

# 爆炸分离碳纤维复合板的装药结构设计

赵 康, 王 猛, 何志杰, 夏治园, 马刘博, 胡坤伦

(安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南, 232000)

**摘 要:** 为研究碳纤维复合板爆炸分离过程, 设计 2 种不同的装药结构, 采用 AUTODYN 软件预先进行数值仿真, 通过观测高斯点飞散速度和第四强度理论准则, 判断碳纤维复合板断裂情况, 并对碳纤维复合板破坏机理进行分析。进一步进行实地碳纤维复合板爆炸切断实验, 结果表明断裂效果与仿真计算结果较为一致, 有效证明了采用轴向钻孔的装药结构切断效果更优。

**关键词:** 爆炸分离; 复合材料; 数值模拟; 装药结构

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.01.005

## Structure Design of Carbon Fiber Composite Charge for Explosion Separation

ZHAO Kang, WANG Meng, HE Zhi-jie, XIA Zhi-yuan, MA Liu-bo, HU Kun-lun

(Institute of Chemical Engineering, Anhui University of Technology, Huainan, 232000)

**Abstract:** In order to study the explosion separation process of carbon fiber composite plate, two different charge structures were designed. AUTODYN software was used to carry out numerical simulation in advance. The fracture of carbon fiber composite plate was judged by observing the Gaussian point flying velocity and the fourth strength criterion, and the failure mechanism of carbon fiber composite plate was analyzed. Furthermore, the explosion separation test of carbon fiber composite plate was carried out, the results show that the fracture effect is consistent with the simulation results, which effectively proves that axial drilling charge structure has a better cutting effect.

**Key words:** Explosive separation; Composite material; Numerical simulation; Charge structure

在航天飞行器领域通常使用大量的火工装置来完成一些特定功能, 如部件分离、伸展部件释放和展开等<sup>[1]</sup>。由于军事、科研、航天和工业生产需求的多样化, 航天飞行器材料的种类日趋增多, 其结构形式和材质也随之丰富, 越来越多的航天飞行器材料采用碳纤维复合材料。刘怀亮等<sup>[2]</sup>利用 ANSYS/LS-DYNA 软件设计了一种爆炸切割器并进行计算模拟, 验证其切割机理, 为爆炸切断方法提供了思路; 毛勇健等<sup>[3]</sup>对爆炸分离冲击环境条件进行研究, 对该领域的发展进行了展望与预测; 胡坤伦等<sup>[4]</sup>运用量纲分析确定了

使钛合金板恰好分离的最佳药量, 对定量切割板材提供了构思; Takeuchi 等<sup>[5]</sup>利用简单圆柱壳体建立模型, 对航天器的分离断裂过程进行模拟, 对冲击响应做出了判断; Zhou 等<sup>[6]</sup>通过试验研究了玻璃纤维复合材料的准静态力学特性; Naik 等<sup>[7]</sup>利用霍普金森杆实验研究了高应变率下环氧树脂基碳纤维增强复合材料在材料主方向上断裂的力学性能分析, 并得到了复合材料板厚度和应变率对其力学性能的影响规律。

本文对碳纤维复合板爆炸切断问题进行研究, 设计平面预设导向槽和采用轴向钻孔 2 种装药方式, 采

收稿日期: 2020-10-09

作者简介: 赵康 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事爆炸方向计算研究。

用 AUTODYN 数值仿真与现场实验相结合的研究方法，探究了爆炸分离碳纤维复合板的最佳装药结构。

### 1 数值模拟

为充分了解复合板爆炸分离机理，结合理论计算以及数值仿真的方法加以分析。由于板材在模拟仿真时会发生大变形，易导致计算失真，而 AUTODYN 中的 SPH (Smoothed Partide Hydrodynamics) 方法由于不存在网格，因此计算过程中不会出现网格畸变<sup>[8]</sup>，可以运用于爆炸分离数值模拟。

#### 1.1 方案设计

实验中所选取的碳纤维复合板尺寸为：120mm × 120mm × 15mm。设计 2 种不同的装药结构进行爆炸切断实验，模型几何尺寸如表 1 和图 1 所示。

表 1 模型几何参数

Tab.1 Model geometric parameters

方案	装药结构	装药孔/mm	导向槽/mm
1	预设导向槽	2 个， 10, h=15	2 个，15 × 2 × 15 1 个，25 × 2 × 15
2	轴向钻孔	1 个， 6, h=120	

