

文章编号: 1671-7449(2026)03-0289-10

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(3): 289-298.

环氧树脂基复合材料的灌封防护性能

郭宇健¹, 范志强^{1,2*}, 崔勇鑫¹

(1. 中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 针对嵌入式测试仪器中灌封材料的高 g 值冲击防护问题, 制备了不同含量端羧基液体丁腈橡胶 (Carboxylated-Terminated Liquid Acrylonitrile Rubber, CTBN) 的树脂基复合材料作为测试仪器的灌封材料。通过单轴压缩试验研究CTBN含量对材料力学性能的影响, 采用标准的朱-王-唐 (Zhu-Wang-Tang, ZWT) 非线性粘弹性模型描述灌封材料。将数值模拟得到的弹体侵彻过载分解重构作为仪器加载信号, 分析了灌封材料中CTBN含量、加载条件和内部结构对仪器内部元器件高 g 值冲击的影响。结果表明, 将芯片安装在远离中心的位置和使用强度较高的灌封材料都可以有效降低芯片上的应力幅值。通过改变芯片的安装位置, 可以降低大多数细节信号的能量, 调整灌封材料中CTBN的含量可以降低特定频段内细节信号的能量。

关键词: 嵌入式测试仪器; 灌封防护; 小波分析; 树脂基复合材料; ZWT非线性粘弹性模型

中图分类号: TB301; O346.3

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026020

引用格式: 郭宇健, 范志强, 崔勇鑫. 环氧树脂基复合材料的灌封防护性能[J]. 测试技术学报, 2026, 40(3): 289-298.

GUO Yujian, FAN Zhiqiang, CUI Yongxin. Encapsulation protective properties of epoxy resin matrix composites [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(3): 289-298.

Encapsulation Protective Properties of Epoxy Resin Matrix Composites

GUO Yujian¹, FAN Zhiqiang^{1,2*}, CUI Yongxin¹

(1. School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problem of high- g impact protection of encapsulating materials in embedded measurement instruments, resin-based composites with different contents of Carboxylated-terminated liquid acrylonitrile rubber (CTBN) were prepared as encapsulating materials for measurement instruments. The effect of CTBN content on the mechanical properties of the material was studied by a uniaxial compression test. The standard Zhu-wang-tang (ZWT) nonlinear viscoelastic model was used to describe the encapsulating material. The penetration overload of the projectile obtained by numerical simulation is decomposed and reconstructed as the loading signal of the instrument. The influence of CTBN content, loading conditions and internal structure on the high- g impact of the internal components of the instrument is analyzed. The results show that the stress amplitude on the chip can be effectively reduced by installing the chip

【收稿日期】2025-05-30

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(U2341236); 山西省基础研究计划资助项目(202403021211157); 电子测试技术重点实验室开放基金资助项目(2024-DZCSJS-04)

【作者简介】郭宇健(2001—), 男, 硕士生, 主要从事冲击动力学研究。E-mail: guoyujian1017@163.com。

*【通信作者】范志强(1989—), 男, 教授, 博士, 主要从事爆炸与冲击动态测试研究。E-mail: fanzhq@nuc.edu.cn。

away from the center and using high-strength encapsulating materials. By changing the installation position of the chip, the energy of most detail signals can be reduced, and adjusting the content of CTBN in the encapsulating material can reduce the energy of detail signals in a specific frequency band.

Key words: embedded measurement instruments; encapsulating protection; signal analysis; resin matrix composites; ZWT nonlinear viscoelastic model

0 引言

弹体侵彻过载和目标特征信息一般通过测试引信获取^[1],其核心功能在于精确记录弹体侵彻过程中加速度随时间的动态响应关系(时程曲线)。该功能主要由嵌入式测试仪器实现,这类仪器通常由加速度传感器、高速数据采集和存储电路以及电源系统组成。弹体侵彻目标时产生的瞬态冲击载荷^[2]极易超过测试系统内部电子器件的抗冲击阈值,从而导致传感器失效、电路板断裂或测试数据异常等问题,需要针对测试仪器进行缓冲防护,以提高装置及其内部组件的抗冲击性能。

当前,针对嵌入式测试仪器的抗冲击设计主要采用两种途径,即称为主动防护的测试仪器核心本体灌封加固和通过缓冲/吸能垫层对仪器与弹体之间实施冲击隔离的被动防护。在弹体与测试仪器之间增加被动防护装置,例如泡沫金属^[3]、多胞管等塑性压溃吸能装置^[4-5],能够显著降低自弹体传播至仪器内部电子器件上的过载幅值和冲击能量,获得了广泛的工程应用。然而,随着测试装置的智能化和小型化^[6],测试仪器内部用于填充缓冲吸能材料的空间也进一步压缩,因此,需要进一步协同内部灌封防护机制,综合提高测试仪器整体的抗过载性能。

灌封加固一方面依靠较高的刚度系数限制测控装置核心组件的振动和大变形,另一方面则依赖粘弹性阻尼衰减应力波幅值,耗散能量,实现冲击防护^[7]。这两种机制需要灌封材料同时具有较高的刚度系数和阻尼系数,高刚度意味着材料具有高的弹性模量,固定和限制变形效果更好,但是应力波在“硬”材料中传播速度较快,不利于阻尼耗散效应的发挥;阻尼衰减和滤波往往需要材料具有较高的阻尼耗散因子和储能模量,材料弹性模量一般会偏小,因此,对灌封材料的筛选和设计提出了更复杂的需求^[8-9]。近年来,学者针对树脂基灌封材料力学性能及其增韧改性方面开展了较多的研究^[10],但是针对适用于测试仪器灌

