

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.03.018

## 切割索切断钛合金板附加动能研究

李发耀<sup>1</sup>,王猛<sup>1</sup>,韦众<sup>1</sup>,王天玺<sup>1</sup>,王弈轩<sup>1</sup>,宣海军<sup>2</sup>,何泽侃<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学 化工与爆破学院 淮南 232001; 2. 浙江大学 高速旋转机械实验室 杭州 310027)

**摘要:** 为定量研究航空发动机机匣包容实验中的叶片断裂飞脱附加动能,设计切割索爆炸切断钛合金板实验。使用 AUTODYN 软件计算质心运动方法的附加动能  $E1$  和逐粒子累加方法的附加动能  $E2$ ,并进行对比验证了计算方法的精确性。通过爆炸实验获得测试附加动能  $E3$ ,计算值与测试值比照确认后,核实了计算与实验的准确性。研究表明:当钛合金板恰巧爆炸切断时,其最大附加动能的总动能占比小于美国 FAA 公司提出的指标。该研究结果可用于机匣包容实验。

**关键词:** 包容实验; 爆炸切断; 附加动能; 验证; 确认

中图分类号: TQ560.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)03-0158-07

## Study on Additional Kinetic Energy in Linear Shaped Charge Cutting of Titanium Alloy Plates

Li Fa-yao<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, WEI Zhong<sup>1</sup>, WANG Tian-xi<sup>1</sup>, WANG Yi-xuan<sup>1</sup>, XUAN Hai-jun<sup>2</sup>, HE Ze-kan<sup>2</sup>

(1. College of Chemical Engineering and Blasting, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. High-Speed Rotation Machinery Laboratory of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** A study was conducted using explosive cutting cords to titanium alloy plates to quantitatively investigate the additional kinetic energy generated during blade fracture in aviation engine case inclusion experiments. The additional kinetic energy was analyzed through both computational and experimental approaches. Using AUTODYN software, two computational methods were employed: the center-of-mass motion method (yielding  $E1$ ) and the particle-by-particle accumulation method (yielding  $E2$ ). The accuracy of these methods was systematically compared. Experimental validation was achieved by measuring the additional kinetic energy ( $E3$ ) in controlled explosion experiments. The computational results were verified against experimental data, confirming the reliability of both the simulation and testing methodologies. The study reveals that the maximum additional kinetic energy generated during the severance of titanium alloy plates constitutes a smaller proportion of the total kinetic energy proportion than the threshold proposed by the FAA company. These findings provide critical insights for designing and evaluating cartridge inclusion experiments in aviation safety applications.

**Key words:** inclusive experiment; explosion cut-off; additional kinetic energy; verification; validation

收稿日期 (Date of reception): 2025-01-18

网络首发日期 (Published online): 2025-03-19

作者简介: 李发耀 (1999-), 男, 安徽六安, 硕士研究生, 主要从事爆破理论与技术研究, (E-mail) 3280995430@qq.com。

通讯作者: 王猛 (1974-), 男, 安徽淮南, 博士、教授, 主要从事爆炸力学、计算力学研究, (E-mail) bacchus19@163.com。

**About the author:** Li Fa-yao (1999-), male, born in Lu'an city, Anhui province, postgraduate student, mainly engaged in the blasting theory and technology research, (E-mail) 3280995430@qq.com.

**Corresponding author:** WANG Meng (1974-), male, born in Huainan city, Anhui, province, Ph. D, professor, mainly engaged in the explosion mechanics, computational mechanics research, (E-mail) bacchus19@163.com.

钛合金材料因其密度低、强度大的特性,广泛应用于航空航天等领域<sup>[1]</sup>。目前我国航空发动机中叶片、涡轮和转子等许多部件采用钛合金材料。这些部件在高速旋转时会受到高周疲劳或外物损伤断裂,高速碎片会以极大的动能击穿机匣,造成二次破坏,严重威胁安全飞行<sup>[2,3]</sup>。这种因碎片击穿机匣而造成的事故称为非包容性事故。

