

文章编号: 1003-1480 (2022) 02-0029-06

不同起爆方式对聚能切割效果影响的数值仿真分析

方安明¹, 孔庆亮², 夏治园³

(1. 杭州市市政公用建设开发集团有限公司, 浙江 杭州, 310007; 2. 浙江省第一水电建设集团股份有限公司, 浙江 杭州, 310051; 3. 安徽江南化工股份有限公司, 安徽 合肥, 230000)

摘要: 为研究起爆方式对聚能切割器切割性能的影响, 基于钛合金板聚能切割工况, 采用 AUTODYN 显式动力学分析软件建立三维仿真模型, 对比分析了不同点、线和面起爆条件下钛合金切割效果。结果表明: 采用侧面与上表面同时起爆的面起爆方式切割性能最强; 对比不同起爆方式的金属射流速度、切口处竖直方向应力分布和切口形态, 可以发现两侧线起爆和侧面与上表面起爆模型切面齐整、切口较小, 综合效果较好; 聚能切割器两端切割效果相对较差, 可采用外壳约束或者增加切割器与钛合金板相对长度加以改善。

关键词: 聚能切割; 钛合金; 数值模拟; 边界条件

中图分类号: TJ45+9 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.02.007

Numerical Simulation Analysis of the Influence of Different Initiation Methods on the Effect of Shaped Charge Cutting

FANG An-ming¹, KONG Qing-liang², XIA Zhi-yuan³

(1. Hangzhou Municipal Public Construction and Development Group Co. Ltd., Hangzhou, 310007; 2. Zhejiang First Hydropower Construction Group Co. Ltd., Hangzhou, 310051; 3. Anhui Jiangnan Chemical Co. Ltd., Hefei, 230000)

Abstract: To study the influence of initiation mode on cutting performance of shaped charge cutter, based on the shaped charge cutting condition of titanium alloy plate, a three-dimensional simulation model was established by using AUTODYN explicit dynamic analysis software, and the cutting effect of titanium alloy under different point, line and surface initiation conditions was compared and analyzed. The results show that the cutting performance of side and upper surface initiation is the strongest. By comparing the metal jet velocity, vertical stress distribution at the notch and notch shape of different initiation modes, it can be found that the models of two-side line initiation and side and upper surface initiation have neat sections, smaller notches and better comprehensive effect. The cutting effect of both ends of the shaped charge cutter is relatively poor, which can be improved by using shell restraint or increasing the relative length between the cutter and titanium alloy plate.

Key words: Shaped charge cutting; Titanium alloy; Numerical simulation; Boundary conditions

线性聚能切割技术^[1]形成的射流具有速度快、方向性强、能量密度高等特点^[2], 已被广泛应用于航空航天、石油化工以及爆破拆除等多个领域。国内外诸多学者对切割器结构、参数进行了大量设计优化, 并进一步拓宽了切割器应用领域。李晓杰^[3]针对线性聚

能爆炸切割器的高速碰撞问题建立不可压缩流体模型, 推导获得了爆炸切割射流参数的解析解。肖旅等^[4]对不同力学性能的 VW63Z 镁合金试板进行线性分离试验, 研究了抗拉强度和伸长率对聚能切割性能的影响, 并分析了线性聚能切割机理。曹涛^[5]运用 LS-

收稿日期: 2021-09-22

作者简介: 方安明 (1971-), 男, 高级工程师, 从事隧道工程、桥梁工程施工质量、安全研究及管理。

DYNA 有限元软件模拟了大口径侧向环形切割器两点对称起爆射流成型过程,揭示侧向环形射流3方向速度和形态随切割器圆心角的变化规律。陈锋^[6]通过试验对切割索对接结构和三通传爆管的节点传爆性能和射流分布进行了研究。目前,聚能切割相关研究主要集中于装药量、药型罩材质、锥角等参数的优化上,对起爆方式与切割性能的相关性鲜有探究。

本文基于钛合金板聚能切割模型,使用 AUTODYN 显式动力学数值仿真软件,建立三维 SPH 仿真模型,并对不同点、线、面起爆方式与切割性能相关性进行数值仿真分析。