封防护材料的力学性能需求、材料体系对防护机制影响的研究仍存在一定的不足。

当前商用有限元软件中的可描述树脂基材料的力学模型并未考虑高速冲击、高应变率等因素,需要针对灌封材料冲击响应进行准确描述以研究材料组份和物理性能对灌封防护效果的影响。朱-王-唐(Zhu-Wang-Tang, ZWT)非线性粘弹性模型可用于描述聚合物在8%应变范围内的力学性能^[11],并且可以根据ZWT模型编写出与其对应的LS-DYNA用户自定义材料子程序用于数值模拟,仿真结果能够很好地与实验结果吻合。已有学者将其用于灌封防护^[12-13],但其考虑的加载信号频率单一,在反映灌封材料对内部组件的防护机制方面存在一定的局限性。

本文针对嵌入式测试仪器中灌封材料的高 g 值冲击防护问题开展研究,采用基于动力学实验和ZWT本构子程序,构建描述嵌入式测试仪器高 g 值冲击响应模型,研究灌封材料不同含量、加载条件和内部结构等因素对核心主体抗高 g 值冲击性能的影响规律,为实际应用中灌封材料的筛选和设计提供依据。

1 灌封材料

1.1 材料制备及力学性能测试

灌封材料采用环氧树脂基复合材料。使用的树脂为双酚A型环氧树脂(Epoxy Resin, EP-51),固化剂为甲基六氢邻苯二甲酸酐(Methyl Hexahydrophthalic Anhydride, MHHPA),促进剂为2-乙基-4-甲基咪唑(2-Ethyl-4-Methylimidazole, EMI-2, 4)。增韧剂由端羧基液体丁腈橡胶(Carboxylated-Terminated Liquid Acrylonitrile Rubber, CTBN)和EP-51混合而成,其中,CTBN与EP51的质量比为2:3^[14]。环氧树脂基复合材料按照表1中的配方混合制备。根据CTBN含量的不同,将制备的复合材料记作CTBN5、CTBN15和CTBN25。充分混合后,将混合物置于真空干燥箱中2 h,消除搅拌过程中产生的气泡。随后,将混合物倒入模具中升温固化,

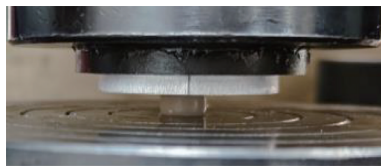
获得所需的试样。固化采用阶梯升温法: 50 ℃保温 1 h, 80 ℃保温 2 h, 100 ℃保温 3 h。

表 1 材料配方

Tab. 1 Materials formulation

	$\omega(\text{CTBN})/\%$	$\omega(\text{EP-51})/\%$	$\omega(\text{MHHPA})/\%$	$\omega(\text{EMI-2,4})/\%$
CTBN5	5.00	51.09	43.41	0.51
CTBN15	15.00	45.70	38.84	0.46
CTBN25	25.00	40.32	34.27	0.41

对不同 CTBN 含量的环氧树脂基复合材料在不同应变速率下进行单轴压缩实验, 研究材料在不同应变速率下的力学性能。如图 1(a) 所示, 采用万能试验机进行准静态压缩实验。样品直径为 8 mm, 长度为 8 mm。将试样放置在底部静止的平台中心, 上方平台以恒定的速度下降以压缩试样。分离式霍普金森压杆 (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) 是一种典型的动态实验装置, 已被广泛用于研究材料的动态力学行为^[15]。高应变率试验采用 SHPB 系统, 如图 1(b) 所示。该装置由撞击杆、入射杆和透射杆组成。撞击杆长度为 200 mm, 入射杆和透射杆长度为 1 500 mm。杆的直径均为 14.5 mm, SHPB 试验所用试样直径为 10 mm, 长度为 5 mm。



(a) 准静态压缩



(b) 动态压缩

图 1 单轴压缩试验

Fig. 1 Uniaxial compression experiments

因后续拟合需要, 设置实验应变率为 0.001, 0.02 和 2 000 s⁻¹。图 2 为实验测得的试样在不同应变率下的应力-应变曲线, 从图中可以看出, 在低应变率下, 应力随着应变的增大, 先增大后减小再增大; 而在高应变率下, 应力随着应变的增大, 先增大后减小; 试样的屈服强度随着应变率的提高显著增强; 同一应变率下, CTBN5 的屈服强度最高, CTBN25 的屈服强度最低。

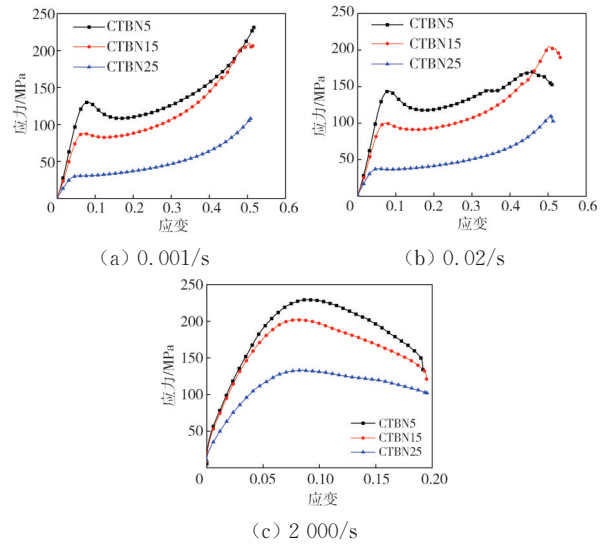


图 2 试样应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of three specimens

1.2 ZWT 本构模型参数

王礼立^[16]最早在研究环氧树脂动态力学行为中提出了适用于宽泛应变率和大到 8% 变形范围的非线性粘弹性本构方程, 后续被称为 ZWT 本构模型。ZWT 本构方程为

$$\sigma = C_0 \epsilon + \alpha \epsilon^2 + \beta \epsilon^3 + C_1 \int_0^t \dot{\epsilon}(\tau) \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + C_2 \int_0^t \dot{\epsilon}(\tau) \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau, \quad (1)$$

