

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.02.021

## 钛合金板爆炸断离效果的研究

王杰春,王猛,赵盟乔,陈刚,朱宇  
(安徽理工大学 化学工程学院,淮南 232000)

**摘要:** 航空发动机叶片的丢失模拟试验对于机匣包容设计具有重大意义,该试验的难点在于如何控制转子叶片达到允许的最高转速时发生断离。为研究人为断离发动机转子叶片的最佳分离结构,采取爆炸分离的方法,设计了在断离处两侧开V型槽下中心开单孔和中心开双孔两种结构TC4钛合金板的静态模拟试验。TC4钛合金板选用规格为100 mm×80 mm×23 mm,采用AUTODYN数值模拟软件进行仿真计算,并结合试验对比两种结构5个方案的板材损伤及附加动能大小。结果表明:方案II、V未成功断离,方案III对样板损伤较大,方案I、IV能较好地分离样板;在相同装药量情况下,双孔结构板材断裂后位移量明显大于两侧开V型槽中心开单孔结构的材断裂后位移量。进一步分析得出:V型开槽结构可以降低爆炸对板材的损伤,提高炸药能量利用率,降低对板材的附加动能,相较于双孔结构峰值速度降低20%,逸散速度降低40%。研究成果可为探究断离TC4钛合金板最佳结构提供参考。

**关键词:** TC4钛合金板;爆炸断离;仿真计算;SPH;应力集中

**中图分类号:** TQ560;TG48 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)02-0170-07

## Study on Explosive Disconnection Effect of Titanium Alloy Plate

WANG Jie-chun, WANG Meng, ZHAO Meng-qiao, CHEN Gang, ZHU Yu

(School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China)

**Abstract:** The simulation test of blade loss in an aero engine plays a crucial role in casing containment design. The main challenge lies in controlling the breaking of rotor blades when they reach their maximum allowable speed. To investigate the optimal separation structure for rotor blades with artificial separation, two types of TC4 titanium alloy plates with V-shaped grooves, one with a single hole and another with double holes at the center, were designed using explosive separation method. The selected size for the TC4 titanium alloy plate was 100 mm×80 mm×23 mm. The AUTODYN numerical simulation software's Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) algorithm was employed to conduct simulation calculations. Experimental comparisons were made on the damage and additional kinetic energy caused by five different schemes involving these two structures. Results indicated that scheme II and V failed to break off successfully, while scheme III resulted in significant damage to the template. On the other hand, schemes I and IV demonstrated better ability to separate the template. Under identical charge conditions, it was observed that the displacement of double-hole structured plates after fracture was significantly greater than that of single-hole structured plates with V-grooves on both sides. Further analysis revealed that the V-shaped slotted structure could reduce plate damage, enhance explosive energy efficiency, and minimize additional kinetic energy exerted on the plate. Moreover, compared to double-hole structures, this slotted structure also reduced peak speed by 20% and escape speed by 40%.

收稿日期 (Date of reception): 2023-04-24

网络首发日期 (Published online): 2023-08-16

作者简介: 王杰春(1998-),男,福建省龙岩市,硕士研究生,主要研究方向为爆炸力学, (E-mail) 1459780024@qq.com。

通讯作者: 王猛(1974-),男,安徽省淮南市,教授,主要从事爆炸力学及其后效应研究, (E-mail) behemoth1974@163.com。

**About the author:** WANG Jie-chun(1998-), male, master candidate, Longyan City, Fujian Province, mainly engaged in explosion mechanics, (E-mail) 1459780024@qq.com.

**Corresponding author:** WANG Meng(1974-), male, Huainan City, Anhui province, professor, mainly engaged in explosion mechanics and its aftereffects, (E-mail) behemoth1974@163.com.

**Key words:** TC4 titanium alloy plate; explosive disconnection; simulation calculation; SPH; stress concentration

世界各国对航空发动机机匣包容能力提出的要求基本相同,即在发动机所允许的最高转速下,压气机及转子叶片发生失效断裂后应被机匣所包容<sup>[1]</sup>。随着航空发动机技术的不断革新,叶片最高转速不断提升,其所受的离心载荷增加、外物撞击、材料缺陷、疲劳等原因都有可能致叶片发生断离事故。因此如何设计叶片飞脱静态试验,精准控制叶片断离时间,降低断离时附加的不平衡载荷具有现实意义。