1 起爆方式

不同的起爆方式会改变炸药内冲击波以及爆生气体的主作用方向,进而改变药型罩的受力状态和射流速度,影响聚能切割效果,本研究设计如图1所示9种起爆方式。

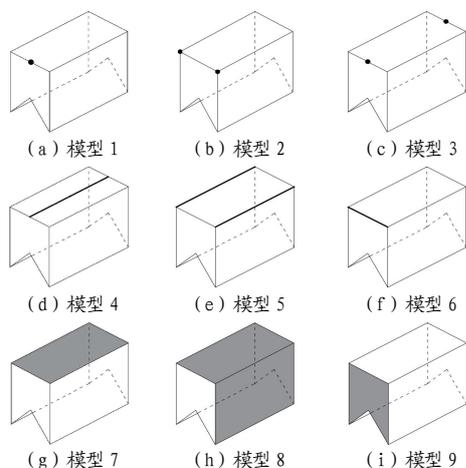


图1 聚能切割器不同起爆方式

Fig.1 Different initiation modes of shaped charge cutter

图1中模型1~3分别为单点起爆方式、两端点起爆方式以及首尾点起爆,起爆点分别设置在聚能切割器上表面一端中点处、上表面一端的两端点处以及首尾端中点处,两点同时起爆。模型4~6分别为中间线起爆、两侧线起爆、一端线起爆,起爆线分别设置在聚能切割器上表面中心线、上表面两侧以及上表面一端端线处。模型7~9分别为上表面起爆、侧面与上表面同时起爆、正面起爆,起爆面分别为聚能切割器上表面、侧面及上表面以及正面。

2 有限元模型的建立

本研究采用非线性显式动力分析软件 AUTODYN^[7]开展仿真模拟研究,基于 SPH 算法广泛运用于固体介质的爆炸冲击、高速碰撞等瞬时高应变的动态响应模型的计算中,并能有效仿真出连续体破碎、断裂、损伤等物理变化的特点,运用 SPH 算法建立三维仿真模型。

2.1 材料模型及参数

仿真模型中采用 COMPB(聚黑/JHL 炸药)作为聚能切割器用药,采用 JWL 状态方程描述反映炸药爆轰时相关物理变化过程。

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

式(1)中: $E = \rho_0 e$,为单位初始体积内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为实验测得常数。

其材料参数如表1所示。

表1 COMP B 炸药参数

Tab.1 Explosive parameters of COMP B								
材料	ρ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	D ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	P (GPa)	A (GPa)	B (GPa)	R_1	R_2	ω
COMP B	1.717	7 980	29.5	524.23	7.678	4.2	1.1	0.34

采用 COPPER(铜)作为药型罩材料,使用 SHOCK 状态方程和 Piecewise JC 本构方程描述其运动状态,材料参数如表2所示。

表2 COPPER 材料参数

Tab.2 Material parameters of copper							
材料	ρ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	尼森 系数	C_1 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	S_1	剪切模 量/MPa	屈服应 力/MPa	最大屈服 应力/MPa
COPPER	8.9	2	3 958	1.497	4.64×10^4	1.2×10^2	4.5×10^2

待切割材料为 TI(6AL-4V),采用 PUFF 状态方程和 VON MISE 本构方程描述材料断裂过程,其材料参数如表3所示。

表3 TI(6AL-4V)的材料参数

Tab.3 Material parameters of Ti(6Al-4V)							
材料	ρ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	尼森 系数	剪切模量 (MPa)	屈服应力 (MPa)	A_1 (GPa)	A_2 (GPa)	A_3 (GPa)
TI(6AL-4V)	4.45	1	5.5×10^4	1.5×10^3	99.4	124.4	48.47

