

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.03.008

轴向打孔装药爆炸切断 TC4 钛合金板的研究^{*}

朱 宇 王 猛 何志杰 赵 康 秦 雨 陈 刚
安徽理工大学化工学院(安徽淮南,232000)

[摘 要] 为了探究爆炸切断 TC4 钛合金板的最佳方式,设计了轴向单孔和轴向双孔两种装药结构。采用 AUTODYN 软件进行了数值模拟,并结合试验分别对单孔装药和双孔装药优劣性以及装药孔径对爆炸切断效果的影响进行了对比分析。通过计算装药量及运用 Mises 屈服准则,判断了两种装药结构下 4 组试验方案中 TC4 钛合金板的切断及损伤情况,且结合测点振速与加速度变化情况说明了应力波在板内的传播规律。结果表明:爆炸切断能力会随着装药直径的增大而增强,且钛合金板的损伤也随之增大;相较于单孔装药,双孔装药更适用于爆炸切断 TC4 钛合金板。

[关键词] TC4 钛合金板;爆炸切断;装药结构;数值模拟

[分类号] TQ560; TG48

Study on Explosive Cutting of TC4 Titanium Alloy Plate by Axial Drilling Charge

ZHU Yu, WANG meng, HE Zhijie, ZHAO Kang, QIN Yu, CHEN Gang
School of Chemical Engineering, Anhui University of Technology (Anhui Huainan, 232000)

[ABSTRACT] In order to explore the best way of explosive cutting of titanium alloy plate, two charge structures of axial single hole and axial double holes were designed. Numerical simulation was carried out by using AUTODYN software. Combined with the test, advantages and disadvantages of single-hole charge and double-hole charge, and the influence of charge aperture on the explosion cutting effect were compared and analyzed. By calculating the charge amount and using Mises yield criterion, the cutting off and damage of TC4 titanium alloy plate in four test groups under the two charge structures were determined, and the propagation rules of the stress wave in the plate were explained in combination with the variation of vibration velocity and accelerated velocity at the monitoring points. The results show that the explosion cutting capability will increase with the increase of charge aperture, and the damage of titanium alloy plate will also increase. Compared with single-hole charge, double-hole charge is more suitable for explosive cutting of titanium alloy plate.

[KEYWORDS] TC4 titanium alloy plate; explosion cut-off; charge structure; numerical simulation

引言

伴随着航空发动机技术水平的不断提升,叶片旋转速度进一步加快。由于涡轮扇叶受到离心作用、热负荷及振动载荷等多重因素影响,容易在运行过程中失效,进而发生航空发动机不包容事故;处于高速、高能状态下的碎片极其可能击穿机匣,导致机毁人亡的重大灾难。因而,研究航空发动机机匣的包容性具有重大意义。

包容性试验可验证机匣是否能够承受高速飞溅的碎片^[1],要求钛合金叶片在特定方位及特定转速

时发生断裂,并且不会产生超高速破片,通常采取爆炸分离的方法。目前,对爆炸分离的研究主要集中于尖端领域的火工分离装置及航空发动机叶片分离。武新峰等^[2]运用 ANSYS/LS-DYNA 创建了一种卫星火箭连接结构的计算方式,并通过试验验证了包带的相关参数会对星箭分离过程产生巨大影响。胡坤伦等^[3]采用量纲分析法,结合几何相似率,经过数值模拟和试验对比,得到了钛合金板的最小壁厚、装药直径和缓冲层厚度之间的最佳比例关系。Takeuchi 等^[4]通过模拟航天器断裂分离的过程,判断了相应的冲击响应。Ramesh 等^[5]利用 ANSYS 对不同材料的发动机进风扇叶片的变形特性进行了研

^{*} 收稿日期:2021-10-21
第一作者:朱宇(1998 -),男,硕士研究生,研究方向为计算爆炸力学和爆炸数值仿真模拟。E-mail:1156811004@qq.com
通信作者:王猛(1974 -),男,博士,教授,研究方向为爆炸作用及其后效应、计算爆炸。E-mail:3241193736@qq.com