机匣包容实验是航空发动机适航的最终实验<sup>[4]</sup>。叶片断裂飞脱是该实验的关键环节,目前主要采用预制缺口和爆炸切断的方式。国外在此方面具有成熟技术,并完成了大量机匣包容实验。Trent900、1000 及 GEnx 发动机的包容实验中均采用叶片爆炸断裂飞脱技术<sup>[5]</sup>。近年来国内学者展开了一系列研究。郭明明重点介绍了两种叶片断裂的方法并对其进行实验<sup>[6,7]</sup>,证明了爆炸切断方法的可行性。张国静和吕登洲分别进行了实验设计和数值仿真的工作<sup>[8,9]</sup>,验证了使用线性聚能切割器切断叶片的可行性。陈刚设计了三种爆炸分离钛合金板的方案<sup>[10]</sup>,其中切割索作用力集中,在相同药量下爆炸切断效果较好。

史同承介绍了美国 FAA 的研究报告<sup>[11-13]</sup>,说明包容所需机匣厚度与叶片动能的开方成正比关系。爆炸飞脱叶片的同时会给予叶片部分能量,主要表现为叶片的附加动能。当附加动能为叶片总动能的 2% 时,对机匣的影响仅为 1%。因此在机匣包容性实验中,爆炸飞脱钛合金叶片的附加动能应小于总动能的 2%。查阅文献知,国内目前缺乏关于爆炸切断附加动能的相关研究,国外相关研究处于屏蔽状态。因此该研究对支持航空发动机机匣包容实验具有重大意义。

## 1 计算研究

### 1.1 计算方法与模型建立

使用 AUTODYN 的 SPH 方法进行数值模拟<sup>[14]</sup>。SPH 方法为无网格计算方法,可有效避免大变形带来的数值畸变。

通过叶片断裂位置处厚度,设计钛合金板模型尺寸为 100 mm × 60 mm × 23 mm,材质为 TC4 钛合金(Ti6Al4V)。经过查阅文献发现,切割索垫高为 0.5 mm 时,对钛合金板的切割深度最大为 1.81 mm。为了探究切割索完全切断钛合金板时的附加动能,保留钛合金板剩余厚度为 3.62 mm。

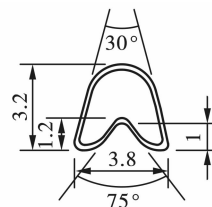
切割索宽 3.8 mm、高 3.2 mm。外壳材料为铅,厚 0.2 mm。通过多次切割索实验,调整钛合金板剩余厚度恰巧切断。仿真建模、切割索横截面和建模

如图 1、图 2 所示。建模总共有 421 516 个网格,其中钛合金板 266 060 个,铅外壳 115 884 个,切割索装药 56 500 个。图 3 为监测点分布图,其中监测点 1 在钛合金板右半块质心处。监测点 1~6 坐标分别为(15, 50, 0)、(0, 0, 0)、(0, 25, 0)、(0, 50, 0)、(0, 75, 0)、(0, 100, 0),单位:mm。



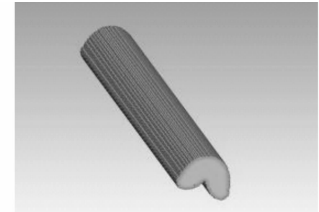
图 1 仿真建模

Fig. 1 Simulation modeling



(a) 切割索尺寸图(单位:mm)

(a) Diagram of linear shaped charge(unit:mm)



(b) 切割索建模

(b) Linear shaped charge modeling

图 2 切割索横截面尺寸和建模

Fig. 2 Cross-section view and modeling of linear shaped charge

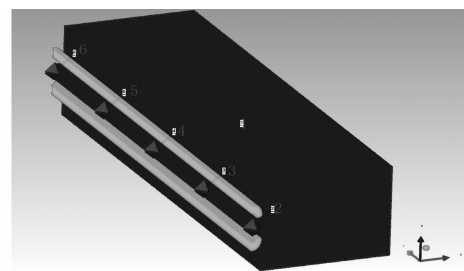


图 3 监测点分布图

Fig. 3 Distribution of monitoring points

### 1.2 材料参数

钛合金材料选用 TC4 型号,采用 Johnson-Cook 模型,参数如表 1 所示<sup>[15]</sup>。切割索炸药为六硝基萘(HNS),采用 JWL 状态方程<sup>[16]</sup>,参数如表 2 所示。切割索外壳材料为铅合金,采用 Johnson-Cook 模型,参数如表 3 所示。