式中: ϵ 为应变; σ 为应力; t 为某恒定应变率下加载应变达到 ϵ 的时间; τ 为积分自变量; 等号右式前 3 项描述非线性弹性平衡响应, C_0 、 α 和 β 为对应的弹性常数; 第 1 个积分项描述低应变率下的粘弹性响应, C_1 和 θ_1 分别为所对应的低频 Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间; 第 2 个积分项描述高应变率下的粘弹性响应, C_2 和 θ_2 分别为所对应的高频 Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间。根据文献[11]的拟合方法对实验数据进行拟合, 表 2 为根据实验结果拟合的 ZWT 本构模型参数。

表2 ZWT模型参数

Tab. 2 Parameters of ZWT model

参数	C_0/MPa	α/GPa	β/GPa	C_1/MPa	θ_1/s	C_2/MPa	$\theta_2/\mu\text{s}$
CTBN5	761.1	36.5	-391.8	584.2	97.9	4 877.7	9.38
CTBN15	957.9	21.6	-280.9	350.8	42.4	5 228.5	8.96
CTBN25	897.5	-1.17	-94.1	306.7	1.6	3 386.8	12.83

1.3 子程序及验证

LS-DYNA 为用户提供了丰富的用户子程序接口,所有用户自定义子程序都必须在 LSTC 公司提供的专用于用户二次开发的动态链接库基础上,使用 Fortran 语言编译 dyn21.f 或 dyna21b.f 程序,生成新的求解器替换原求解器进行求解。在编写子程序时,采用现时 Kirchhoff 应力张量 S_{ij} 和现时 Green 应变张量 ϵ_{ij} , 将式(1)推广至三维状态,

$$S_{ij} = C_0 A_{ijkl} \epsilon_{kl} + \alpha \epsilon_{ij}^2 + \beta \epsilon_{ij}^3 + C_1 \int_0^t A_{ijkl} \frac{\partial \epsilon_{kl}}{\partial \tau} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + C_2 \int_0^t A_{ijkl} \frac{\partial \epsilon_{kl}}{\partial \tau} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau, \quad (2)$$

式中:4阶张量 A_{ijkl} 为三维各项同性弹性矩阵。基于 Updated Lagrangian 增量迭代法,现时 Kirchhoff 应力张量 S_{ij} 的增量形式可表示为

$$\Delta S_{ij} = (C_0 + 2\alpha \epsilon_{ij} + 3\beta \epsilon_{ij}^2) A_{ijkl} \Delta \epsilon_{kl} + C_1 \theta_1 A_{ijkl} \frac{\Delta \epsilon_{kl}}{\Delta \tau} e^{-\frac{t}{\theta_1}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta_1}}\right) + C_2 \theta_2 A_{ijkl} \frac{\Delta \epsilon_{kl}}{\Delta \tau} e^{-\frac{t}{\theta_2}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta_2}}\right) - S_{ij,t}^l \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\theta_1}}\right) - S_{ij,t}^h \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\theta_2}}\right), \quad (3)$$

式中: $S_{ij,t}^l$ 与 $S_{ij,t}^h$ 分别为低应变率粘弹性与高应变率粘弹性上一时刻应力。于是可以得到在时间增量步长的应力递推关系为

$$(S_{ij})_{n+1} = (S_{ij})_n + (\Delta S_{ij})_n. \quad (4)$$

为验证子程序,建立如图3所示的 SHPB 四分之一有限元模型,在入射杆杆端加载实验测得的应力曲线,曲线如图4所示。

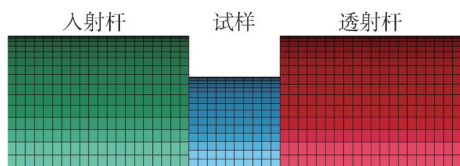


图3 SHPB有限元模型

Fig. 3 Finite element model of SHPB

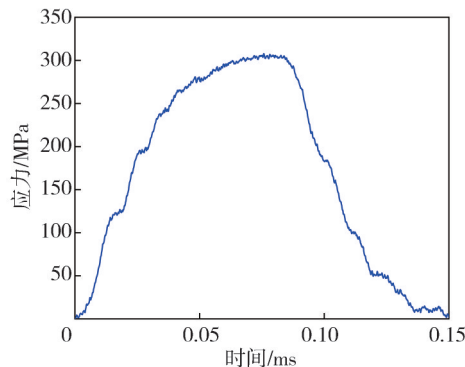


图4 模型加载曲线

Fig. 4 Curve of model loading

将得到的应力-应变曲线与实验结果对比,如图5所示,二者吻合良好。说明本文构建的ZWT材料模型及其本构子程序能够描述环氧树脂灌封材料在8%应变范围内的力学性能。

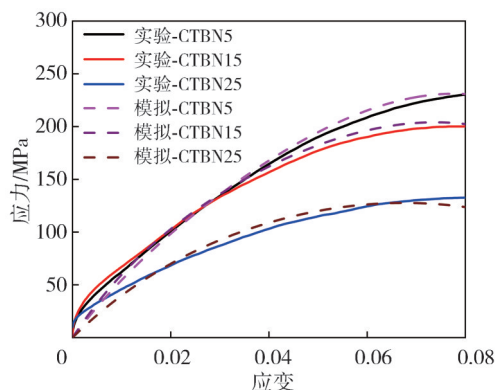


图5 数值模拟与实验结果对比

Fig. 5 Comparison between experimental result and simulated result

2 数值建模及仿真

2.1 有限元模型

图6为嵌入式测试仪器的有限元模型,该仪器外壳为矩形,尺寸为 $36\text{ mm} \times 36\text{ mm} \times 67\text{ mm}$,由两个腔室组成,上腔室用于安装加速度传感器,下腔室放置核心主体。主体外壳设计为一端开口的矩形盒子,其厚度为 2 mm 。核心主体有6块印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB),每块尺寸为 $16\text{ mm} \times 16\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,及一块尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的电池作为电源装置。芯片尺寸为 $8\text{ mm} \times$