究。Barlow 等^[6]进行了飞机发动机风扇叶片附件中的疲劳裂纹传播模拟。何志杰等^[7]采用 AUTODYN 软件探究了无约束状态下和两种不同材料约束下导爆索爆炸分离复材板的情况。

对于 TC4 钛合金板的爆炸分离问题,多数情况下选取聚能切割法。聚能装药工艺结构复杂,操作难度系数较高,且装药量大。故参考工程爆破中分散布药的方法,设计了沿轴向打单孔和双孔两种新式装药结构,运用 AUTODYN 仿真软件中的 SPH 算法对 TC4 钛合金板的断裂过程进行数值仿真,并结合试验结果比较两种装药结构的优劣。

1 数值模拟

考虑到钛合金板在爆炸分离时会出现极大的变形和大量飞散的碎片,选用 AUTODYN 中一种无网格的 SPH 计算方法^[8-9]来确保计算过程的稳定性。

1.1 算法介绍

SPH 算法中,光滑长度 h 是每个粒子参加运算时确定与其发生关系的邻域空间步长,决定着计算精度和计算效率。 h 取值过小,不能对质点提供足够的作用力,从而降低计算精度; h 取值过大,则质点的详细特征和局部性质可能会被消除,同样会降低精度。为使 SPH 方法精确可靠,Benz 等提出了光滑长度 h 与密度 ρ 相关的指数形式^[10]:

$$h = h_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{\frac{1}{d}}.$$

(1)

式中: h_0 和 ρ_0 为初始光滑长度和初始密度; d 为空间维数。

基于 SPH 的离散化流体动力学方程有^[11]:
质量守恒方程

$$\rho_i = \frac{\sum_{j=1}^N m_j W_{ij}}{\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij}};$$

(2)

动量守恒方程

$$\frac{Dv_i^\alpha}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta};$$

(3)

能量守恒方程

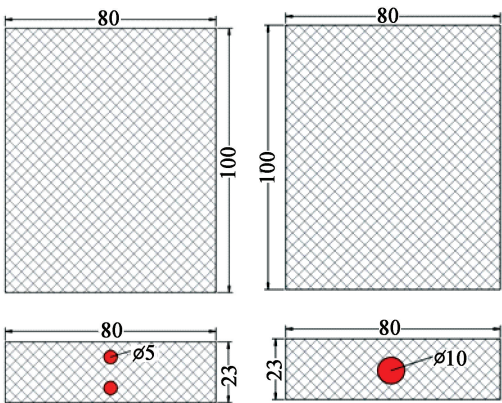
$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \frac{p_i + p_j}{\rho_i \rho_j} v_{ij}^\beta \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{\mu_i}{2\rho_i} \varepsilon_i^{\alpha\beta} \varepsilon_j^{\alpha\beta}.$$

(4)

式中: v 为速度; e 为热能; σ 为应力张量; p 为压力; m 为质量; ρ 为密度; μ 为动力黏滞系数; ε 为动剪应变率; N 为质点总数; x 为坐标轴符号; α, β 代表不同坐标轴; i 为计算质点记号; j 为邻近质点记号; W 为核函数。

1.2 方案设计

TC4 钛合金板尺寸为 100 mm × 80 mm × 23 mm。拟采用轴向双孔(方案 I)和轴向单孔(方案 II)两种装药方式进行切断,模型如图 1 所示。单孔方案中,炮孔直径为 10 mm;双孔方案中,取 1/2 板材的几何中心作为炮孔圆心,每个炮孔直径为 5 mm。药柱长度均为 100 mm。根据数值模拟的结果择优选择方案,对炮孔直径进行调整。



(a) 方案 I(双孔) (b) 方案 II(单孔)
图 1 模型几何尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Model geometry (Unit: mm)

1.3 仿真模型

炸药为钝化的 RDX,采用 JWL 状态方程^[10,12]。

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}.$$

(5)

