

文章编号: 1003-1480 (2021) 02-0013-03

切割索爆炸冲击波的试验及数值模拟研究

陈亚红¹, 李岩², 郭永辉², 琚泽宇¹, 苟瑞君¹

(1. 中北大学环境与安全工程学院, 山西 太原, 030051; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京, 100076)

摘要: 为了控制切割索工作时的附带损伤, 对带橡胶护套切割索切割平板工件工况下的背向压力进行了测试, 建立该工况下的数值模型并进行了仿真。仿真结果中射流侵彻深度与试验结果一致, 而空气冲击波压力低于相应的实测值, 分析认为其原因为实测值为传感器迎风面的反射压, 仿真结果为空气自由场压力。最后得到了该工况条件下切割索背向压力估算的平面比距离公式。

关键词: 切割索; 爆炸冲击波; 峰值压力; 数值模拟

中图分类号: TJ45+9 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.02.004

Test and Numerical Research of Blast Wave of Shaped Charge Cutting Cables

CHEN Ya-hong¹, LI Yan², GUO Yong-hui², JÜ Ze-yu¹, GOU Rui-jun¹

(1. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051; 2. Beijing Institute of Aerospace Engineering, Beijing, 100076)

Abstract: In order to control the future low lateral damage, the shock wave pressures on the back direction of work-piece from the shaped charge cutting cable, which was protected by rubber sheath, were tested. Numerical simulation was carried out for the cutting test. The results show that the simulated cutting depth is consistent with the test result, while the simulated peak pressures of shock wave are lower than the test ones, the reason for that the tests recorded the reflected pressure on windward of the pressure sensors, and the simulated results were those of free air flow field. An empirical plane scaled distance equations is suggested for the calculations of peak explosion pressure of cutting cable for the specific case.

Key words: Shaped charge cutting cable; Blast wave; Peak pressure; Numerical simulation

目前, 爆炸切割索在工程切割领域尤其是在航天分离技术领域已有广泛应用^[1]。已有的线性切割研究中, 切割效果或机理方面较多^[2-3], 对附带损伤研究较少。然而, 切割索爆炸后形成射流对工件进行切割, 同时其外壳碎裂飞溅并伴有空气冲击波向外传播。尽管截面尺寸为毫米级的小型切割索的能量较低, 但在一定距离内仍具有毁伤能力, 可能对工件附近的精密仪器或重要部件造成损伤。有学者研究了铅壳柔爆索爆炸后铅粒子的冲量^[4], 但目前关于切割索背向冲击波毁伤元的特性和毁伤能力还缺乏系统研究。

一般情况切割索的长度远大于其截面尺寸, 在忽略外壳条件下可将切割索爆炸近似看作平面点源爆炸问题, 进而求解冲击波压力的解析解^[5]。由于平板工件的存在, 需要对解析解进行修正才能正确反映冲击波的分布及演化规律。此外, 实际切割索具有外壳、保护套或其他附件, 被切割工件表面可能有局部结构等, 这些均可影响冲击波流场的分布及演化, 难以用解析法进行定量分析, 需借助数值模拟方法。

本文对小型切割索切割平板的爆炸压力场进行数值模拟及试验验证, 根据模拟及试验结果提出用于

收稿日期: 2020-11-24

作者简介: 陈亚红(1975-), 男, 讲师, 主要从事爆炸防护技术研究。

工程估算切割索背向冲击波压力的经验公式,为小型切割索附带损伤控制提供支持。

1 试验

铝合金 (Al 2A14-T6) 平板工件长 520 mm、宽 160 mm,被切割处厚度为 4 mm。切割索装药为 HMX,线密度 3.73 g/m,截面面积 2.80 mm²,外壳为铅铋合金。切割索用橡胶护套固定在平板工件上。

冲击波测试系统及工装为中北大学仪器与电子学院自制,采用美国 PCB 公司 113B 系列 ICP 传感器,采样率 1 MHz,量程 1~3.4 MPa。沿工件纵向等间距设 1#~4#共 4 个测点,由可调空心螺栓固定,第 1 发时下端面 (即压力传感器迎风面) 与工件被切割面的距离分别为 30 mm, 50 mm, 70 mm 及 90 mm,第 2 发时分别为 40 mm, 50 mm, 70 mm 及 90 mm。试验在中北大学爆炸洞内进行,现场及切割结果照片如图 1 所示。试验结果显示射流切割深度在 1.8~2.2 mm 之间,但工件被完全分离。试验重复 1 次,2 次各测得 1#和 3#测点的有效数据。