8 mm×0.2 mm, 位于每个 PCB 的中心。主体外壳内部用环氧树脂灌封, 外部由 1 mm 厚的橡胶垫包裹, 以减轻冲击。为了节约计算时间, 建立了四分之一模型, 在模型的两个对称平面上应用对称边界条件。在仪器中心从右到左, 依次将芯片标记为 ch1、ch2 和 ch3。

考虑到仪器的实际设计和安装过程, 用于灌封的环氧树脂在固化后与 PCB 板、芯片、电池和主体外壳紧密结合, 在侵彻过程中不发生相对位移。PCB 板和芯片通过焊点连接, 不会有相对位移。因此, 在灌封材料和内部组件之间的所有接触面上都采用面面绑定接触算法, 橡胶垫与壳体采用自动面面接触算法。

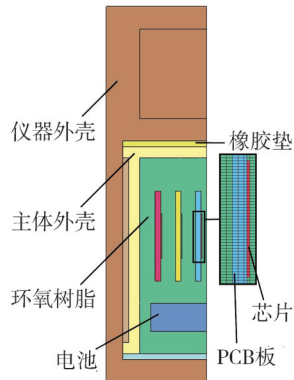


图 6 仪器有限元模型

Fig. 6 Finite element model of measurement

环氧树脂使用构建的 ZWT 本构模型, 模型参数见表 2, 密度(ρ)为 1 200 kg·m⁻³, 泊松比(μ)为 0.38。

仪器外壳, 主体外壳与电池均使用 Plastic-Kinematic 模型, 模型参数如表 3 所示, E 为弹性模量, σ_y 为屈服应力, E_t 为切线模量。

表 3 Plastic-Kinematic 模型参数

Tab. 3 Parameters of Plastic-Kinematic model

ρ /(kg·m ⁻³)	μ	E /GPa	σ_y /GPa	E_t /GPa
8 010	0.3	196	1.01	2

内部元件 PCB 板与芯片均使用弹性模型, 模型参数如表 4 所示。包裹引信外壳的橡胶垫使用 Mooney-Rivlin 模型, 模型参数如表 5 所示, 其中, A 和 B 为应变能密度函数常数。

表 4 弹性模型参数

Tab. 4 Parameters of elastic model

元器件	ρ /(kg·m ⁻³)	μ	E /GPa
PCB 板	1 800	0.28	22
芯片	2 300	0.23	160

表 5 Mooney-Rivlin 模型参数

Tab. 5 Parameters of Mooney-Rivlin model

ρ /(kg·m ⁻³)	μ	A /MPa	B /MPa
1 243	0.49	1.38	3.45

2.2 高 g 值加载

为获取刚性弹体过载与应力反射叠加产生的高 g 值冲击载荷信息, 采用数值模拟方法提取弹体质心过载。数值模拟得到的过载信号变化趋势与试验结果^[17]吻合较好, 如图 7 所示, 表明所建立的有限元模型能较好地描述刚性弹体的侵彻响应。

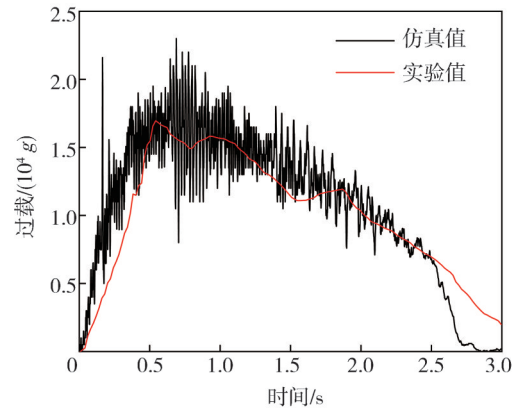


图 7 弹体侵彻过载

Fig. 7 Overload of projectile

Daubechies 小波常用于处理平滑信号, 尤其在需要高频成分精确描述的任务中。使用 db6 小波对过载曲线进行时频分析, 充分展示了小波变换能在不同时刻分析不同频域响应特征的特点^[18], 并且可以较好地过滤高频信号^[19], 因此, 采用 db6 小波基对过载信号进行小波分解。根据采样原理, 对于采样频率为 1 000 kHz 的数据, 信号的最高频率为 500 kHz^[20]。表 6 给出了 1~7 级近似信号和细节信号对应的频带, 其中 a 表示近似信号, d 表示细节信号。

表 6 小波分解信号的频率范围

Tab. 6 Frequency bands of wavelet-decomposed signals

分解层数	近似信号的频率/kHz	细节信号的频率/kHz
1	a1: 0~250.00	d1: 250.00~500.00
2	a2: 0~125.00	d2: 125.00~250.00
3	a3: 0~62.500	d3: 62.500~125.00
4	a4: 0~31.250	d4: 31.250~62.500
5	a5: 0~15.625	d5: 15.625~31.250
6	a6: 0~7.8125	d6: 7.8125~15.625
7	a7: 0~3.9063	d7: 3.9063~7.8125

从图 8 可以看出, 第 7 层的近似信号非常平滑。因此, 第 7 层的近似信号可以看作是刚体过载。原始过载信号 s 可以表示为 $s=a_7+d_1+d_2+d_3+d_4+d_5+d_6+d_7$ 。