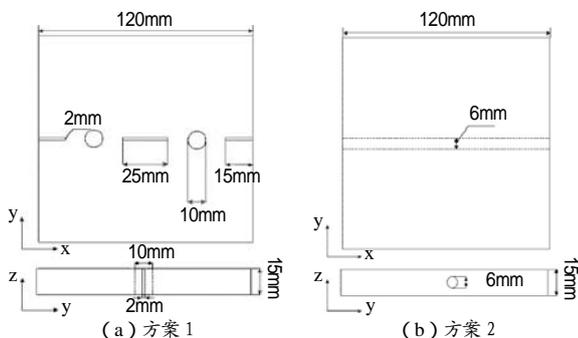


图 1 模型外形设计  
Fig.1 Model shape designs

#### 1.2 计算模型

方案 1 中，在模型上表面沿中心线，从中部导向槽到右侧装药孔之间每隔 4mm 设置 1 个高斯点，右侧装药孔到右侧导向槽之间每隔 5mm 设置 1 个高斯点，同时在高斯点 7 沿 z 轴负方向再每隔 7mm 设置 1 个高斯点，总计 9 个高斯点，如图 2 (a) 所示。方案 2 中，在模型上表面沿中心线每隔 20mm 设置 1 个高斯点，同时在模型中部 z 方向装药上端等距设置 3 个高斯点，总计 9 个高斯点，如图 2 (b) 所示。2 种模型都采用中心点 (POINT) 起爆方式。

选用黑索今作为实验用炸药，材料模型选用 JWL

状态方程<sup>[9]</sup>，碳纤维复合板选用正交各向异性本构模型 (Ortho 本构模型) Orthotropic Yield 强度模型和 Orthotropic Softening 失效模型，黑索今和碳纤维材料性能参数如表 2 ~ 3 所示。

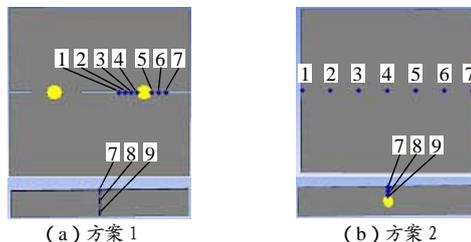


图 2 高斯点布置情况  
Fig.2 Numerical simulation results of two schemes

表 2 黑索今炸药 JWL 状态方程参数

Tab.2 JWL equation of state parameters for RDX explosive

密度 /(g · cm <sup>-3</sup> )	A /GPa	B /GPa	R <sub>1</sub>	内能 密度 /(kJ · cm <sup>-3</sup> )	R <sub>2</sub>	爆速 /(m · s <sup>-1</sup> )	爆 压 /GPa
1.0	444.5	8.14	4.6	3.9	1.4 0.4	5 480	7.51

表 3 碳纤维复合板性能参数

Tab.3 Performance parameters of carbon fiber composite plates

杨氏模量/GPa			剪切模量/GPa			泊松比		
E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	ν <sub>1</sub>	ν <sub>2</sub>	ν <sub>3</sub>
61.66	58.18	9.43	3.65	3.22	4.19	0.065	0.451	0.543
拉伸强度/MPa			密度/(g · cm <sup>-3</sup> )			剪切强度/MPa		
X <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub>	Z <sub>1</sub>	1.92			S <sub>xy</sub>	S <sub>xz</sub>	S <sub>yz</sub>
648.5	509.7	92.4				62.7	61.8	49.5

## 2 仿真试验结果分析

#### 2.1 仿真结果

2 种装药结构的仿真结果如图 3 所示，由图 3 (a) 可以看出 1 号板上爆炸效应主要集中在装药孔附近，伴随着大量“粒子”飞散，模型发生较大变形，但并未完全分离。而由图 3 (b) 可以明显看出 2 号板完全发生分离，说明方案 2 装药结构能够用于爆炸分离碳纤维复合板。

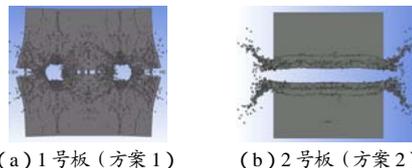


图 3 2 种方案数值仿真结果  
Fig.3 Numerical simulation results of two schemes

#### 2.2 板材关键点速度分析

首先，分析板材上高斯点的速度变化趋势，选取方案 1 中 1 号高斯点并提取其 3 个方向速度，如图 4 所示，仿真开始时速度值一直处于变化状态，分析是由于在爆炸开始时整个板材在爆炸能量的驱动下处

于运动状态,该高斯点速度也发生了变化,但由于板材的物质约束作用,该点最终还是“依附”在板材上,在爆炸结束后速度稳定下来趋于零值。由于模型建立过程中未设置空气域,计算过程在完全真空条件下进行,故高斯点附近板材若发生分离,则最终必将以一恒定速度持续向外部飞散;反之,若高斯点速度在最终速度趋于零,则表示该高斯点附近板材并未发生分离现象,由此判断1号高斯点处板材并未发生断裂。进一步提取其他高斯点速度变化曲线,发现高斯点2、7、8、9各方向速度也最终趋于零,而3、4、5、6各方向速度最终都趋于一稳定值,说明1号板材断裂只发生在部分位置。