火工装置在航天上的运用非常广泛,例如柔性切割索、电爆阀、电分插头、分离螺栓等等,武新峰等通过 ANSYS/LS-DYNA 建立了一种星箭连接装置仿真计算方法<sup>[2]</sup>,分析了装置分离过程及动态响应。孙海霞等采用 ADAMS 等对包带装置分离过程进行动力学仿真并通过实验验证了其可靠性<sup>[3]</sup>。胡坤伦等基于量纲分析确定影响因素<sup>[4]</sup>,通过 AUTODYN 确定爆炸分离钛合金板最小壁厚、装药直径和缓冲层厚度之间的最佳比例关系,实验结果与数值模拟相近。Takeuchi 等对航天器分离过程进行模拟<sup>[5]</sup>,验证分离装置的动态冲击响应。BaoWZ 等建立一种有限元断裂问题的数值模拟以提高模拟的准确性<sup>[6]</sup>。

对于钛合金板的分离实验往往采用聚能切割的方式,考虑到聚能装药结构复杂,在整机实验时难以在高转速下克服离心载荷,因此使用轴向打孔装药进行爆炸分离。朱宇等对比了轴向单孔装药和双孔装药爆炸切断钛合金板<sup>[7]</sup>,得出双孔装药方案更适用于切断实验。爆炸结束后,飞脱部分板材的动能由自身离心力势能转换和炸药爆炸产生的附加能量组成。杨仁树等提出双孔起爆时<sup>[8]</sup>,拉伸应变区应力波峰值明显大于单孔,且不是简单的数值叠加,可以达到单孔的 3~6 倍,会增加断离板材的附加动能。李涛等对 V 型缺口处材料所受应力状态进行分析<sup>[9,10]</sup>,发现受拉伸载荷时缺口尖端所受应力会明显升高。现参考工程力学应力集中及工程爆破分散装药原理,设计出单孔 V 型开槽和双孔不开槽两种断离处结构,通过数值模拟与试验比较两者优劣。

### 1 数值模拟

炸药爆炸是一个瞬态高能量转变的过程。在对爆炸过程仿真计算时,Lagrange 算法容易产生巨大的网格畸变和滑移面变形等问题,从而降低结果的准确性。Euler 算法不会发生网格畸变,但是难以精准划分各类界面。故选取光滑粒子动力学(SPH)算

法进行仿真计算。

SPH 算法是一种无网格的 Lagrange 数值方法,J W Swegle 等最早将该方法运用到模拟爆炸问题<sup>[11]</sup>。它将物质转化为带有能量、质量、动量的粒子来构成离散计算域,相邻物质材料的粒子自然地构成界面,物体间相互作用通过粒子间相互作用来描述。不同于传统 Lagrange 依赖网格来描述物体运动状态,SPH 算法可以很好地模拟侵彻、高速撞击等物理现象。在仿真计算过程中设立高斯点,结合 Mises 准则判断模型断裂情况。

#### 1.1 方案设计

TC4 钛合金板选用规格为 100mm × 80 mm × 23 mm,在确保相同装药体积和相同壁厚(保证板材受离心载荷不断裂)的情况下,拟设计断裂处单孔 V 型开槽和双孔不开槽两种装药结构进行仿真计算。如图 1 所示,单孔 V 型开槽结构在断离处中心位置设立一个直径 7 mm 的炮孔,在上下两处自由面各设立一个角度为 60°,深度 1.5 mm 的三角形凹槽;双孔结构在断离处上下中心位置各设立一个直径 5 mm 的炮孔,自由面不做任何处理。为探究更好的断离效果,在保证壁厚一致的情况下对两种结构的孔径和开槽深度上进行调整,得到 5 组实验方案,参数如表 1。

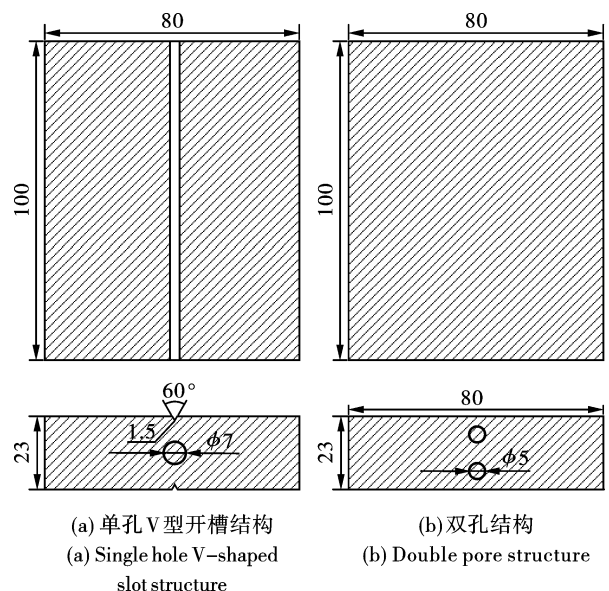


图 1 钛合金板结构示意图(单位:mm)