将小波分解后的信号重构, 沿 y 轴负方向作用于系统前端节点, 如图 9 所示。a7 记为 A7, a_7+d_i 记为 D_i 。

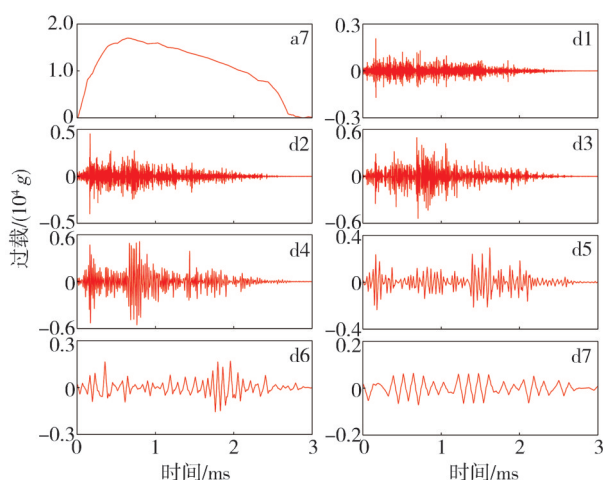


图8 七级分解的信号

Fig. 8 Level-7 wavelet-decomposed signals

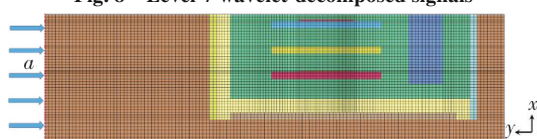


图9 过载信号加载

Fig. 9 Overload signal loading

3 结果分析

3.1 典型工况

以加载信号 a7, CTBN15 灌封的测试装置为例。图 10 为结构等效应力云图,从图中可以看出应力波在仪器外壳上传播很快,在 $60\ \mu\text{s}$ 时就传播到了仪器底部,而其他组件上的应力相对较低,这是由于橡胶垫起到了一定的缓冲效果;随后,应力波通过橡胶垫传递到主体外壳上,但灌封材料内部的应力依然较低,这是由于高分子材料的波阻抗较金属波阻抗小,壳体与灌封体之间波阻抗的失配导致应力产生显著的反射效果,因此,由壳体外部透射进灌封体的应力波强度降低。

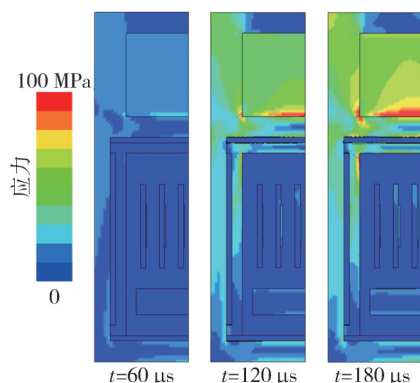


图10 仪器等效应力云图

Fig. 10 Equivalent stress diagram of measurement

图 11 为灌封体等效应力云图,从图中可以看出,应力首先传递到 ch1 和 ch2,向下传播过程中横向扩散至灌封体外周位置,因此,安装在中心位置的 ch1 与 ch2 上的应力较大,而安装在边缘部位的 ch3 上的应力较小。

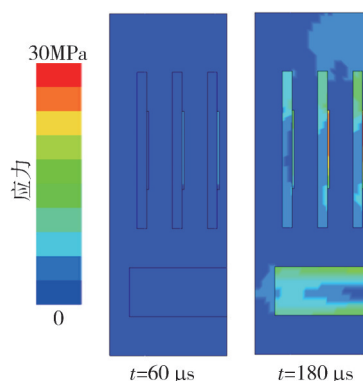
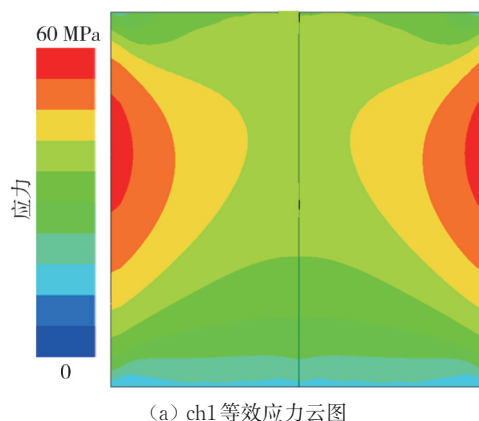


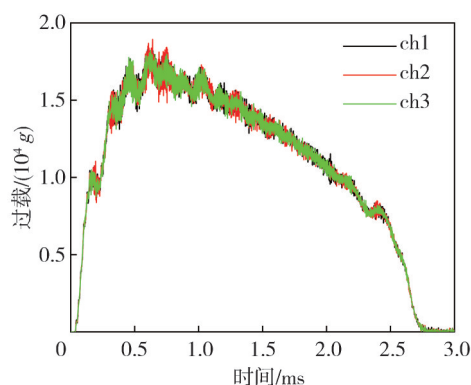
图11 灌封体等效应力云图

Fig. 11 Equivalent stress diagram of encapsulation body

图 12 (a) 为芯片等效应力图。



(a) ch1 等效应力云图



(b) 芯片过载

图12 芯片响应

Fig. 12 Response of chip

从图中可以看出,芯片上的应力从上到下先增大后减小,靠近加载端应力较高。芯片上的应力也从左到右先增大后减小。竖向放置的电路板上应力

集中区靠近冲击端,最高等效应力幅值约为60 MPa。图 12 (b) 为3个芯片的轴向过载,从图中可以看出,3个芯片过载信号的幅值均与加载信号相当,但所包含的高频成分略有不同,这主要是由于不同的安装位置导致其对冲击载荷响应存在一定的区别。

3.2 应力分析

对比不同芯片中心单元的等效应力峰值,如图 13 所示,芯片中心单元等效应力峰值应力随 CTBN 含量的增加而增加,与 CTBN 5 相比,CTBN15 的单元应力峰值增加 1%~6%,CTBN25 的单元应力峰值增大 4%~10%。考虑芯片安装位置的不同,与 ch1 中心单元应力峰值相比, ch2 中心单元的峰值应力降低了 4%~9%, ch3 中心单元应力峰值降低了 52%~56%。