### 1.3 仿真结果

切割索传爆过程如图 4 所示,图 4(a~e)为切割索传爆至监测点 2~6 时,并生成射流侵彻靶板的

截面图(左)及剖面图(右),通过截面图可了解传爆过程。由图 4 可以看出,爆炸效果仅在切割索附近

明显,粒子有明显的飞散。图 5 为完全断裂时的钛合金板。

表 1 TC4 钛合金试件材料参数

Table 1 Material parameters of TC4 titanium alloy test piece

密度 Density $\rho$ / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	格魯尼森系数 Gruneisen coefficient	声速 Acoustic speed $C_g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	斜率系数 Slope coefficient $S_1$	剪切模量 Shear modulus/GPa	泊松比 Poisson ratio	屈服应力 Yield stress/ GPa
4.42	1.23	5130	1.028	41.9	0.35	1.092

表 2 六硝基肼的 JWL 状态方程的参数

Table 2 Parameters of the JWL equation of state for HNS

密度 Density $\rho$ / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	压力系数 Pressure coefficient $A/\text{GPa}$	压力系数 Pressure coefficient $B/\text{GPa}$	指数衰减系数 Index decay coefficient $R_1$	指数衰减系数 Index decay coefficient $R_2$	内能耦合系数 Internal energy coupling coefficient $\omega$	爆速 Velocity of detonation/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1.65	463.10	8.873	4.55	1.35	0.35	7030

表 3 铅合金的材料参数

Table 3 Material parameters of the lead alloy

密度 Density $\rho$ / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	格魯尼森系数 Gruneisen coefficient	声速 Acoustic speed $C_g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	斜率系数 Slope coefficient $S_1$	剪切模量 Shear modulus/ GPa	泊松比 Poisson ratio	屈服应力 Yield stress/ GPa
10.1	2.77	2051	1.46	8.6	0.42	8.0

当  $t = 1.29 \mu\text{s}$  时,切割索挤出金属射流开始侵彻靶板;当  $t = 11.94 \mu\text{s}$  时,切割索已完全起爆,并已形成金属射流侵彻靶板。当  $t = 20.01 \mu\text{s}$  时,钛合金板在金属射流和爆生气体的综合作用下被完全切断。

#### 1.4 据质心运动计算

图 6 给出了监测点在  $x-y-z$  三个方向的速度变化情况,监测点 1 设置在钛合金板的质心处。监测点速度即为右侧钛合金板的质心速度,质心速度在应力波的作用下反复振荡。当板断裂时,板内的应力波能量逐渐耗散,质点速度趋近钛合金板最终飞脱速度。钛合金板左右对称,断裂后左右两块钛合金板飞脱动能相同,仅需计算板右侧质心的飞脱速度即可得到整体附加动能。

图 7 为钛合金板监测点合速度变化曲线图。 $t = 1.42 \mu\text{s}$  时,钛合金板质心处  $x-y$  两方向速度发生变化,此时切割索挤出聚能射流切刀并切割钛合金板。 $1.42 \mu\text{s}$  至  $8.16 \mu\text{s}$  为切割索传爆过程。

如图 8 所示,射流在  $6.39 \mu\text{s}$  时开始侵彻监测点 4, $8.16 \mu\text{s}$  时应力波传至质心处,此时质点在  $x-z$  方向的速度达到最大。 $20.01 \mu\text{s}$  后质点的速度进入低频振荡阶段,最后趋于平稳。经测量钛合金板断裂后最终的飞脱速度约为  $26.25 \text{ m/s}$ 。钛合金板总质量为  $600 \text{ g}$ ,钛合金板的整体附加动能  $E_1$  为

$206.72 \text{ J}$ 。

#### 1.5 逐粒子累加计算

在 SPH 方法中,每个粒子都具有相应物理量如质量、速度和动能等。对某时刻所有钛合金粒子动能进行累加,得到此刻下钛合金板的动能。统计不同时刻下的动能,便得到了钛合金板整体动能变化曲线图。