Fig. 1 Structure diagram of titanium alloy plate(unit:mm)

#### 1.2 仿真模型

通常材料的断裂被视为三个阶段,微小孔的形成、扩展、联合,最终形成断裂。钛合金板属于高塑、

高韧性材料,选用非耦合断裂模型中的 Johnson-cook 模型及失效参数<sup>[12]</sup>,采用 Mie-Gruneisen 状态方程求解。模型中钛合金板密度  $4.428 \text{ g/cm}^3$ ,其余参数如表 2 所示,其中  $C_p$  为比热容, $T_m$  为参考温度, $C_g$  为材料系数, $S$  为常数。

表 1 试验方案几何参数

Table 1 Geometric parameters of the test scheme

方案	开孔方式	炮孔直径/ mm	开槽深度/ mm	炮孔容积/ $\text{mm}^3$
I	双孔	5	/	3927
II	双孔	4	/	2514
III	单孔	7	1.5	3849
IV	单孔	6	2.0	2827
V	单孔	5	2.5	1964

选用炸药为钝化 RDX,对于爆炸类的仿真模拟采用 JWL 方程有较高的精度<sup>[13]</sup>,符合炸药爆炸及

其爆轰产物作用效应,其表达式为

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

式中: $P$  为爆轰产物压力; $E$  为爆轰产物的比内能; $e$  为初始比内能; $V = v/v_0$  ( $v$  为爆轰产物比容, $v_0$  为炸药的初始比容); $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为常数。钝化 RDX 状态参数如表 3 所示。

采用 AUTONYD 软件建立有限元模型,定义几何模型  $X$  方向上尺寸为 23 mm, $Y$  方向上尺寸为 80 mm, $Z$  方向上尺寸为 100 mm。在断离处  $X$  方向远端自由面上每隔 25 mm 设立一个高斯点,用于判断钛合金板界面端变化情况;在钛合金板  $Y$  方向远端自由面中心位置设立一个高斯点,用于监测钛合金板断离后,断离处附加动能强弱。起爆点均设立在药柱表面中心位置,如图 2 所示。

表 2 TC4 钛合金板结构参数

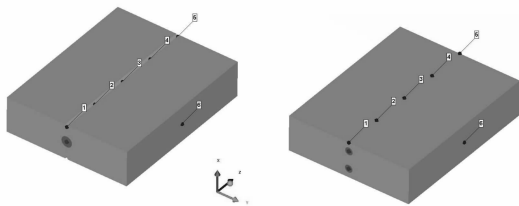
Table 2 Structural parameters of TC4 titanium alloy plate

密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$C_g/$ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$T_m/\text{K}$	$C_p/$ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	屈服应力/ GPa	剪切模量/ GPa	$S_1$	Gruneisen 系数
4.428	41.9	1878	560	1.092	41.9	1.028	1.23

表 3 钝化 RDX 材料参数

Table 3 Parameters of passivated RDX materials

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$E/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	$P/\text{GPa}$
1.6	573	14.6	4.6	1.4	0.32	7910	$8.6 \times 10^6$	26.5



(a) 单孔 V 型开槽结构

(b) 双孔结构

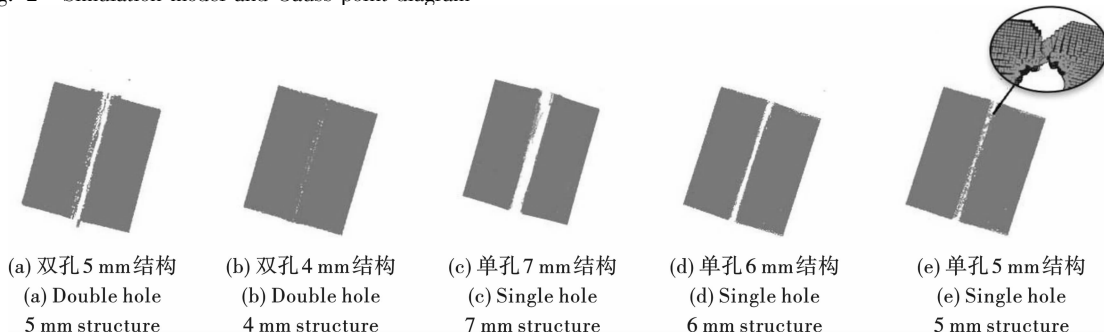
(a) Single hole V-shaped slot structure (b) Double pore structure