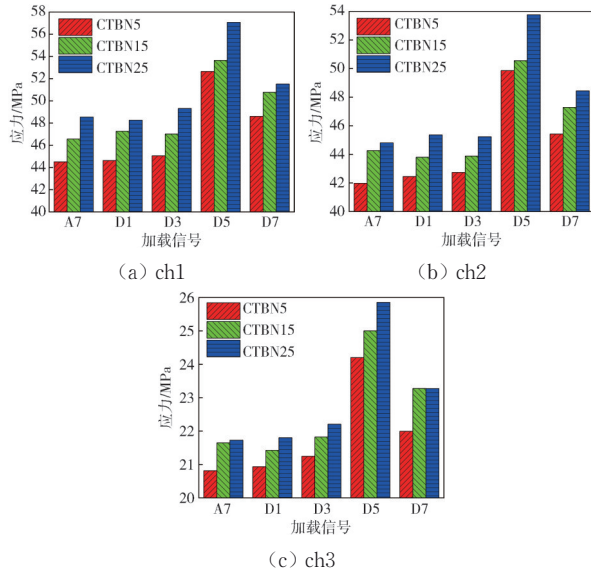


图 13 芯片中心单元等效应力峰值

Fig. 13 Equivalent stress peak values of central elements from different chips

在不同高频叠加基频信号激励下的测试装置,其内部芯片的应力峰值与芯片的位置、灌封材料的力学特性以及激励信号的幅频特性有关。将芯片安装在远离中心的位置和使用强度较高的灌封材料都可以有效降低芯片上的应力幅值。叠加超高频带范围内的细节信号(d1、d2)与高高频带范围内的细节信号(d3)并不会显著增大芯片上的应力峰值,而中高频范围内的细节信号(d4、d5)对应应力峰值的影响最大。

3.3 过载分析

设芯片过载信号的能量为 E , 有

$$E = \sum_{k=1}^m s_k^2, \quad (5)$$

式中: s_k 为信号的采样数据点幅值; m 为信号的采样数据点数。计算芯片过载信号的能量,如图 14 所示,可以看出 ch3 过载信号的能量最低。

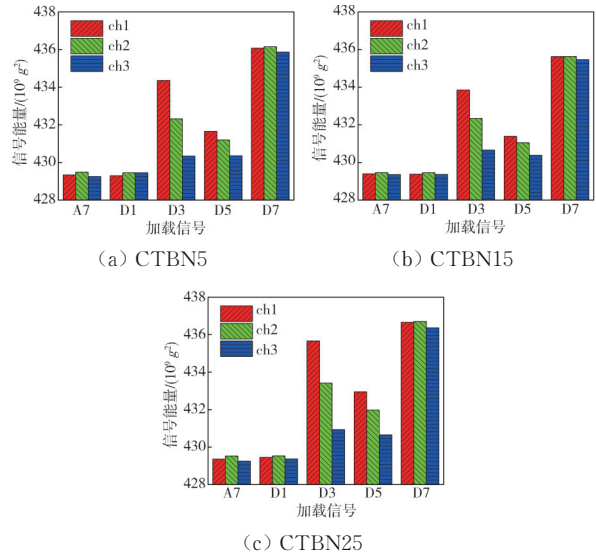


图 14 不同芯片的信号能量

Fig. 14 Signal energy from different chips

设细节信号 d_i 的能量为 $E_{ij,m}$, 其中, j 为芯片编号, m 为 CTBN 含量。研究芯片位置对芯片过载信号的影响时,选取灌封材料为 CTBN15 的工况,以 ch1 过载信号各细节信号的能量为基准,分别计算不同加载条件下, ch2 与 ch3 相对于 ch1 各细节信号能量提升的百分比 $\omega_{in,m}$,

$$\omega_{in,m} = \frac{E_{in,m} - E_{i1,m}}{E_{i1,m}} \times 100\%, n = 2, 3. \quad (6)$$

计算结果如图 15 所示,其中, a7 加载时, $\omega_{12,15}$ 为正值, $\omega_{13,15}$ 为负值,说明当前工况 ch2 的细节信号 d1 的能量大于 ch1, ch3 的细节信号 d1 的能量小于 ch1。从图中可以看出, $\omega_{3,15}$ 整体位于 $\omega_{2,15}$ 下方,因此,认为 ch3 上的过载信号各细节信号的能量低于 ch2。ch3 过载信号的细节信号 d1 能量低于 ch1, 而 ch2 过载信号的细节信号 d1 的能量高于 ch1; ch2 与 ch3 过载信号的细节信号 d2 的能量大部分高于 ch1, 而 d3、d4 和 d5 的能量均低于 ch1, 细节信号 d6 和 d7 的能量大部分低于 ch1, 变化范围低于 5%。因此,通过调整芯片的位置能够显著降低 d3—d5 频带内的能量。

研究 CTBN 含量对芯片过载信号的影响时,选取 ch2 为研究对象,以灌封材料为 CTBN5 时的芯片过载信号各小波的能量为基准,计算灌封材料为

CTBN15和CTBN25时,相对于CTBN5的工况下,芯片过载信号各细节信号能量提升的百分比 $\eta_{ij,t}$ 为

$$\eta_{ij,t} = \frac{E_{ij,t} - E_{ij,5}}{E_{ij,5}} \times 100\%, t = 10, 15. \quad (7)$$