图 9 显示了钛合金板的整体动能变化。切割索开始爆炸切割钛合金板时,整体动能迅速增大,当  $t = 1.85 \mu\text{s}$  时达到第一个峰值,然后开始逐渐减小。当  $t = 3.25 \mu\text{s}$  时,附加动能开始逐渐增大。当  $t = 11.87 \mu\text{s}$  时,附加动能达到最大,此时切割索完全起爆,射流完全侵彻钛合金板。 $11.87 \mu\text{s}$  后钛合金板附加动能逐渐变小,并趋于平缓至  $204 \text{ J}$ 。由此得出钛合金板的整体附加动能  $E_2$  约为  $204 \text{ J}$ 。

## 2 实验研究

### 2.1 实验方案

实验所用 TC4 钛合金板和切割索如图 10 所示,实验装置如图 11 所示。为确保两侧切割索能同时起爆,钛合金板凹槽端部的切割索预留  $2 \text{ cm}$  超出部分,并与雷管绑扎连接。将钛合金板用细索悬吊于实验架上,将高速摄影机置于安全位置。

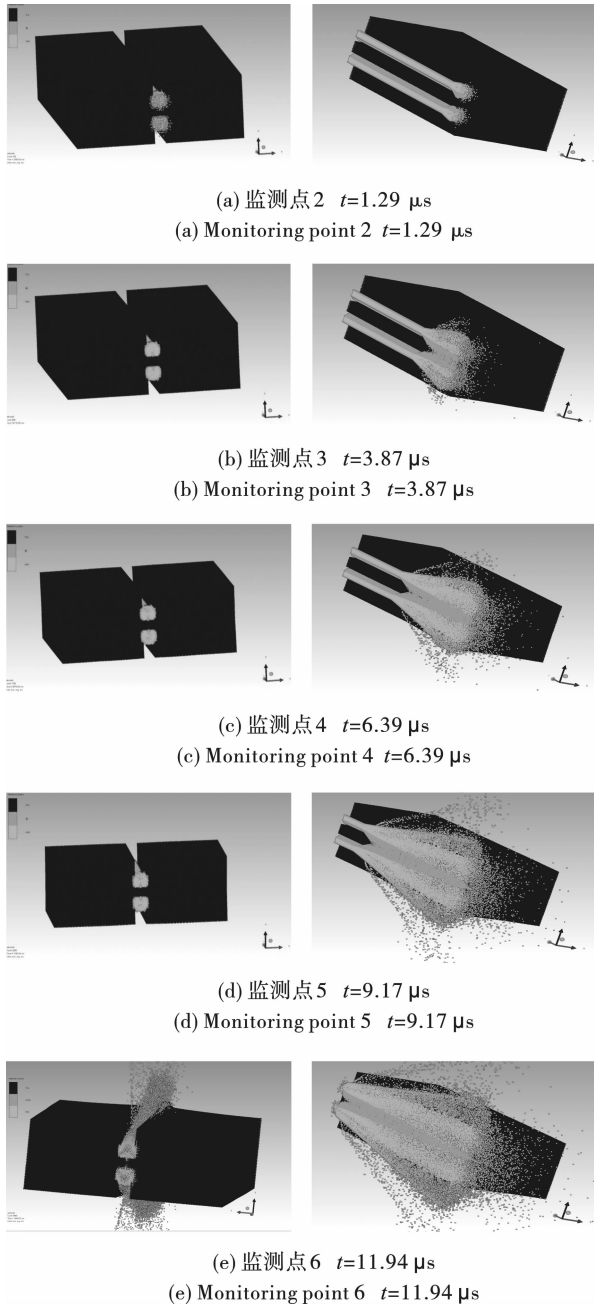


图4 切割索传爆过程

Fig. 4 Detonation process of the linear shaped charge

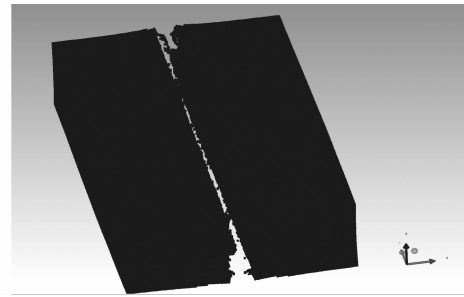


图5 完全断裂的钛合金板

Fig. 5 Fully broken titanium alloy plate