图 2 仿真模型及高斯点示意图

Fig. 2 Simulation model and Gauss point diagram

### 1.3 计算结果与分析

五组实验方案仿真计算结果如图 3 所示,方案 I、III、IV 仿真模型成功断离,方案 II、V 仿真模型未能完成断离。方案 I 模型断裂处板材的损伤间距较小,断口面不平整;方案 II 模型未发生明显形变,只是在断离处两侧自由面略微鼓起,并存在细小裂纹;方案 III 模型断离处损伤间距较大,发生位移明显;方案 IV 模型断离处损伤间距较小且断面较为平整;方案 V 模型未完全断裂,断离处仍存在一些连结部位。



(a) 双孔 5 mm 结构  
(a) Double hole  
5 mm structure

(b) 双孔 4 mm 结构  
(b) Double hole  
4 mm structure

(c) 单孔 7 mm 结构  
(c) Single hole  
7 mm structure

(d) 单孔 6 mm 结构  
(d) Single hole  
6 mm structure

(e) 单孔 5 mm 结构  
(e) Single hole  
5 mm structure

图 3 仿真结果

Fig. 3 Simulation results

钛合金板为各向同性材料,冲击波破坏作用时不需要考虑方向。黑索金发生爆轰会沿着四周传递强冲击波,冲击波在断裂处 X 方向率先到达自由面。界面端的冲击波(强压缩)发生扰动,一部分仍然以压缩波的形式沿着自由面方向继续传播,另一部分反射形成拉伸波,材料在压缩波和拉伸波的共同作用下拉伸断裂。因此 Tresca 屈服准则、Mohr-Coulomb 屈服准则等都不能很好地描述计算结果<sup>[14]</sup>,选用 Mises 屈服准则对界面高斯点进行分析。

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6k = 2\sigma_s^2 \quad (2)$$

Mises 屈服准则是基于第四强度理论(畸变能

量密度理论),该理论认为在多轴应力状态下,只要物体内一点处形变达到某一常数值时(Mises 应力大于  $\sigma_s$ ),材料发生屈服。分别取方案 I、II、V 中高斯点所记录的 Mises 应力及计算所得等效应力进行对比,如图 4 所示。三个方案中应力都先增加后降低。这是由于炸药在孔洞两端约束不足,能量在 Y 方向耗散。方案 I 中 Mises 应力均大于计算所得等效应力,材料发生屈服;方案 II 中所有点及方案 III 中  $G_2$ 、 $G_4$  两点等效应力高于 Mises 应力,判定未发生断离。结合表 4 得出,单孔开槽结构下装药直径 7 mm 对板材损伤较大,而装药直径 5 mm 时不能使板材完全断裂。