式中: p 是爆轰产物的压力; E 为单位体积热力学能; V 为相对体积; A, B, R_1, R_2, ω 为常数。

钝化 RDX 的 JWL 状态方程参数见表 1。

TC4 钛合金板采用大应变率的 Johnson-Cook 模型来更新偏应力。忽略温度的影响,由于材料静水压力远大于屈服应力,固体材料表现出可压缩流体

表 1 钝化 RDX 的 JWL 状态方程参数

Tab. 1 Parameters of JWL state equation of passivated RDX

$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$A/$ GPa	$B/$ GPa	R_1	R_2	ω	$v/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$E/$ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	$p/$ GPa
1.6	573	14.6	4.6	1.4	0.32	7 910	8.6×10^6	26.5

表 2 TC4 钛合金板的材料参数^[13]
Tab. 2 Material parameters of TC4 titanium alloy plate

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Gruneisen 系数	C_g / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	S_1	参考温度 T/K	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	剪切模量/ GPa	屈服应力/ GPa
4.428	1.23	5 130	1.028	1 878	560	41.9	1.092

的特性,所以需采用 Mie-Gruneisen 状态方程来求解压力项。TC4 钛合金板的材料参数如表 2 所示。表 2 中, C_g 为材料有关的系数; S 为常数。

采用 AUTODYN 软件建立有限元模型。两种方案中,水平方向均为 X 轴方向,竖直方向均为 Z 轴方向,粒子间距均设为 0.5 mm。单孔方案中,TC4 钛合金板和炸药共有 1 472 000 个粒子;双孔方案中,共有 1 440 000 个粒子。药柱中心设为起爆点,并沿钛合金板表面 Y 轴中轴线上每隔 25 mm 设置 1 个测点,用于了解钛合金板的性能变化情况,计算模型如图 2 所示。

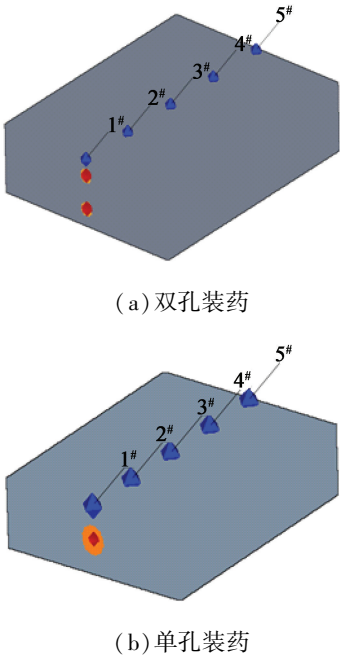


图 2 计算模型及测点
Fig. 2 Calculation models and measuring points

2 计算结果与分析

2.1 计算结果

两种切断方案的计算结果如图 3 所示。由图 3 (b)可以直观地看出,钛合金板仅在靠近起爆点附近产生的爆炸效应明显,板材隆起较高,粒子飞散严重,远离起爆点一端的材料有被拉开的现象。而图 3(a)中可以清楚地观察到,钛合金板接近于恰好切断,形状规整。

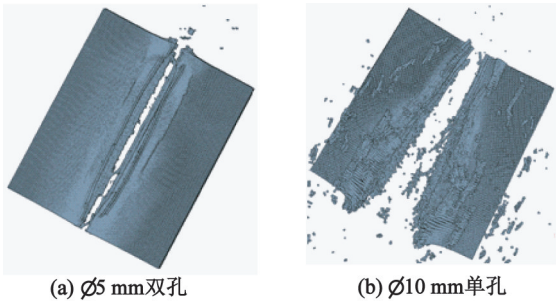


图 3 方案 I 和方案 II 的模型计算结果
Fig. 3 Calculation results of Scheme I and Scheme II

为了进一步探究装药直径对爆炸切断结果的影响,对装药直径进行细微的调整。增加两组模拟方案,设为方案 III 和方案 IV,装药直径分别为双孔 $\varnothing 4$ mm 和单孔 $\varnothing 8$ mm,其余参数不变。模型计算结果见图 4。从图 4(a)看出,方案 III 中,TC4 钛合金板仅在中轴线上略微突起,并未断开;而图 4(b)中,TC4 钛合金板已经完全被切断,并产生大量飞散的破片,板材损伤严重。结合 4 种方案计算结果可知,双孔装药的方式更加适用于钛合金板的爆炸切断。