采用 STEEL4340 材料作为切割器外壳,约束炸药能量。

2.2 模型几何参数及 SPH 模型

根据图1中9种起爆方式设置9组三维 SPH 模型(单位 mm-mg-ms),模型几何参数如图2所示。

聚能切割器呈明显的轴对称结构,图2中钛合金板厚 2mm,长 40mm。药型罩厚度为 0.5mm,开

口角度 90°，钢制外壳厚 1mm，炸药形状类似于上底 5.5mm、下底 10.5mm、宽 5mm 的 2 个梯形组成，整体模型宽 10mm。

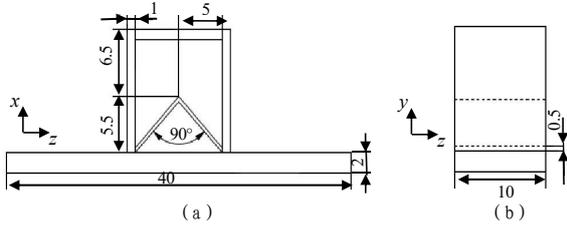


图 2 聚能切割器模型主视图和侧视图 (单位:mm)

Fig.2 Front view and side view of the model of shaped charge cutter
模型各表面均为自由边界，不施加其他边界条件。采用 AUTODYN 自带的起爆设置模块，定义模型 1~9 的起爆方式，如图 3 所示。

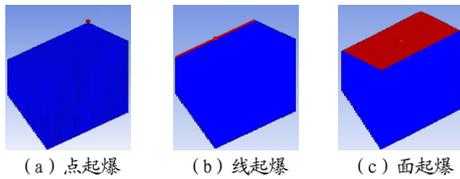


图 3 不同起爆方式设置示意图

Fig.3 Schematic diagram of different initiation modes

SPH 模型如图 4 所示。在对称平面上，沿宽度方向在药型罩顶部内侧、钛合金上、下表面每隔 2mm 设置 1 个 Gauge 点，分别编号 1~6, 7~12, 13~18。

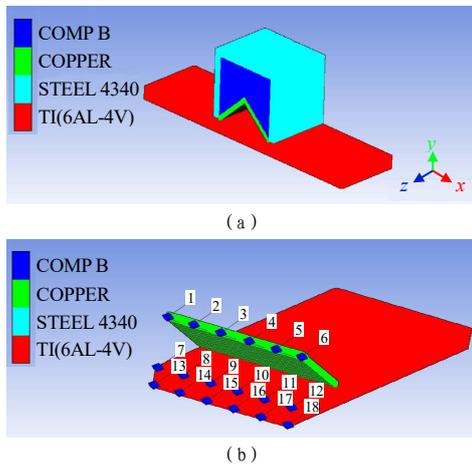


图 4 聚能切割 SPH 模型及 Gauge 点分布
Fig.4 SPH model of shaped charge cutting

3 计算结果分析

3.1 碳纤维切断形态分析

选取药型罩和钛合金板宽度方向 5~6mm 段，观测模型 1~9 中钛合金 0.007ms 时的切断状态，见图 5。

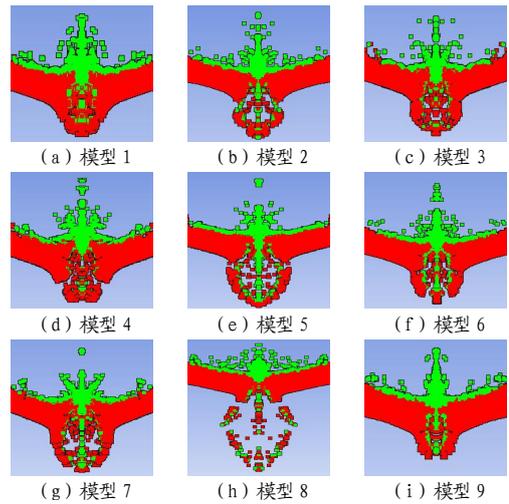


图 5 不同模型切断效果对比

Fig.5 Comparison of cutting effects of different models

由图 5 可以看出，各模型均形成了明显的金属射流，且射流均形成了涡旋，其中模型 2、5、7、8 射流粒子较为集中，钛合金基本完全切断，其中模型 8 侵彻效果最为明显，钛合金切断后，金属射流仍保持较高速度沿竖直方向往下运动，钛合金底部粒子飞散明显。模型 1、3、9 侵彻效果相对较差。