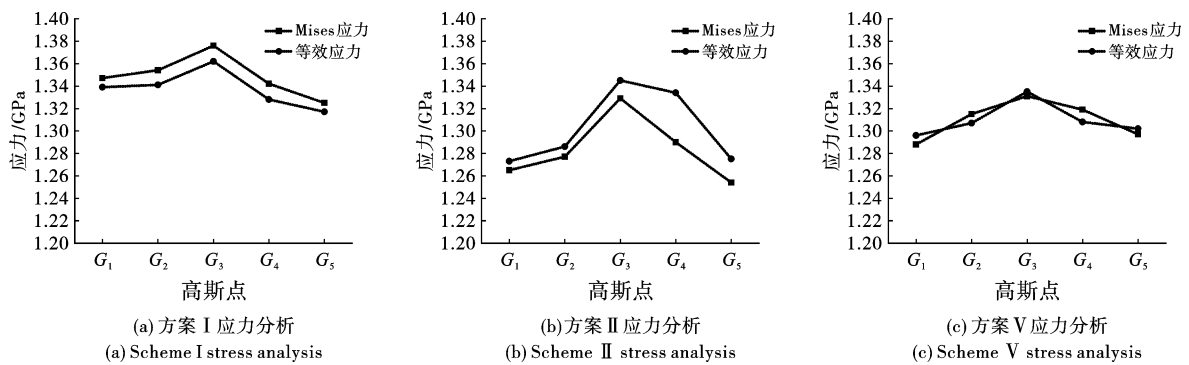


图 4 Mises 应力和等效应力关系图

Fig. 4 Mises stress and equivalent stress relationship

表 4 各方案测点应力

Table 4 Stress at measuring points of each scheme

测点	方案 I		方案 II		方案 III		方案 IV		方案 V	
	$\sigma_s$	$\sigma_{Mises}$	$\sigma_s$	$\sigma_{Mises}$	$\sigma_s$	$\sigma_{Mises}$	$\sigma_s$	$\sigma_{Mises}$	$\sigma_s$	$\sigma_{Mises}$
1	1.339	1.347	1.273	1.265	1.345	1.350	1.329	1.333	1.308	1.301
2	1.341	1.354	1.286	1.277	1.364	1.378	1.361	1.368	1.319	1.327
3	1.362	1.376	1.345	1.329	1.386	1.396	1.374	1.384	1.347	1.343
4	1.328	1.342	1.334	1.290	1.374	1.389	1.363	1.375	1.320	1.331
5	1.317	1.325	1.275	1.254	1.367	1.373	1.351	1.357	1.314	1.309

图 5 给出具体方案情况下测点 3 的速度时程曲线图。方案 I 中监测点 3 处的速度在冲击波扰动下升至 510 m/s, 略微下降后回升到第二个峰值 640 m/s, 在 0.025 ms 处下降速度逐步变缓。其第一次达到峰值速度是冲击波扰动测点发生偏移, 之后在界面形成的反射波导致测点反向偏移导致速度降低。此后发生断裂, 测点在冲击波和爆轰产物作用下速度达到第二个峰值, 随后下降至 260 m/s 左右是因为碎片在爆轰气体作用下逸散。方案 II 测点在扰动作用下增至 155 m/s, 紧接着迅速下降至零点附近上下震荡。说明冲击波扰动不足以使测点发

生大偏移, 随后在稀疏波和材料本身弹性形变作用下回到零点附近, 压缩波、爆轰产物、稀疏波等共同作用时测点速度在正负方向上来回波动, 逐渐趋近于零。综上所述, 方案 I 和方案 IV 能较好地分离样板, 方案 II、V 不能使样品分离, 方案 III 对板材损伤较大。

为进一步探究两种结构爆破作用后对断离部分的附加动能大小, 取离心面几何中心为研究对象, 对比方案 I 和 IV 测点 6Y 方向速度变化并加以分析。由图 6 可知两种方案波形大体一致, 方案 I 速度峰值为 100 m/s, 随后震荡降低至 50 m/s; 方案 IV 峰值