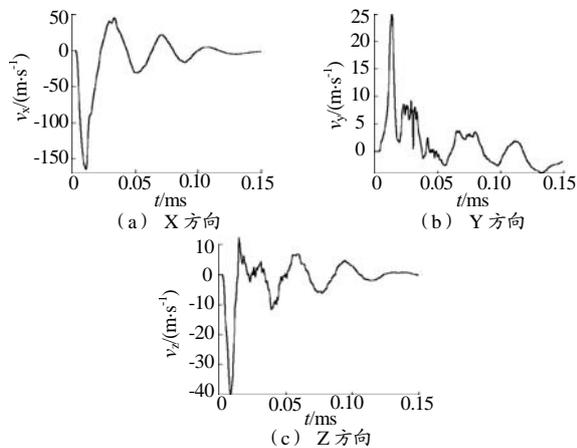


图4 1号高斯点各向速度——时程曲线

Fig.4 Velocity—time curve of Gaussian point 1

图5为方案2中7号高斯点3个方向速度,从图5中可以看出该高斯点各方向速度最终都趋于一稳定值,其中 $v_x$ 为6.88m/s, $v_y$ 为139.76m/s, $v_z$ 为386.51m/s,则7号点的稳定合速度为411.06m/s,这说明该点在最后处于“逃逸”状态,表明了7号高斯点处板材发生了分离。同时由于7号高斯点位于复合板表面以及厚度方向交点,处于板材最边缘位置,此处发生断裂也就说明了整个模型发生了分离。

### 2.3 板材关键点 Mises 应力分析

炸药在起爆的瞬间会产生强烈的冲击波,冲击波遇到复合板发生反射并产生稀疏波,复合板会在冲击波的反射拉伸作用下发生断裂。参照第四强度理论<sup>[10]</sup>,提取高斯点的峰值 Mises 应力计算结果,根据 Mises 破坏准则判断高斯点附近区域是否发生断裂。

计算得到复合板 Mises 等效应力 $\sigma_s=530.9\text{MPa}$ ,依据第四强度理论,当高斯点的峰值 Mises 应力值

$\sigma > \sigma_s$ 时,则此测点附近板材发生断裂。各高斯点爆炸时产生的峰值 Mises 应力值如图6所示。

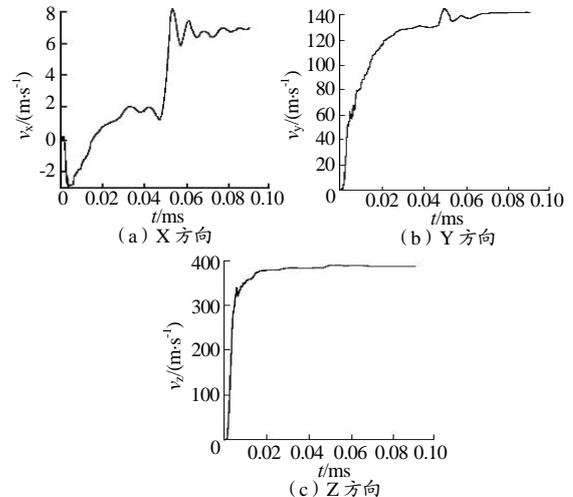


图5 7号高斯点各向速度——时程曲线

Fig.5 Velocity—time curve of Gaussian point 7

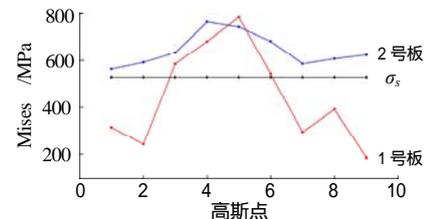


图6 各高斯点爆炸产生的峰值 Mises 应力值

Fig.6 Peak Mises stress values of each Gaussian point explosion

由图6可以看出,方案1(1号板)模型的最大 Mises 应力值在5号高斯点, $\sigma_{\max}=784.9\text{MPa}$ ,最小 Mises 应力值在9号高斯点, $\sigma_{\min}=186.8\text{MPa}$ 。方案2(2号板)模型最大 Mises 应力值在4号高斯点, $\sigma_{\max}=743.7\text{MPa}$ ,最小 Mises 应力值在1号高斯点, $\sigma_{\min}=563.8\text{MPa}$ 。