观察钛合金底部粒子运动变化趋势，选取模型 1 中 Gauge 点 13~18，观察其 y 方向速度变化，如图 6 所示。由图 6 可以看出，钛合金板底部粒子在 0.003~0.004ms 区间内，速度发生突变，最低速度约 400m/s，最高可达 1250m/s，之后逐渐趋于恒定，由此可知各底部 Gauge 点均发生飞散，可以判断钛合金完全切断。对比可以发现，Gauge 点 15~17 飞散速度达到 1000m/s 以上，远高于两端 Gauge 点，由此可见，聚能切割器两端切断效果比中心部位差。

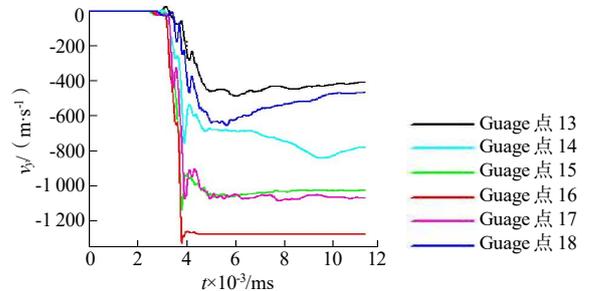


图 6 Gauge 点 13~18 y 方向速度变化曲线
Fig.6 Y-direction velocity change curve of No.13~18 Gauge point

3.2 Gauge 点处速度分析

3.2.1 点起爆方式 Gauge 点处速度变化

进一步分析不同点起爆方式对于金属射流峰值

的影响,如图7所示。由图7可知,金属射流速度呈现中间高、两端低的特点。点起爆条件下,模型2(两 endpoint 起爆)金属射流峰值速度在 Gauge 点3处达到峰值, $v_2=1\ 929\text{ m/s}$,模型1(单点起爆)峰值速度 $v_1=1\ 455\text{ m/s}$,模型3(首尾点起爆)峰值速度 $v_3=1\ 754\text{ m/s}$,可见模型2侵彻能力更强。

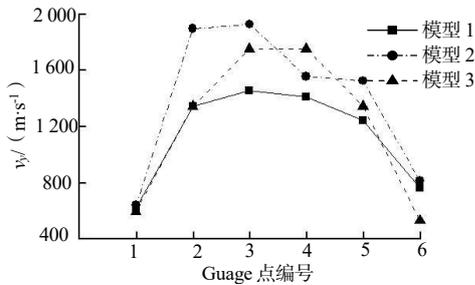


图7 点起爆模型 Gauge1~6点处速度变化
Fig.7 Change of velocity at Gauge point 1~6 of point initiation model

选取 z 轴方向 5~6mm 区间内的炸药,观察其内部压力云图形态,如图8所示。

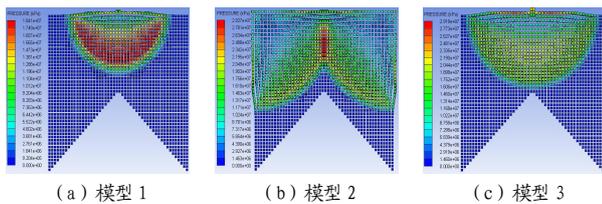


图8 模型1~3选取段压力云图特征

Fig.8 Characteristics of pressure nephogram of selected sections of models 1~3

由图8可以看出,模型1、3压力云图呈现由切割器上表面中点处向下扩散的椭圆形,能量未朝药型罩顶端汇聚,模型2压力云图则为两椭圆形阵面汇聚,会产生竖直向下的合力,正对药型罩顶端。研究表明两 endpoint 起爆可有效汇聚炸药能量至药型罩顶端处,形成较高速射流,增强聚能切割器切割性能。