为 82 m/s, 随后震荡降低至 30 m/s。

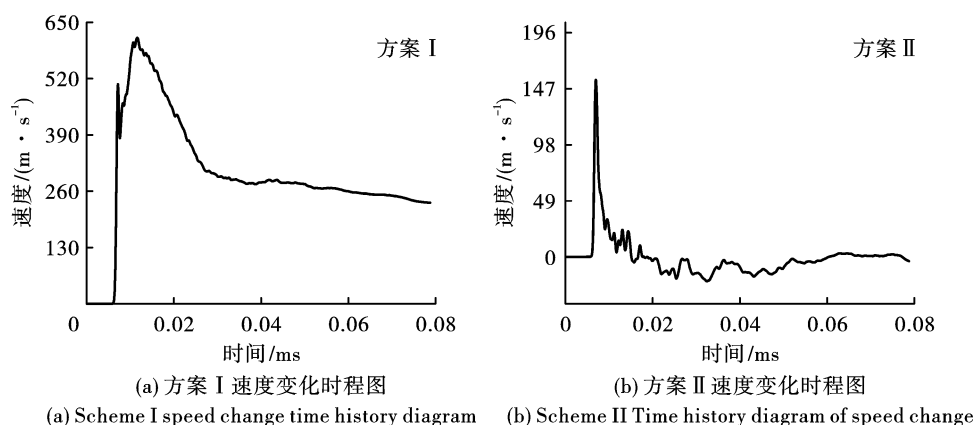


图 5 方案 I、II 测点 3 速度变化

Fig. 5 Velocity changes at measuring points 3 in schemes I and II

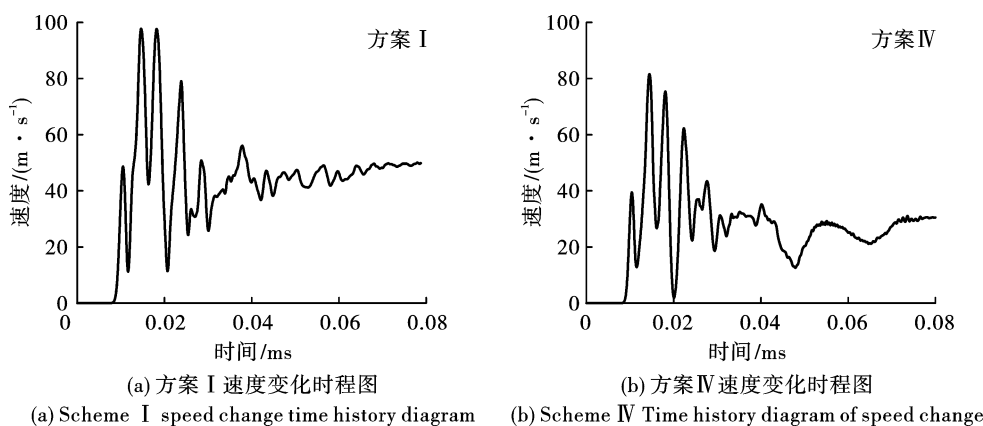


图 6 方案 I、IV 测点 6 速度变化

Fig. 6 Velocity changes at point 6 of Scheme I and IV

对图 6 进行积分可得方案 I 位移量为 1.9020, 方案 IV 位移量为 1.1963 约为方案 I 的 0.6 倍。初步判断这是因为 V 型凹槽尖端处发生应力集中效应, 当冲击波传递到凹槽时, 压缩波和拉伸波形成的拉伸应力会在缺口尖端集中。材料尖端所受应力率先达到抗拉极限发生断裂, 爆轰产物以及冲击波优先从 X 轴方向自由面释放, 降低了爆炸能量对材料的径向作用。根据双孔爆炸载荷应变测试试验, 在双孔连线垂直方向 80 mm 处所受拉伸应变峰值约为连线方向 80 mm 的 3~6 倍。说明双孔结构冲击波在径向上的叠加会增加断裂部分板材的动能。综上所述, 单孔开槽结构相比于双孔结构能够明显降低爆炸给断裂部分提供的附加动能, 峰值速度降低 20%, 逸散速度降低 40%。

## 2 TC4 钛合金板断裂试验

### 2.1 试验设计

依据表 1 设计 5 组试验方案, 钛合金板规格为

100 mm × 80 mm × 23 mm。两种结构示意图如图 7 所示, 药孔一端使用绝缘黑胶布进行封孔, 钝化黑索金压药密度 0.88 g/cm<sup>3</sup>, 末端与导爆索相连并用黑胶带进行固定。将电雷管固定在导爆索另一端, 双孔结构中雷管置于两根导爆索中间位置。如图 8 所示, 用铜丝将钛合金板悬挂于空中, 底部铺设网格用于对比断裂后样品偏移位置。

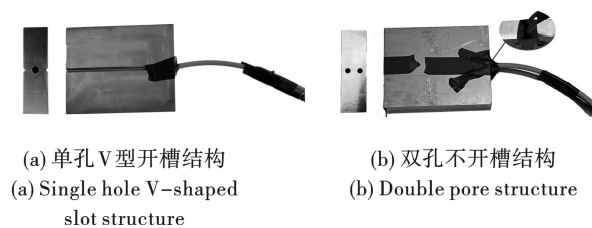


图 7 结构示意图

Fig. 7 Structure diagram

### 2.2 实验结果与分析

收集 5 组试验板材进行对比分析, 损伤结果如

图9所示。方案I、Ⅲ、Ⅳ钛合金板完全分离,方案Ⅱ、Ⅴ发生不同程度形变。方案I断离处呈锯齿状,断离处两边损伤大,中间略微突起。方案Ⅱ未发生断离,双孔内侧有细小裂缝,两侧自由面略微鼓起;方案Ⅴ单孔方案未形成“鼓包”,孔径由5 mm扩增至7 mm。两方案出现不同的形变,因为双孔结构中药柱距离自由面近,球型冲击波到达自由面后与反射回来拉伸波形成拉伸作用,此时炮孔与自由面之间的板材受拉应力为主。单孔结构中药柱与自由面距离较远,爆炸产生冲击波在自由面产生的回波不足以使自由面端发生塑性形变,内部板材所受应力以压应力为主。方案Ⅲ钛合金板一侧损伤严重,板材不完整,爆炸产生较多碎片,初步判断是装药直径