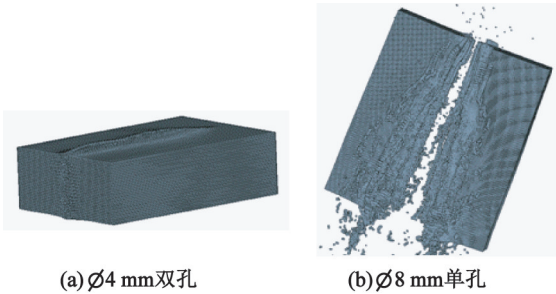


图 4 方案 III 和方案 IV 的模型计算结果
Fig. 4 Calculation results of Scheme III and Scheme IV

2.2 装药参数分析

表 3 是 4 组仿真的装药参数及模拟结果。装药直径的大小直接影响了装药量的多少,从而影响爆炸切断的能力。从表 3 中能够看出,将单孔装药直径减小一半并分成两个孔进行装药,不仅可以减少药量、节约成本,还达到了更好的爆炸切断效果。

测量分离成两块钛合金板两侧断裂纹路的最大间距来判断板材受损情况。图 5 为 I、II、IV 3 种方案计算测得的 3 组最大间距对比。由图 5 可以看出,采用单孔装药结构时,随着装药直径的增加,板

表 3 模型装药参数及模拟结果
Tab.3 Charge parameters and simulation results of models

方案	装药结构	装药直径/mm	总装药量/g	模拟结果
I	双孔	5	6.283	板材几乎恰好切断,裂纹整齐,板材损伤较小
II	单孔	10	12.566	板材被完全切断,碎片飞溅严重,板材损伤过大
III	双孔	4	4.021	板材未被切断,沿药柱方向产生隆起,起爆端出现些许裂纹
IV	单孔	8	8.038	板材被完全切断,接近起爆端损伤较大

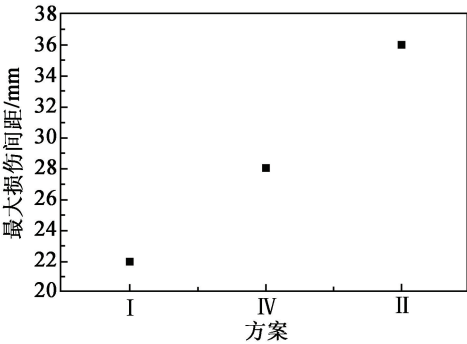


图 5 不同方案得到的最大损伤间距

Fig.5 Maximum damage spacing obtained by different schemes

材间最大损伤间距几乎呈线性增长。也就是说,板材受损情况受孔径大小影响,装药直径越大,钛合金板受损越严重。相对于单孔装药来说,双孔装药对板材造成的损伤更小,且效果更好。

2.3 Mises 应力分析

Mises 屈服准则^[14]认为,材料产生屈服是由于畸变能密度引起的。炸药爆轰时会产生剧烈的冲击压缩波。当压缩波传到钛合金板表面时,钛合金板受到冲击压缩,随即发生反射,并产生稀疏波。在反射冲击波的作用下,钛合金板发生拉伸断裂。观

察各测点的 Mises 应力,并结合 Mises 屈服准则来推断材料是否发生断裂。

Mises 屈服准则应力分量与等效应力表达式^[15]:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2.$$

(6)

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别表示 X、Y、Z 方向的主应力; σ_s 表示等效应力。

分别取 4 组方案模型的测点 1[#]、3[#]和 5[#],观察各方向的应力和 Mises 应力峰值,并根据式(6)计算其等效应力,如表 4 所示。参照 Mises 失效理论,当 Mises 应力 $\sigma > \sigma_s$ 时,测点附近的材料发生屈服。选取方案 I 和方案 III 中测点 1[#]~5[#]绘制 Mises 应力和等效应力关系图,如图 6 所示。