3.2.2 线起爆方式 Gauge 点速度变化

对比分析不同线起爆模型金属射流速度变化情况,如图9所示。

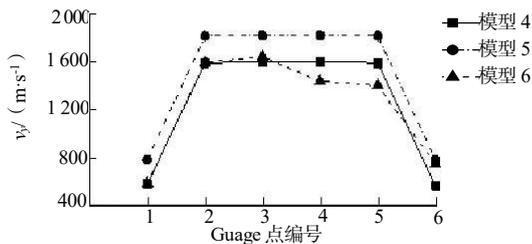


图9 线起爆模型 Gauge1~6点处速度变化

Fig.9 Change of velocity at Gauge 1~6 of line initiation model

由图9可知,模型4(中间线起爆)、模型5(两侧线起爆)和模型6(一端线起爆)射流峰值速度分别达到 $v_4=1\ 599\text{ m/s}$, $v_5=1\ 815\text{ m/s}$, $v_6=1\ 639\text{ m/s}$,模型5射流速度最高。除两端外,模型4、5中射流速度较为均匀,均在 $1\ 600\text{ m/s}$ 和 $1\ 800\text{ m/s}$ 浮动。

进一步选取模型 $y-z$ 对称面处炸药,观察模型4~6中炸药的炸药的压力云图特性,如图10所示。由图10可以看出,模型4、5贴近药型罩处压力分布均匀,压力云图扩散运动趋势沿 y 负方向射流速度较为一致,整体性较好,有利于形成光滑的切口,而模型6则朝 z 向运动,与药型罩顶部接触存在时间差,形成的射流速度不均匀,整体性较差。

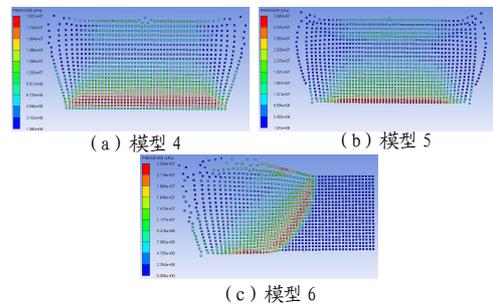


图10 模型4~6 $y-z$ 对称面炸药内压力云图

Fig.10 Pressure nephogram of explosive in $y-z$ symmetry plane of model 4~6

3.2.3 面起爆方式 Gauge 点速度变化

对比分析不同面起爆模型的金属射流速度变化,如图11所示。

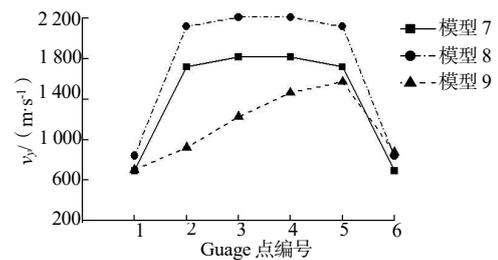


图11 面起爆模型 Gauge1~6点处速度变化

Fig.11 Change of velocity at Gauge 1~6 of surface initiation model

由图11可以看出,模型8(侧面与上表面起爆)峰值速度明显提升, $v_8=2\ 209\text{ m/s}$,中部各 Gauge 点速度均在 $2\ 200\text{ m/s}$ 左右,速度较为均匀。而模型7(上表面起爆)峰值速度 $v_7=1\ 815\text{ m/s}$,模型9(正面起爆) $v_9=1\ 572\text{ m/s}$,射流速度较低,侵彻效果相较于模型8较差。对比各起爆方式与金属射流峰值速度,可以看出采用侧面与上表面同时起爆方式的聚能切

割器的切割性能最为显著。

3.3 碳纤维 y 方向应力分析

进一步分析碳纤维表面应力分布情况, 选取模型 1~3 中 Gauge7~12 点的 y 方向应力, 如图 12 所示。

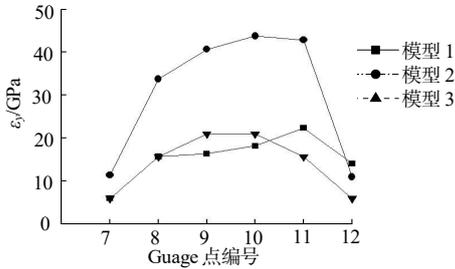


图 12 模型 1~3 中 7~12 号 Gauge 点 y 方向应力
Fig.12 Stress in y direction of Gauge point 7~12 in model 1~3