1号板上高斯点3、4、5、6处 $\sigma$ 均大于 $\sigma_s$ ,其他高斯点全小于 $\sigma_s$ 。根据 Mises 破坏准则,可以确定炸药发生爆炸后,板材并未完全断裂。板材之所以未沿导向槽方向完全发生断裂,其原因是炸药发生爆炸产生冲击波是以球面波的形式向外扩张,在遇到自由面时又反射回稀疏波,板材在反射拉伸作用下产生破坏效应,并由于爆炸冲击效应的瞬时性,板材厚度方向几何尺寸较小,大量爆炸能量易沿厚度方向逸出,削弱了爆炸切断效果。

2号板上高斯点的 $\sigma$ 先增加后减小且都大于 $\sigma_s$ ,各高斯点处均发生断裂。由于方案2中装药孔深度远大于方案1中装药孔深度,具有较好的能量约束作用,所以冲击波能在2号板中稳定传播,爆炸能量集中作

用于复合板，无过多能量耗散，最终约在 0.05ms 时碳纤维复合板产生破坏，板材开始断裂。

### 3 复合板分离试验

#### 3.1 试验设计

对碳纤维复合板 2 种装药结构爆炸切断过程进行试验探究，在 1 号板材 2 个孔内装入等量的黑索今粉末，均为 1.1g，将雷管正对主装药区，确保炸药稳定爆炸。在 2 号板材内装入 2.2g 钝化黑索今，采用导爆索引爆，用黑胶带固定连接处，如图 7 所示。

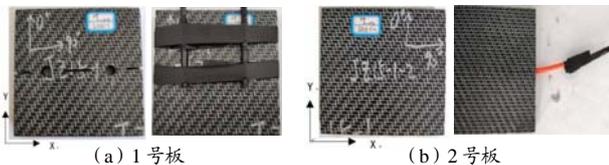


图 7 试验板材装药结构

Fig.7 Test sheet charge structure

#### 3.2 试验结果

根据仿真方案设计试验，将不同装药结构的碳纤维复合板放置在爆炸碉堡内进行爆炸切断，试验结果如图 8 所示。



图 8 试验结果

Fig.8 Experimental results

由图 8 可知，2 号复合板由中部完全断开，同时爆炸后分离的两部分相距很近，约 1m，基本达到了使板材完整分离的目的。1 号复合板爆炸切断效果较差，板材并未明显发生断裂，爆炸效应只作用在两装药孔附近，周围有少量碳纤维掉落。试验与仿真计算结果较为一致。

### 4 结论

本文设计了在复合板进行预开导向槽和轴向钻孔 2 种装药方式，探讨了 2 种装药结构是否可以成功分离复合板，得到结论如下：(1) 通过分析高斯点的飞散速度，发现在仿真时间结束后，预开导向槽模型

中部分高斯点的最终稳定速度趋于零值，而轴向钻孔模型中所有高斯点最终稳定速度都趋于一稳定值，说明预开导向槽复合板断裂只发生部分区域，轴向钻孔复合板完全断裂。(2) 通过观察高斯点处的 Mises 峰值应力，发现预开导向槽方案中高斯点的 Mises 峰值应力只有部分超过复合板屈服极限，断裂也只发生在部分区域，而轴向钻孔方案中所有高斯点的 Mises 峰值应力均超过复合板屈服极限，板材整体发生断裂。

(3) 通过数值仿真与实地试验对比发现，采用轴向钻孔装药结构爆炸分离碳纤维复合板更加有效，实际爆炸切断作业中建议采用轴向钻孔装药结构。

#### 参考文献：

- [1] Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis[J]. Astron J, 1977, 88(10): 1 013-1 024.
- [2] 刘怀亮, 崔德林, 阎绍泽. 航天器中爆炸切割器的爆炸断裂及冲击响应分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(18): 177-182.
- [3] 毛勇建, 李玉龙. 爆炸分离冲击环境的模拟试验技术进展[J]. 导弹与航天运载技术, 2007(04): 37-44.
- [4] 胡坤伦, 等. 爆炸分离钛合金板的研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(13): 21-25.
- [5] Takeuchi S, Onoda J. Estimation of separation shock of the marman clamp system by using a simple band-mass model[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2002, 45(147): 53-60 .
- [6] Zhou G, Davies G A O. Characterization of thick glass woven roving/polyester laminates: 1. Tension, compression and shear[J]. Composites, 1995, 26(8): 579-586 .
- [7] Naik N K, Kavala V R. High strain rate behavior of woven fabric composites under compressive loading[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 474(1-2): 301-311 .
- [8] 孙晓艳, 王军. SPH 方法的理论及应用[J]. 水利水电技术, 2007, 38(3): 44-46 .
- [9] 门建兵, 蒋建伟, 王树有. 爆炸冲击数值模拟技术基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
- [10] 李同林. 弹塑性力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2016.