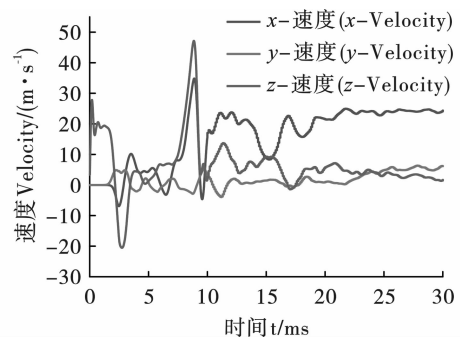


图6 钛合金板质心处 x-y-z 速度变化图

Fig. 6 x-y-z velocity variation diagram at the center of a titanium alloy plate

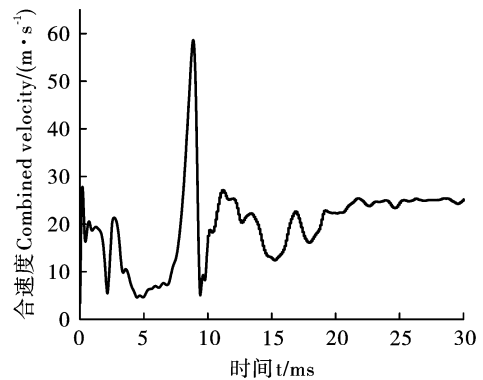


图7 钛合金板监测点1 合速度变化曲线图

Fig. 7 Variation of the resultant velocity of the monitoring point 1

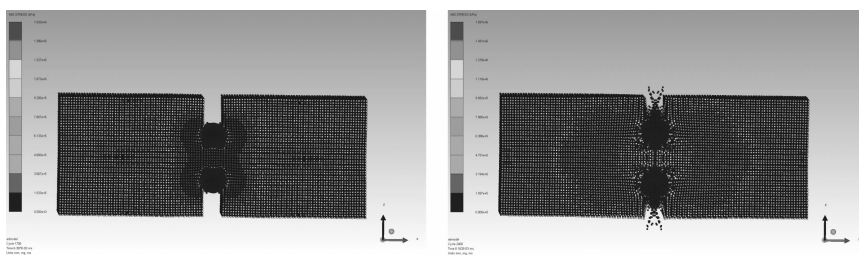


图8 应力波的传播过程

Fig. 8 Stress wave propagation process

设置高速摄影机参数为 5000 f/s。由相邻两照片坐标获知钛合金板位移,计算得到钛合金板飞脱速度。

通过飞脱速度和钛合金板质量可计算附加动能。

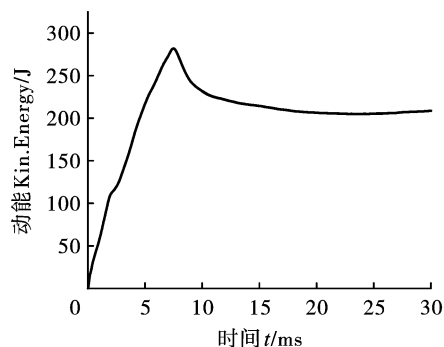


图9 钛合金板附加动能变化图

Fig. 9 Plot of additional kinetic energy change of titanium alloy plate

## 2.2 实验结果

钛合金板被切割索爆炸切断成A、B两块,两块的飞脱速度如图12、图13所示。A块的飞行速度为23.75 m/s,质量为304.0 g;B块的飞行速度为26.75 m/s,质量为294.6 g。