由图 12 可以看出, 点起爆条件下, 切割器两端 y 方向应力较小, 模型 3 中两端 Gauge 点处 y 方向应力为 5.97GPa, 高于钛合金破坏强度 (1.5GPa), 钛合金完全切断。模型 1 和 3 中间部分 y 方向峰值应力在 15~20GPa 范围内, 模型 2 峰值应力在 30~45GPa 范围内。观察模型 1~3 切口状态, 如图 13 所示。

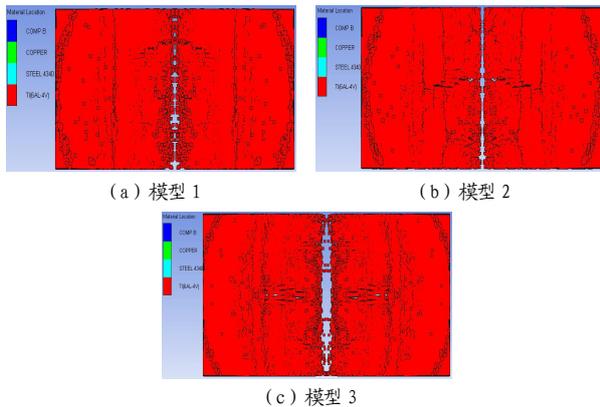


图 13 模型 1~3 切口形态
Fig.13 The shape of incision in model 1~3

由图 13 可以看出, 模型 2 中钛合金切口较为齐整, 开口较小, 对钛合金上表面冲击破坏较小, 表明射流整体较窄, 速度较快, 炸药能量较为集中; 模型 1、3 切口相对较大, 切口处粒子飞散较明显, 射流形态相对较差, 炸药能量集中程度降低。由此可见, 点起爆方式中, 采用两 endpoint 起爆方式切割效果最好。

进一步分析碳纤维表面应力分布情况, 选取模型 4~6 中 Gauge7~12 点的 y 方向应力, 如图 14 所示。由图 14 可知, 线起爆模型中, 钛合金两端 y 方向应力仍相对较低, 在 5~15GPa 范围内, 但均高于钛合

金屈服应力。模型 5 中 y 方向峰值应力为 47.1GPa, y 方向应力较为均匀, 均在 40~48 GPa 范围内, 模型 4、6 中间部分 y 方向应力在 20~30 GPa 之间。

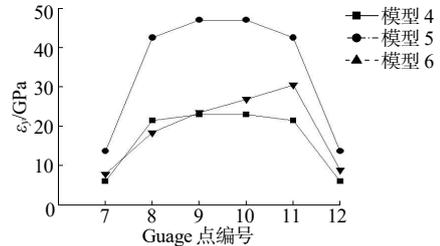


图 14 模型 4~6 中 7~12 号 Gauge 点 y 方向应力
Fig.14 Stress in y direction of Gauge point 7~12 in model 4~6

模型 4~6 钛合金切口如图 15 所示。由图 15 可知, 模型 4、5 中切口较为齐整, 无过度的粒子飞散现象, 模型 6 中切口存在部分钛合金残留, 切口不均匀, 切口宽度相对较大。由此可见, 线起爆方式中, 采用两侧线起爆方式切割效果相对较好。

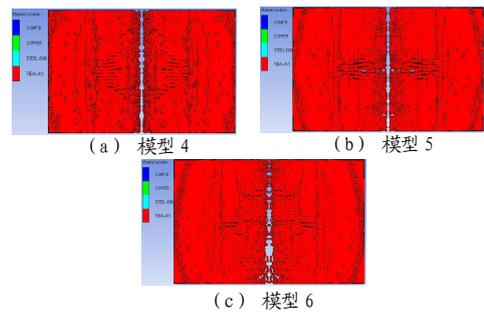


图 15 模型 4~6 切口形态
Fig.15 The shape of incision in model 4~6

进一步分析碳纤维表面应力分布情况, 选取模型 7~9 中 Gauge7~12 点的 y 方向应力, 如图 16 所示。

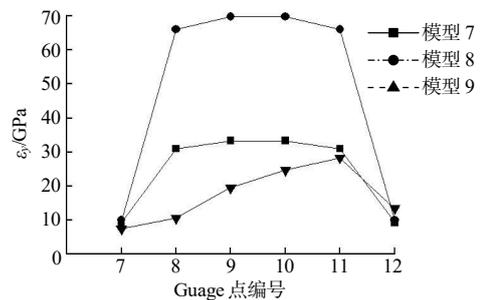


图 16 模型 7~9 中 7~12 号 Gauge 点 y 方向应力
Fig.16 Stress in y direction of Gauge point 7~12 in model 7~9