对炸药猛度的影响,板材在冲击载荷的作用下直接断裂飞出。方案Ⅳ断离处切口平整,因缺口尖端应力集中率先达到断裂强度,在缺口底部薄弱处形成裂隙,这些微小裂隙汇聚使板材断离。

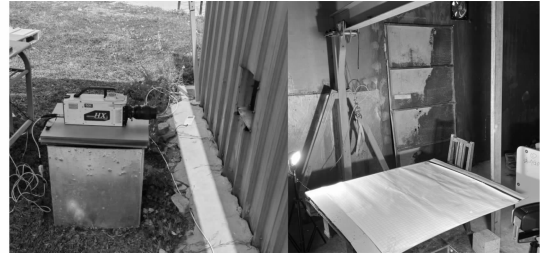


图8 钛合金板断离试验

Fig. 8 Titanium alloy plate detachment test

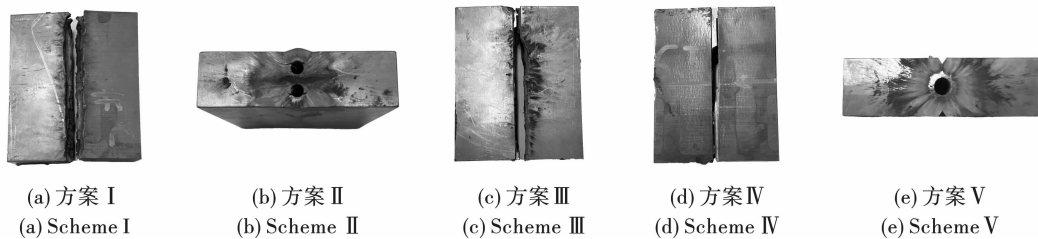


图9 试验结果

Fig. 9 Test results

为进一步探究两种方案所产生的附加动能,图10给出I、Ⅳ两种方案爆炸后钛合金板落点图。方案Ⅳ落点距离中心位置约7 mm,方案I约21 mm为方案Ⅳ的3倍。结合图9可推断出,即使双孔5 mm结构在断离处两侧逸散一部分能量,在双孔间Y方向上叠加的冲击波仍远高于单孔6 mm结构。因爆炸产生钛火阻碍高速摄影视场,未能计算出不同方案断离时的瞬时速度。综上所述,试验结果与仿真计算结果相符合,单孔开槽结构可以在减少装药量的同时得到更好的断离效果。

V型缺口设计可以显著降低炸药对缺口外板材的破坏作用。利用缺口应力集中效应,可以提高炸药对局部的作用能力,提高能量利用率。

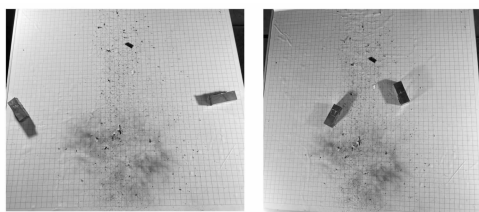
(2)单孔V型开槽结构相比于双孔结构可以有效降低爆炸对断离部分的附加动能,峰值速度降低20%,逸散速度降低40%。

(3)单孔V型开槽断离处平整,应力分布集中,可以降低爆炸对断离部分飞行姿态的影响,更适用于航空发动机包容性试验。

由于钛火的影响,未能对断离瞬时速度进行计算分析;V型缺口应力集中效应与缺口深度、角度等多种因素相关,文中仅对60°缺口进行分析。航空发动机的不断发展对叶片断离试验也不断提出新要求,断离结构和方式的研究有待更进一步深入。

### 参考文献 (References)

- [1] 陈 伟,刘璐璐,宣海军,等. 突加高能载荷作用下航空发动机结构动态响应及安全性综述[J]. 推进技术, 2020,41(9):2099-2119.
- [1] CHEN Wei, LIU Lu-lu, XUAN Hai-jun, et al. Dynamic response and safety of aero-engine structures under sudden high energy loading[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020,41(9):2099-2119. (in Chinese)