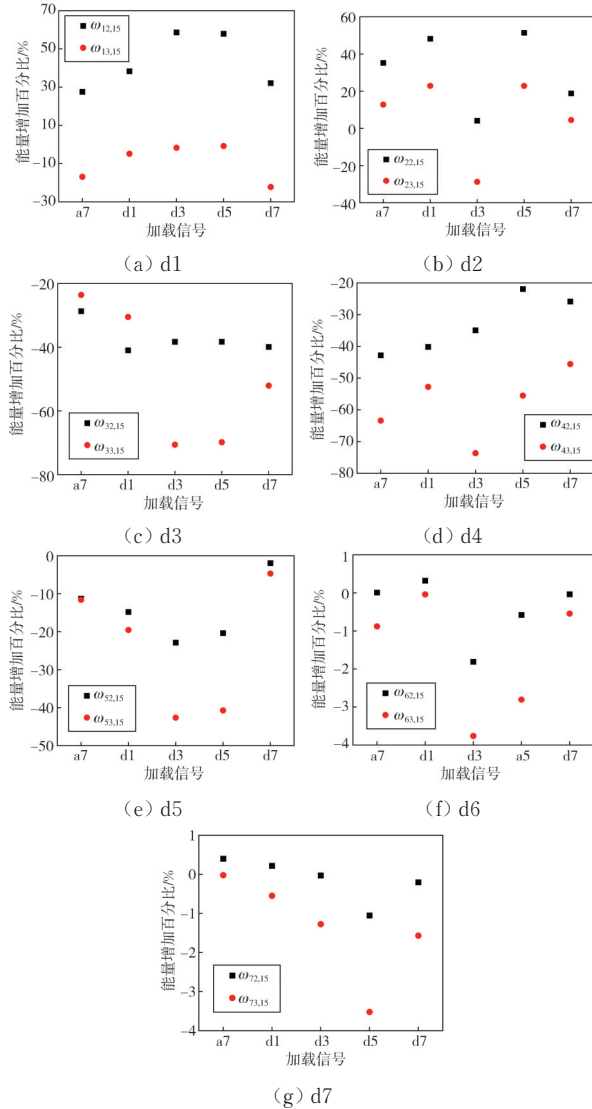


图 15 芯片位置对芯片过载信号的影响

Fig. 15 Influence of chip position on chip overload signal

计算结果如图 16 所示,其中,A7加载时, $\eta_{12,15}$ 和 $\eta_{12,25}$ 均为正值且 $\eta_{12,15}$ 大于 $\eta_{12,25}$,说明当前工况下,灌封材料为CTBN5时,芯片的细节信号d1的能量最低。从图中可以看出,CTBN15和CTBN25工况下,芯片过载信号的细节信号d1、d2和d3的能量大部分高于CTBN5工况下;CTBN15工况下芯片过载信号的细节信号d4和d5的能量均高于CTBN5工况,CTBN25工况下芯片过载信号的细节信号d4和d5小波的能量普遍低于CTBN5工况;对于细节信号d6和d7的能量,3种工况下,没有绝对的高低之分,变化范围在

$\pm 15\%$ 之间。在超高频带与高频带范围内的细节信号(d1、d2、d3),包含较高CTBN含量灌封材料(CTBN15和CTBN25)的测试装置,在不同激励信号作用下的芯片过载信号能量普遍高于CTBN5工况。在中高频带范围内的细节信号(d4-d5),CTBN15的测试装置中芯片的过载信号能量最低。

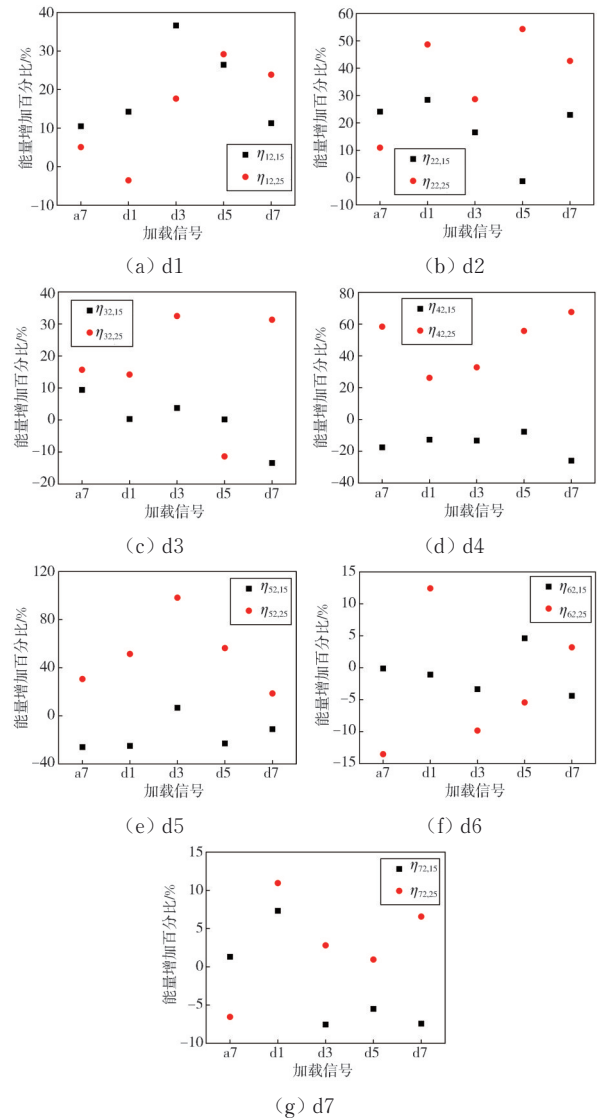


图 16 CTBN含量对芯片过载信号的影响

Fig. 16 Influence of CTBN content on chip overload signal

需要说明的是,当前工作的载荷施加仅基于弹体侵彻半无限厚度混凝土靶板的典型过载曲线,其过载信号的幅频响应特征分析能够对典型高 g 值过载的防护和灌封设计提供参考。当弹体侵彻高强度靶体或多层靶体时,测试仪器所承受的高 g 值载荷特性更为复杂,装置内部应力波和加速度的传递机制分析需要涉及加载信号特征的影响。

4 结 论

本文将数值模拟得到的过载信号进行分解重构并加载到典型测试仪器上,分析了灌封材料中 CTBN 含量、加载条件和内部结构对高 g 冲击的影响。得出以下结论:

1) 在不同高频叠加基频信号激励下的测试装置,其内部芯片的应力峰值与芯片的位置、灌封材料的力学特性以及激励信号的幅频特性有关。将芯片安装在远离中心的位置和使用强度较高的灌封材料都可以有效降低芯片上的应力幅值。

2) 通过改变芯片的安装位置,可以降低大多数细节信号的能量,从而降低芯片过载信号中的能量。

3) 调整灌封材料中 CTBN 的含量可以降低特定频段内细节信号的能量。CTBN 含量为 5% 的灌封材料可有效降低超高频带范围内细节信号的能量,而 CTBN 含量为 15% 的封装材料可有效降低中高频带范围内细节信号的能量。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 常慧珠, 张冬梅, 麻旭东, 等. 弹丸侵彻混凝土目标的热固耦合数值分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 185-193.
CHANG Huizhu, ZHANG Dongmei, MA Xudong, et al. Thermal-solid coupling numerical analysis of projectile penetrating concrete target[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(2): 185-193. (in Chinese)
- [2] 高鹏, 徐鹏. 装药弹体高空跌落冲击动态响应研究[J]. 测试技术学报, 2024, 38(2): 179-186.
GAO Peng, XU Peng. Dynamic response of charged projectile under high drop impact[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(2): 179-186. (in Chinese)
- [3] ZHANG W, CHEN L, XIONG J, et al. Ultra-high g deceleration-time measurement for the penetration into steel target[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(3): 436-447.
- [4] LI Y, FAN Z, HU S, et al. Dynamic enhancement mechanism of energy absorption of multi-cell thin-walled tube[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 178: 109449.
- [5] HU J, XU P, FAN Z, et al. Axial compression response of multi-cell tube reinforced by parallel leaf veins inspired secondary ribs[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 185: 110557.
- [6] 张笑, 谢晋, 曹骏, 等. 微光机电引信芯片光纤抗高过载设计方法[J]. 探测与控制学报, 2024, 46(6): 29-36.
ZHANG Xiao, XIE Jin, CAO Jun, et al. Anti-high-overload design of micro-optical-electro-mechanical fuze chip fiber[J]. Journal of Detection & Control, 2024, 46(6): 29-36. (in Chinese)
- [7] 张志远, 赵彧, 郭长月, 等. 侵彻引信抗高过载复合灌封方法[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(4): 124-129.
ZHANG Zhiyuan, ZHAO Yu, GUO Changyue, et al. Anti-overload composite potting method of penetration fuze[J]. Journal of Detection & Control, 2023, 45(4): 124-129. (in Chinese)
- [8] 汪柯, 郑监, 施长军, 等. 全电子引信抗过载研究现状[J]. 探测与控制学报, 2025, 47(1): 15-23.
WANG Ke, ZHENG Jian, SHI Changjun, et al. Anti-overload research status quo of electronic safety and arm fuze[J]. Journal of Detection & Control, 2025, 47(1): 15-23. (in Chinese)
- [9] 焦敏, 陈小伟, 阮朝阳, 等. 灌封材料对弹载电子器件的防护仿真研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(S2): 51-56.
JIAO Min, CHEN Xiaowei, RUAN Zhaoyang, et al. Numerical analysis on potting protection of electronic components in projectile[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(S2): 51-56. (in Chinese)
- [10] 李正睿, 陈恒, 杨可, 等. 环氧树脂灌封技术在高过载产品防护中的应用[J]. 电子工艺技术, 2020, 41(4): 222-225.
LI Zhengrui, CHEN Heng, YANG Ke, et al. Application of epoxy resin encapsulating technology in protection of high overload products[J]. Electronics Process Technology, 2020, 41(4): 222-225. (in Chinese)
- [11] 吴春波. 环氧树脂不同温度下动态力学行为及本构模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [12] 徐萧, 高世桥, 牛少华, 等. 灌封材料对侵彻过载下弹载器件的防护分析[J]. 兵工学报, 2017, 38(7): 1289-1300.
XU Xiao, GAO Shiqiao, NIU Shaohua, et al. Dynamic analysis of projectile-borne electronic devices under impact loading[J]. Acta Armamentarii, 2017,

- 38(7): 1289-1300. (in Chinese)
- [13] XU X, GAO S, ZHANG D, et al. Mechanical behavior of liquid nitrile rubber-modified epoxy resin: Experiments, constitutive model and application[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 151: 46-60.
- [14] 施雪军, 周兴平, 解孝林. 环氧树脂复合材料的制备及力学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(3): 66-72.
- SHI Xuejun, ZHOU Xingping, XIE Xiaolin. Preparation and mechanical properties of epoxy foam composites [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(3): 66-72. (in Chinese)
- [15] 张天翼, 徐鹏, 赵生伟. 一种高强钢的 Johnson-Cook 本构模型构建与参数标定[J]. 测试技术学报, 2025, 39(6): 662-671.
- ZHANG Tianyi, XU Peng, ZHAO Shengwei. Construction and parameter calibration of Johnson Cook constitutive model for high-strength steel [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(6): 662-671. (in Chinese)
- [16] 王礼立. 冲击载荷下高聚物动态本构关系对粘弹性波传播特性的影响[J]. 宁波大学学报(理工版), 1995, 8(3): 30-57.
- WANG Lili. The influence of dynamic constitutive relations of polymers at impact loading on the viscoelastic wave propagation character[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 1995, 8(3): 30-57. (in Chinese)
- [17] 林圣灵. 弹丸侵彻混凝土靶实验及仿真[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [18] 刘宗宝. 基于弹引系统动态特性的侵彻起爆控制技术[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [19] 李飞胤. 多次短间隔冲击-振动耦合力学试验理论与方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [20] ZHANG D, GAO S, NIU S, et al. Study on collision of threaded connection during impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 106: 133-145.