由上述实验获取分离后两块钛合金板的速度和质量,计算后得到爆炸切断钛合金板的总附加动能 $E_3$ 为194.99 J。

## 3 验证与确认

对以上数值和实验结果进行验证和确认(V&V)分析,保证结论的精确性和准确性。

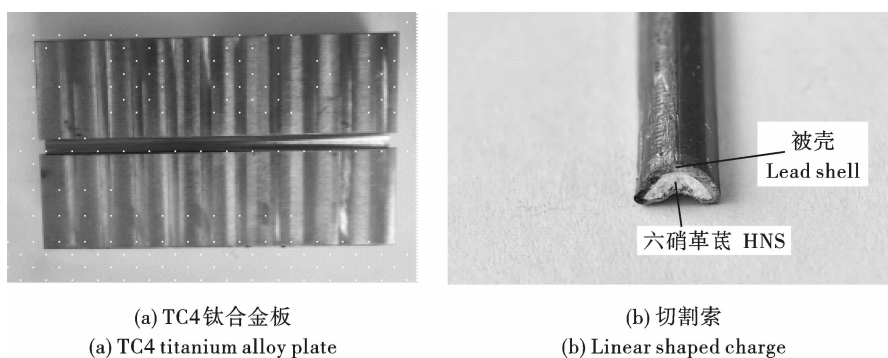


图10 TC4钛合金板及切割索

Fig. 10 TC4 titanium alloy plate and linear shaped charge

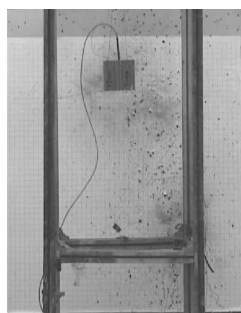


图11 实验装置图

Fig. 11 Experimental installation

### 3.1 计算验证

通过质心运动和粒子累加两种计算附加动能的方法进行比照。据质心速度计算得到的钛合金板附加动能 $E_1$ 为206.72 J,逐粒子累加计算得到的附加动能 $E_2$ 为204.00 J,两者误差为1.33%,验证了两种计算方法的精确性。

### 3.2 实验确认

通过爆炸切断实验测试得到的钛合金整体附加动能 $E_3$ 为194.99 J,和 $E_1$ 、 $E_2$ 的误差分别为5.67%和4.41%,计算和实验结果基本一致,确认了分析的准确性。

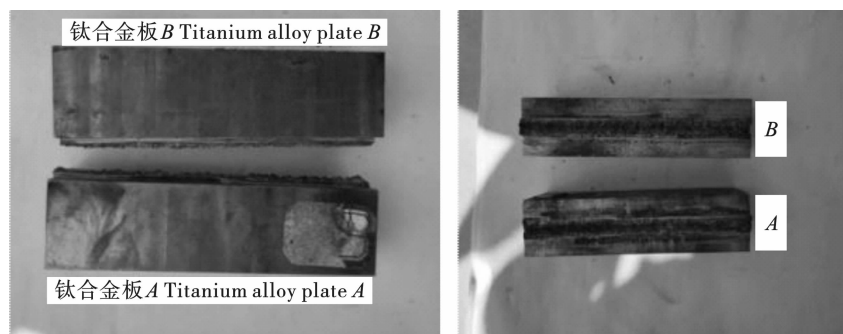


图12 钛合金板的切割效果

Fig. 12 Cutting effect of titanium alloy plate

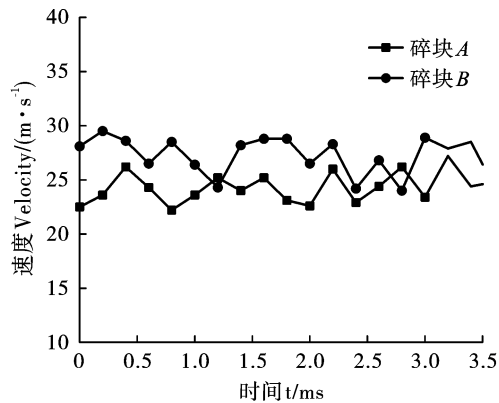


图 13 钛合金板 A、B 区块飞行速度变化图

Fig. 13 Change of flight speed of titanium alloy plate A and B

## 4 结论

(1) 经上述研究分析表明,切割索爆炸切断钛合金板的附加动能约为 200 J/100mm。

(2) 某实验钛合金叶片飞脱部分质量为 5.0 kg, 叶片切断宽度为 250.0 mm, 飞脱转速为 4000 rpm, 对应角速度为 419 rad/s。叶片断裂飞脱的总动能为 78.86 kJ, 切割索爆炸切断钛合金叶片时的最大附加动能为 500.0 J, 占总动能的 0.63%, 小于 2% 附加动能指标。