(a) 方案 I  
(a) Scheme I

(b) 方案Ⅳ  
(b) Scheme IV

图10 试验板材落点

Fig. 10 Drop point of test plate

## 3 结论

(1)单孔V型开槽结构具有良好的断离能力,

- [2] 武新峰,刘观日,雷勇军,等.基于LS-DYNA的包带式火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.
- [2] WU Xin-feng, LIU Guan-ri, LEI Yong-jun, et al. Separation process and impact response analysis of belt type satellite and arrow coupling device based on LS-DYNA[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(24): 174-179. (in Chinese)
- [3] 孙海霞,范瑞祥. 火箭包带锁紧装置分离过程动态包络的动力学仿真[J]. 导弹与航天运载技术, 2004(4): 15-18.
- [3] SUN Hai-xia, FAN Rui-xiang. Dynamic simulation of dynamic envelope in the separation process of satellite and arrow belt locking device[J]. Missiles and Space Vehicles, 2004(4): 15-18. (in Chinese)
- [4] 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.
- [4] HU Kun-lun, WANG Qi, WANG Meng, et al. Study on explosive separation of titanium alloy plates[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(13): 21-25. (in Chinese)
- [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] BAO WZ, HAN HD, HUANG ZY. Numerical simulations of fracture problems by coupling the FEM and the direct method of lines[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 190(37-38): 4831-4846.
- [7] 朱宇,王猛,何志杰,等.轴向打孔装药爆炸切断TC4钛合金板的研究[J].爆破器材,2022,51(3):43-49.
- [7] ZHU Yu, WANG Meng, HE Zhi-jie, et al. Study on explosive cutting of TC4 Titanium Alloy Plate with axial punching Charge[J]. Explosive Materials, 2022, 51(3): 43-49. (in Chinese)
- [8] 杨仁树,曹文俊,陈程,等.单-双孔爆炸荷载作用下应变测试试验[J].中国煤炭,2015,41(10):49-52.
- [8] YANG Ren-shu, CAO Wen-jun, CHEN Cheng, et al. Strain test under single - double hole explosion load[J]. China Coal, 2015, 41(10): 49-52. (in Chinese)
- [9] 田宗淑,刘劲松,田炯.具有V型槽孔板的应力集中分析[J].中国科学院研究生院学报,1997(2):110-116.
- [9] TIAN Zong-su, LIU Jin-song, TIAN Jiong. Stress concentration analysis of plate with V-shaped slot[J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 1997(2): 110-116. (in Chinese)
- [10] 刘斌,李涛,张开林,等. V型缺口应力集中系数分析及应用[J].机械设计与制造,2017,321(11):100-104.
- [10] LIU Bin, LI Tao, ZHANG Kai-lin, et al. Analysis and application of V-notch stress concentration coefficient[J]. Machinery Design and Manufacture, 2017, 321(11): 100-104. (in Chinese)
- [11] SWEGLE J W, ATTAWAY S W. On the feasibility of using smoothed particle hydrodynamics for underwater explosion calculations [J]. Computational Mechanics, 1995, 17(3): 151-168.
- [12] 景峥.韧性断裂理论研究及其工程应用[D].合肥:中国科学技术大学,2013.
- [12] JING Zheng. Study on ductile fracture theory and its engineering application [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [13] 沈飞,王辉,袁建飞.一种确定JWL状态方程参数的简易算法[J].振动与冲击,2014,33(9):107-110.
- [13] SHEN Fei, WANG Hui, YUAN Jian-fei. A simple algorithm for determining parameters of JWL equation of state[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(9): 107-110. (in Chinese)
- [14] 王洪涛,陈昌耀,张华军,等.基于非线性Mohr-Coulomb破坏准则的浅埋倾斜条形锚板抗拔承载力预测[J].工程科学与技术,2023,55(2):232-241.
- [14] WANG Hong-tao, CHEN Chang-yao, ZHANG Hua-jun, et al. Prediction of uplift capacity of shallow buried inclined strip anchor plate based on nonlinear Mohr-coulomb failure criterion [J]. Engineering Science and Technology, 2019, 55(2): 232-241. (in Chinese)

## 科技论文网络首发小知识

网络首发(Online First Publish),就是被录用论文在纸质刊物出版前,先以网络出版形式刊发出来,读者可以在文章所在网页阅览、下载和打印。网络首发与纸质版具有同等效力,可减少出版时滞,使作者的首发权得到及时确认,以促进科研成果快速传播。