由图 16 可知, 面起爆模型中, 模型 8 中 y 方向峰值应力最高, 可达到 69.8 GPa, 较线起爆和点起爆模型都高。模型 7 和模型 9 中 y 方向峰值应力均在 30 GPa 左右。

进一步观察模型7~9切口形态,如图17所示。由图17可知,模型7与模型4较为类似,中部各点 y 方向应力峰值较为平均,易产生均匀的切割面,但模型7中炸药能量较为分散,切口明显偏大,粒子飞散较明显。模型8切口宽度较小,粒子无明显飞散,模型9切割效果相对较差,切口不明显。

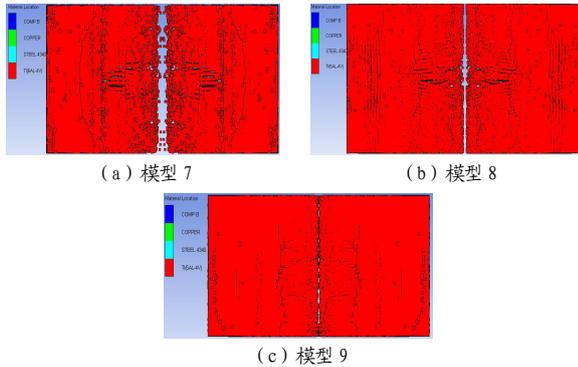


图17 模型7~9切口形态

Fig.17 The shape of incision in model 7~9

综合考虑起爆模型的射流速度和 y 方向峰值应力,可以发现采用模型8中的面起爆方式射流速度最快,切断性能更好,适用于切断较厚的硬质金属板材,同时切口较为齐整。此外,可以发现射流两端速度和钛合金板两端应力峰值均明显低于中部,切割效果较差,宜在聚能切割器两端添加约束外壳或增加切割器与钛合金的相对长度,从而提高聚能切割器两端的切断效果。

4 结论

(1) 对比分析不同点起爆、线起爆和面起爆方式可以发现:采用侧面与上表面起爆方式金属药型罩射流速度最快,对钛合金的破坏作用最强,切断性能

最佳。

(2) 对比分析不同起爆方式 y 方向峰值应力以及切口形态,可以发现采用两端点起爆、中间线起爆、两侧线起爆和侧面与上表面起爆时,切口均较为齐整,其中两侧线起爆和侧面与上表面起爆综合效果最好。

(3) 对比各点射流峰值速度和 y 方向应力发现,切割器两端切割性能较差,可采用金属外壳约束或增大切割器与待切割板材的相对长度以增强钛合金两端的切割效果。

参考文献:

- [1] 夏治园,王猛,王志富,等.聚能切割钛合金板数值模拟及优化设计[J].火工品,2020(4): 57-60.
- [2] 罗勇,沈兆武,崔晓荣.线性聚能切割器的应用研究[J].含能材料,2006(3): 236-240,160.
- [3] 李晓杰,闫鸿浩,王小红,等.线型聚能切割爆破的理论研究[J].工程爆破,2021,27(1): 1-13.
- [4] 肖旅,周海涛,汪彦博,等.VW63Z铸造镁合金线型分离性能及切割机理研究[J].特种铸造及有色合金,2021,41(1): 11-15.
- [5] 曹涛,顾文彬,詹发民,等.侧向环形聚能切割器射流成型特性研究[J].兵器材料科学与工程,2017,40(2): 81-86.
- [6] 陈锋,曹始发,王晓勇,等.聚能切割T形节点传爆性能研究[J].火工品,2021(2):10-12.
- [7] KATSUMI TANAKA. Numerical studies of explosive welding by SPH[J]. Materials Science Forum, 2008, 93(1132): 61-64.
- [8] 石少卿,汪敏,孙波,等.工程动力分析及应用实例[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.