(3) 此实验结果适用于预断裂处截面为矩形类型的叶片, 其他类型叶片还需进行验证和确认工作。

### 参考文献 (References)

- [1] 张英明, 韩明臣, 倪沛彤, 等. 航空、航天用钛合金的发展与应用 [C] // 第三届空间材料及其应用技术学术交流会论文集, 2011: 43-49.
- [1] ZHANG Ying-ming, HAN Ming-chen, NI Pei-tong, et al. Development and application of Titanium alloy in aviation and aerospace [C] // Proceedings of the third Space Materials and its Application Technology Academic Exchange Conference, 2011: 43-49. (in Chinese)
- [2] 王乐安. 国外航空发动机风扇叶片及其成形技术 [J]. 航空科学技术, 1995(1): 31-33.
- [2] WANG Le-an. Foreign aero-engine fan blades and their forming technology [J]. Aviation Science and Technology, 1995(1): 31-33. (in Chinese)
- [3] 陈 光. 航空发动机结构设计分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [3] CHEN Guang. Analysis of the aero-engine structure design [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006. (in Chinese)
- [4] 宣海军, 陆 晓, 洪伟荣, 等. 航空发动机机匣包容性研究综述 [J]. 航空动力学报, 2010, 25(8): 1860-1870.
- [4] XUAN Hai-jun, LU Xiao, HONG Wei-rong, et al. Review of aeroengine enclosure inclusion studies [J]. AAP, 2010, 25(8): 1860-1870. (in Chinese)
- [5] 梁春华. RR 公司完成 TRENT900 发动机的叶片包容试验 [J]. 航空发动机, 2003(3): 44.
- [5] LIANG Chun-hua. The RR Company completed the blade inclusion test for the TRENT900 engine [J]. Aeroengine, 2003(3): 44. (in Chinese)
- [6] 郭明明, 吕登洲, 洪伟荣, 等. 航空发动机机匣包容试验叶片飞脱方法 [J]. 航空发动机, 2016, 42(2): 73-76.
- [6] GUO Ming-ming, LU Dengzhou, HONG Wei-rong, et al. Fly stripping method of aero engine case [J]. Aeroengine, 2016, 42(2): 73-76. (in Chinese)
- [7] 郭明明. 航空发动机风扇机匣包容试验叶片爆破飞脱方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [7] GUO Ming-ming. Study on the blasting method of aviation engine fan box [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [8] 张国静. 航空发动机风扇叶片爆破飞脱技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [8] ZHANG Guo-jing. Research on blasting and stripping technology of aero-engine fan blade [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [9] 吕登洲. 航空发动机包容试验中风扇叶片爆破飞脱技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [9] LV Deng-zhou. Research on blasting and stripping technology of fan blade in aero-engine inclusion test [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [10] 陈 刚. 不同装药方式下爆炸分离 TC4 钛合金板的研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
- [10] CHEN Gang. Research on TC4 titanium alloy plate under different loading modes [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [11] 史同承, 江有为, 柴象海. 风扇叶片爆炸飞断等效试验与分析方法 [J]. 推进技术, 2022, 43(2): 392-402.
- [11] SHI Tong-cheng, JIANG You-wei, CHAI Xiang-hai. Equivalent test and analysis method of fan blade explosion and flight break [J]. Propulsion Technology, 2022, 43(2): 392-402. (in Chinese)
- [12] GUNDERSON C O. Study to improve airframe turbine engine rotor blade containment [R]. FAA Report No. FAA-RD-77-44, 1977.
- [13] HEERMANN K F, McCLURE K R, ERIKSSON R H. Study to Improve Turbine Engine Rotor Blade Containment [R]. FAA Report No. FAA-RD-77-100, 1977.
- [14] 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.

- [14] ZHU Yu, WANG Meng, HE Zhi-jie, et al. Study on TC4 titanium alloy plate [J]. *Blasting Equipment*, 2022, 51(3):43-49. (in Chinese)
- [15] WANG Xue-mei, SHI Jun. Validation of Johnson-Cook plasticity and damage model using impact experiment [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 60:67-65.
- [16] 栗保华, 畅 博, 张立建, 等. 装药密度对炸药 JWL 状态方程的影响[J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(1):174-178.
- [16] LI Bao-hua, CHANG Bo, ZHANG Li-jian, et al. Effect of charge density on the explosive JWL equation of state [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(1):174-178.

