料 SHPB实验的应力应变均匀性分析[J]. 实验力学, 2011, 26(4):377—382 (WANG Baozhen, HU Shisheng. Analysis of stress and strain uniformity of muscle-like extra-soft viscoelastic material in SHPB experiment[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(4):377—382 (in Chinese))
- [12] 黄正平. 爆炸与冲击电测技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2006:212 (HUANG Zhengping. Explosion and measuring technique[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006:212(in Chinese))
- [13] 王道荣, 刘佳琪, 汤文辉, 等. 强脉冲X光热力学效应研究方法概论[M]. 北京:中国宇航出版社, 2013:149

(WANG Daorong, LIU Jiaqi, TANG Wenhui, et al. Introduction to study method of the intense pulse X-ray's thermal mechanical effects[M]. Beijing: Chinese Space Navigation Press, 2013:165(in Chinese))

- [14] 周南, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学[M]. 北京:国防工业出版社, 2002:630 (ZHOU Nan, QIAO Dengjiang. Materials dynamics under pulse beam radiation[M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2002:630 (in Chinese))

The measurement of thermal shock waves induced by electron beam by using thin slice quartz

LIN Peng, XIN Du-qiang, WEI Yan-ming

(Xijing University, Xi'an 710123, China)

Abstract: In this paper, on “FLASH II” pulse electron beam accelerator, the measurement technology of thermal shock waves induced by electron beam using x-cut thin slice quartz piezoelectric transducer is introduced. By integrating the piezoelectric signal, transducers obtain the thermal shock wave waveform, which overcomes the thickness limitation of thick quartz crystal sensing technology during the effective time range of measurement. Experimental results indicate: (1) Under the condition of one dimensional strain shock, the average piezoelectric coefficient of thin quartz is 2.10 pc/N, within the range of 1400Mpa stress. (2) The peak values of thermal shock wave at a fixed position behind the target increase linearly with the increase of energy fluence of incident electron beam. (3) The coating material can effectively protect the inner target surface and reduce the peak intensity of thermal shock wave propagating in the target. (4) Under the condition of one-dimensional strain, thin slice quartz has large working area and high signal-to-noise ratio (SNR) of piezoelectric signal. It is especially suitable for thermal shock wave measurement in composite materials.

Keywords: thermal shock wave; quartz crystal transducer; piezoelectric coefficient; electron beam; energy fluence