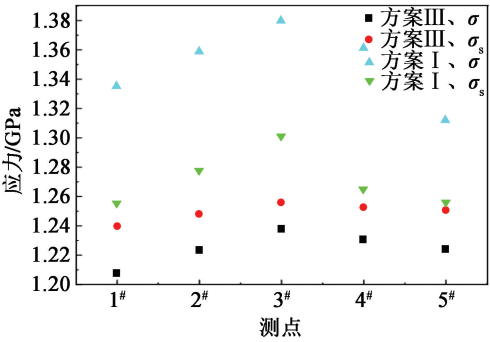


图 6 各测点 Mises 应力和等效应力的关系

Fig.6 Relationship between Mises stress and equivalent stress at each measuring point

结合表 4 和图 6 可以明显看出:方案 I、II、IV 中各测点的 Mises 应力先增大后减小,呈二次函数分布。并且方案 I、II、IV 的 Mises 应力均大于其等效应力;而方案 III 的结果恰好相反。根据 Mises 失效理论可以初步推断,采用 $\varnothing 4$ mm 双孔装药方案未能使钛合金板产生断裂。分析原因,是由于 4 mm 孔径的装药量较小,炸药爆轰时会因材料自身和外界等因素造成能量的耗散,剩余能量不足以破坏板材,而其余 3 种方案均可用来切断钛合金板。

表 4 各方案模型的测点处应力
Tab.4 Stress at the measuring points of each model

参数	方案 I			方案 II			方案 III			方案 IV		
	1 [#]	3 [#]	5 [#]	1 [#]	3 [#]	5 [#]	1 [#]	3 [#]	5 [#]	1 [#]	3 [#]	5 [#]
σ_1	2.452	2.990	2.747	2.542	4.830	2.907	2.415	2.874	2.631	2.457	4.591	2.826
σ_2	1.228	1.621	1.396	1.308	3.421	1.503	1.191	1.587	1.274	1.240	3.224	1.431
σ_3	1.170	1.769	1.618	1.207	3.659	1.814	1.159	1.651	1.523	1.178	3.587	1.726
Mises 应力	1.335	1.380	1.312	1.386	1.399	1.387	1.208	1.238	1.224	1.375	1.388	1.372
σ_s	1.255	1.301	1.256	1.287	1.306	1.277	1.240	1.256	1.251	1.265	1.304	1.264

2.4 速度与加速度分析

图 7 为分别采用 $\varnothing 5\text{ mm}$ 和 $\varnothing 4\text{ mm}$ 双孔装药方式时测点 5# 的速度变化曲线。如图 7(a) 所示,炸药爆炸瞬间,钛合金板受冲击压缩,测点 5# 的速度瞬间增加至 $1\,485\text{ m/s}$;当冲击波传播到钛合金板的表面后,会反射一稀疏波,钛合金板继续膨胀,测点 5# 的速度迅速增加至 $1\,883\text{ m/s}$ 。由于受到附近物质质点的约束,测点速度下降至 $1\,600\text{ m/s}$,此时又在高温、高压爆轰气体的作用下,测点 5# 的速度再次增长。但是,爆轰气体的膨胀相对于冲击波的传播是一个相对缓慢的过程,因此,速度增长相对缓慢。从图 7(b) 中可以看出,测点 5# 的速度瞬间达到最大值;随后,在前、后反射稀疏波和压缩波的相互作用下,速度一直上下波动;因波在传播过程中不断衰减,且同时受到附近的物质质点的约束作用,故而速度在零点附近振荡,最后逐渐趋近于 0。由此,可以判断出测点 5# 处并未发生断裂。