(上接第 62 页)

- [9] VARDAR O, WEI Chun-chen, ZHANG Cheng-guo, et al. Numerical investigation of impacts of geological faults on coal burst proneness during roadway excavation [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 81(1):1-8.
- [10] REHMAN U J, PARK D, AHN K J. Predicting blast-induced damage and dynamic response of drill-and-blast tunnel using three-dimensional finite element analysis [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(14):6152-6152.
- [11] GUAN Zhen-chang, XIE Li-fu, CHEN Dong, et al. Numerical simulation and field monitoring of blasting vibration for tunnel in-situ expansion by a non-cut blast scheme [J]. *Sensors*, 2024, 24(14):4546-4546.
- [12] 张 伟, 褚夫蛟, 王银刚, 等. 空孔在硬岩光面爆破作用中的试验与应用 [J]. *爆破*, 2023, 40(2):48-52, 137.
- [12] ZHANG Wei, CHU Fu-jiao, WANG Yin-gang, et al. Experiment and application of empty hole in smooth blasting of hard rock [J]. *Blasting*, 2023, 40(2):48-52, 137. (in Chinese)
- [13] 张其虎. 大直径空孔垂直掏槽理论与试验研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [13] ZHANG Qi-hu. Theoretical and experimental study on vertical cutting of large diameter empty hole [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [14] 柴修伟, 李建国, 习本军, 等. 等体积空孔直眼掏槽槽腔形成过程及其分析 [J]. *爆破*, 2020, 37(4):48-52.
- [14] CHAI Xiu-wei, LI Jian-guo, XI Ben-jun, et al. Formation process and analysis of cavity by burn cut with equal volume empty hole [J]. *Blasting*, 2020, 37(4):48-52. (in Chinese)
- [15] 穆兵兵. 空孔对直眼菱形掏槽爆破破岩过程及振动规律影响研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [15] MU Bing-bing. Study on the influence of empty holes on the rock breaking process and vibration law in parallel diamond cut blasting [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [16] 韩 博, 马芹永. 煤矿岩巷毫秒延期爆破振动测试与控制技术研究 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38(2):209-214.
- [16] HAN Bo, MA Qin-yong. Research on testing and controlling techniques of millisecond delay blasting vibration in coal mine rock roadway [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(2):209-214. (in Chinese)
- [17] 宗 琦, 马亚东, 汪海波. 煤矿硬岩巷道掘进大直径炮孔爆破试验研究 [J]. *爆破*, 2017, 34(1):47-51.
- [17] ZONG Qi, MA Ya-dong, WANG Hai-bo. Large diameter hole blasting experimental in hard rock roadway of coalmine [J]. *Blasting*, 2017, 34(1):47-51. (in Chinese)
- [18] 俞祥杰, 袁海平, 熊礼军, 等. 基于三维重构技术的爆破活动对邻近巷道围岩损伤影响分析 [J]. *金属矿山*, 2021, 1(8):46-51.
- [18] YU Xiang-jie, YUAN Hai-ping, XIONG Li-jun, et al. Analysis of the influence of blasting activities on the surrounding rock damage of adjacent roadways based on 3D reconstruction technology [J]. *Metal Mine*, 2021, 1(8):46-51. (in Chinese)
- [19] 陈 祥, 刘明学, 祁小博. 爆破振动作用下大型地下洞室群围岩动力响应及合理间距分析 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40(1):277-285.
- [19] CHEN Xiang, LIU Ming-xue, QI Xiao-bo. Dynamic response of surrounding rock of large underground caverns under blast vibration and reasonable spacing between adjacent caverns [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(1):277-285. (in Chinese)
- [20] 费鸿禄. 爆破理论及其应用 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017:100-121.
- [20] 逢焕东, 高文乐, 郭得福, 等. 饱和水岩体中大断面巷道群的爆破安全研究 [J]. *爆破器材*, 2014, 43(4):47-51.
- [21] PANG Huan-dong, GAO Wen-le, GUO De-fu, et al. Safety research on blasting operation for large dimension rock tunnels saturated by water [J]. *Explosive Materials*, 2014, 43(4):47-51. (in Chinese)