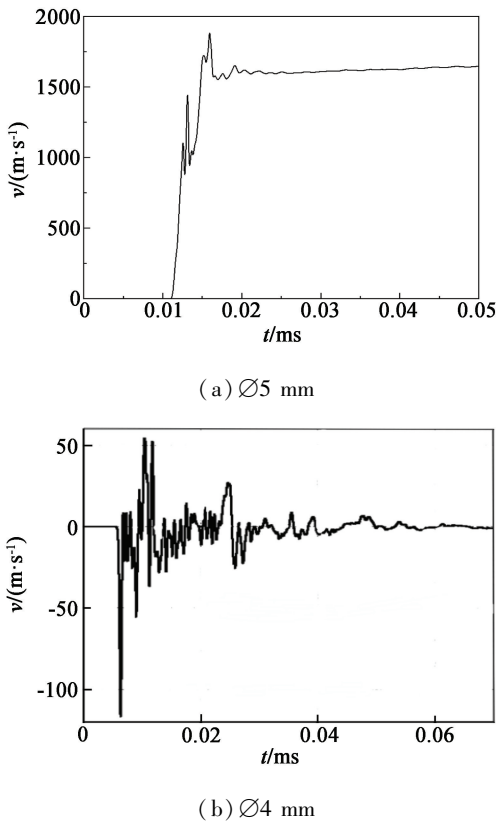


图 7 双孔装药结构测点 5# 的速度变化

Fig. 7 Velocity variation of measuring point 5# in double-hole charge structure

图 8 给出了采用 $\varnothing 5\text{ mm}$ 双孔装药结构下各测点加速度 a 的变化情况。从图 8 中能够得知:测点 1# ~ 2# 前期在爆炸冲击作用下,加速度产生剧烈振荡,并在短时间内发生衰减,进入低频振荡阶段;测点 3# 的加速度前、中、后期均出现反复振荡,这是由

于应力波在板材内向前传播,与前时刻的反射稀疏波交汇,在应力波的来回反射下造成反复波动;在测点 4# ~ 5# 形成的反射拉伸波沿各自相反方向传播,并对板材造成拉伸效应。

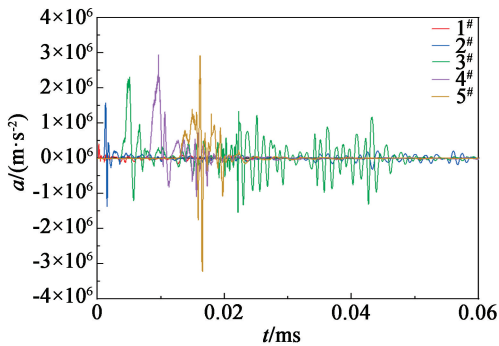


图 8 $\varnothing 5\text{ mm}$ 双孔装药结构各测点的加速度变化情况

Fig. 8 Accelerated velocity variation of each measuring point in $\varnothing 5\text{ mm}$ double-hole charge structure

3 钛合金板切断试验

3.1 试验设计

依据表 3 中的仿真方案设计 4 组对应的试验,打孔如图 9 所示。

单孔和双孔装药结构均将一端开孔处用绝缘胶带密封,从另一端采用钝化 RDX 进行装填。剪取适当长度的导爆索,安放在未密封端的端口,一个孔安放一根导爆索,并将导爆索的末端与一根导爆管雷管用胶带捆绑连接。为了确保起爆以及传爆的稳定性,必须使导爆索的弯折程度小于 90° ,且保证导爆索与填装的钝化 RDX 紧密接触。具体连接方式如图 10 所示。

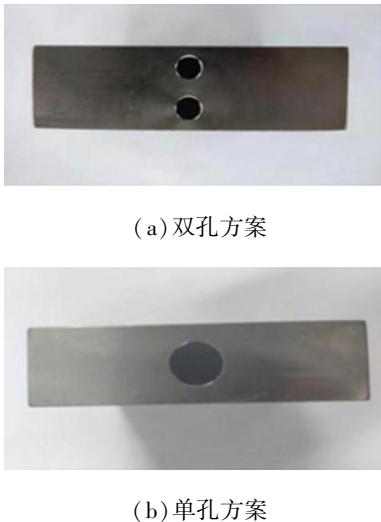
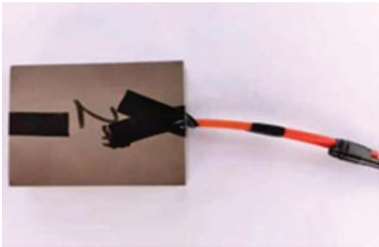


图 9 两种装药试验方案

Fig. 9 Two charging test schemes



(a) 双孔方案



(b) 单孔方案

图 10 两种起爆连接方式

Fig. 10 Two initiation connection modes

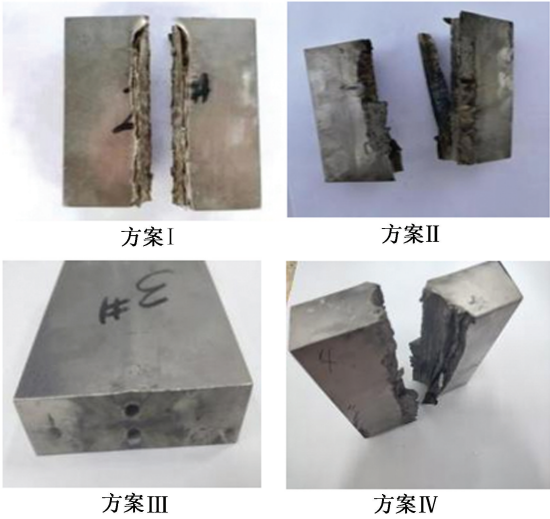


图 11 4 组板材试验结果

Fig. 11 Test results of four groups of plates

3.2 试验结果及分析

收集 4 组板材的试验结果进行对比,如图 11 所示。从板材试验切断效果可以看出,采取 $\varnothing 10\text{ mm}$ 单孔装药的 II 号板和 $\varnothing 8\text{ mm}$ 单孔装药的 IV 号板均被完全切断,板材受损严重,板材断裂处裂纹形状不规则; $\varnothing 5\text{ mm}$ 双孔的 I 号板断裂纹路清晰整齐,板材受损较小;仅采用 $\varnothing 4\text{ mm}$ 双孔装药的 III 号板未被切断。II 号板和 IV 号板由于装药量较大,爆炸作用的能力强,炸药爆炸形成的冲击波以球面波的形式向外扩张,在遇到自由面时又被反射回稀疏波,板材在反射拉伸作用下产生破坏效应,由于能量过大,导致剩余能量仍有部分会作用于板材四周,从而促使板材损伤进一步增大;III 号板的孔径和装药量

最小,板材在中部略微隆起,并在炮孔端产生细小的裂纹,这是由于炸药爆炸产生的冲击波在钛合金板内向表面传播,发生了 Hopkinson 效应,对打孔处的介质产生拉伸作用,从而导致细微裂纹的产生。

为了进一步验证仿真模拟的准确性,图 12 给出了最大损伤间距的模拟与试验结果对比。能够看出,模拟与试验之间的误差仅在 $1\sim 2\text{ mm}$ 左右。这是由于仿真模拟是在理想条件下进行的,忽略了一些不确定因素;而试验过程中,由于机械加工造成孔径大小存在误差,从而导致装药量不准;再加上外界环境等其他因素的影响,难免与模拟结果有些差距。并且随着孔径的增加,模拟结果与试验结果的误差在变大。

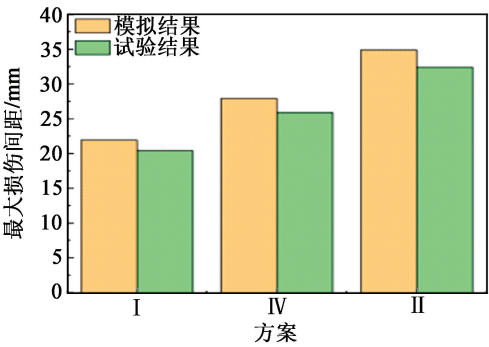


图 12 模拟与试验结果对比

Fig. 12 Comparison between simulation and test results

4 结论

设计了用于爆炸切断 TC4 钛合金板的轴向单孔和轴向双孔两种装药结构。通过数值模拟和试验,探究了两种装药结构的优劣性,并通过调整孔径,找到了最佳切断方案,模拟结果和试验结果高度一致。得到以下结论:

- 1) 双孔装药结构明显优于单孔装药结构,可以在降低装药量的同时,提升爆炸切断的效果。
 - 2) 细微调整孔径后发现,调整孔径大小能够改变爆炸切断的效果,爆炸切断能力会随着孔径的增大而增强,且钛合金板的损伤也随之增大。
- 由于各方面因素,仅仅探究了轴向单、双孔装药的优劣性,得出双孔装药比单孔装药更优。可进一步提高精度进行双孔切断研究,找寻切断板材的临界装药直径。

参 考 文 献

[1] 刘闯,陈国栋,黄福增,等. 航空发动机机匣包容性试

- 验研究[J]. 航空发动机, 2020, 46(3): 71-76.
- LIU C, CHEN G D, HUANG F Z, et al. Study on aero-engine casing containment test [J]. *Aeroengine*, 2020, 46(3): 71-76.
- [2] 武新峰, 刘观日, 雷勇军, 等. 基于 LS-DYNA 的包带式星箭连接装置分离过程和冲击响应分析[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(24): 174-179.
- WU X F, LIU G R, LEI Y J, et al. Separation process and shock response analysis of clamp band systems based on LS-DYNA [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(24): 174-179.
- [3] 胡坤伦, 汪齐, 王猛, 等. 爆炸分离钛合金板的研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(13): 21-25.
- HU K L, WANG Q, WANG M, et al. Titanium alloy plate explosion separation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(13): 21-25.
- [4] 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.
- [5] RAMESH A, GANESAN C, KUMARAVELAN R. Numerical analysis of engine inlet fan blades with different materials [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 42(2): 1274-1278.
- [6] BARLOW K W, CHANDRA R. Fatigue crack propagation simulation in an aircraft engine fan blade attachment [J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(10/11/12): 1661-1668.
- [7] 何志杰, 王猛, 赵康, 等. 爆炸分离碳纤维增强复合材料编织板[J]. *爆破*, 2021, 38(3): 26-30, 81.
- HE Z J, WANG M, ZHAO K, et al. Explosive separation of woven board made of carbon fiber reinforced composite [J]. *Blasting*, 2021, 38(3): 26-30, 81.
- [8] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005.
- TAN Q M. Dimensional analysis [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2005.
- [9] 米建宇, 黄飞, 李树清, 等. 基于 SPH-FEM 耦合算法的后混合磨料水射流冲击破岩数值模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(16): 132-139.
- MI J Y, HUANG F, LI S Q, et al. Numerical simulation of rock breaking by rear-mixed abrasive water jet based on an SPH-FEM coupling algorithm [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(16): 132-139.
- [10] 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.
- MEN J B, JIANG J W, WANG S Y. Fundamentals of numerical simulation for explosion and shock problems [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2015.
- [11] 李世杰, 王艾伦, 刘向军, 等. 基于 SPH 算法土壤水射流冲击演化数值仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2019, 36(3): 243-247, 384.
- LI S J, WANG A L, LIU X J, et al. Numerical simulation of soil water jet impact evolution based on SPH algorithm [J]. *Computer Simulation*, 2019, 36(3): 243-247, 384.
- [12] 南宇翔, 蒋建伟, 王树有, 等. 一种与爆轰参数封闭的 JWL 方程参数确定方法[J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(2): 157-163.
- NAN Y X, JIANG J W, WANG S Y, et al. One parameter-obtained method for JWL equation of state considered detonation parameters [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(2): 157-163.
- [13] WANG X M, SHI J. Validation of Johnson-Cook plasticity and damage model using impact experiment [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 60: 67-75.
- [14] 肖京, 卜长根. Mises 屈服准则及其在钻探工具强度设计中的应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(11): 67-69, 74.
- XIAO J, BU C G. Application of Mises yield criterion in the strength design for drilling tools [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(11): 67-69, 74.
- [15] 李同林, 殷绥域. 弹塑性力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006: 75-76.