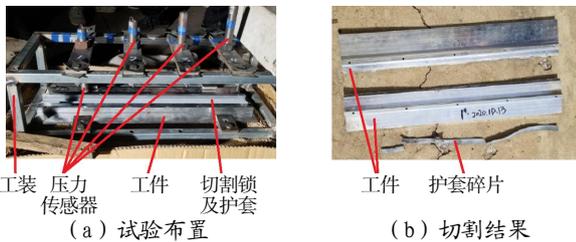


图 1 试验布置及切割结果
Fig.1 Test configuration and result

2 数值模拟

应用冲击动力学模拟软件 Autodyn 对相应的爆炸切割进行了模拟。为了减小计算量,沿模型纵向方向取 0.25 mm 并沿该方向划分单层网格 (即采用准二维模型)。其中工件和橡胶护套使用 Lagrange 求解器,流体部分使用 3D-Euler 多物质求解器,流固之间采用自动全耦合算法。流体域尺寸为 104 mm × 70 mm × 0.25 mm,内部括空气、炸药及铅壳。数值模型如图 2 所示,在切割索背向设置监测点阵,间距 10 mm。

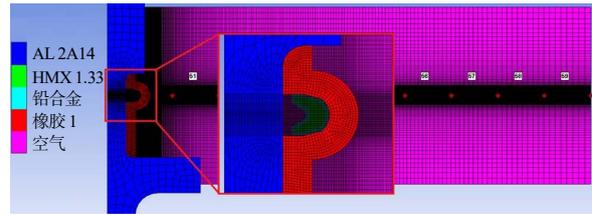


图 2 数值仿真模型
Fig.2 Numerical simulation model

工件材料为 Al 2A14-T6,为了反映材料的应变率效应,使用 Johnson-Cook 强度模型,材料的动态屈服强度为:

$$\sigma_y = (\sigma_b + H \varepsilon_p^n) (1 + R \ln \varepsilon_p^*) (1 - T_H^m) \quad (1)$$

式 (1) 中: σ_y 为动态屈服强度; σ_b 为材料的静态屈服强度; H 为硬化常数; R 为应变率常数; m 为热软化指数; n 为硬化指数; ε_p 为有效塑性应变; ε_p^* 为有效塑性应变相对应变率; T_H 为相对温度, $T_H = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$, 其中 T 为计算温度, T_{melt} 为熔点, T_{room} 为室温。Al 2A14-T6 的材料参数见表 1。

表 1 Al 2A14-T6 材料参数
Tab.1 Material parameters of Al 2A14-T6

$\rho /$ (g·cm ⁻³)	$c /$ (m·s ⁻¹)	s	$G /$ GPa	$\sigma_b /$ MPa	$H /$ MPa	R	m	n	T_H / K
2.785	5.328	1.338	27.6	420	350	0.01	0.41	1.0	1.493

为了反映材料的侵彻及断裂,依据断裂伸长率设置主拉应变大于 0.16 时材料失效。

炸药爆轰产物使用 JWL 状态方程:

$$p = A \left(1 - \frac{w\eta}{R_1} \right) \exp\left(-\frac{R_1}{\eta}\right) + B \left(1 - \frac{w\eta}{R_2} \right) \exp\left(-\frac{R_2}{\eta}\right) + w\eta E \quad (2)$$

式 (2) 中: p 为压强; ρ 为密度; E 为比内能; $\eta = \rho / \rho_0$ 为相对密度; A, B, R_1, R_2, w 为相关参数。计算得切割索中 HMX 装药密度为 1.33 g/cm³,应用 Expol 5 软件^[6]计算了其爆轰参数,如表 2 所示。

表 2 HMX 装药爆轰参数
Tab.2 Detonation parameters of HMX charge

$\rho_d /$ (g·cm ⁻³)	$\rho_{c,d} /$ GPa	$D /$ (m·s ⁻¹)	$E /$ (kJ·m ⁻³)	$A /$ GPa	$B /$ GPa	R_1	R_2	w
1.33	18.14	7.236	8.12×10^6	520	15.8	5.3	1.55	0.383

切割索外壳为铅铋合金,密度为 11.3 g/cm³,在爆炸作用下可看作流体,使用无强度模型。橡胶护套材料为硅橡胶,密度 1.0 g/cm³,使用超弹性状态方程及强度模型。空气使用理想气体状态方程,密度 1.225×10^{-3} g/cm³,绝热指数 1.4,比内能 2.068×10^5 J/kg。

3 结果及讨论

数值模拟切割深度约 1.9 mm, 与试验结果一致, 表明数值模型的合理性。模拟与试验结果如表 3 所示。

表 3 冲击波峰值压力试验与模拟结果对比

Tab.3 Comparison of peak pressure of shock wave between test and simulation

测点/mm	30 (试验 1)	40 (试验 2)	70 (试验 1)	70 (试验 2)
$p_{\text{试验}}/\text{MPa}$	2.025	1.999	1.193	1.188
$p_{\text{模拟}}/\text{MPa}$	1.055	0.959	0.616	0.616
$p_{\text{试验}}/p_{\text{模拟}}$	1.919 4	2.084 5	1.936 7	1.928 6

由表 3 可知, 实测结果与模拟结果差别较大, 但随距离的变化趋势一致。两者差别较大的原因是实测结果为传感器迎风面的反射压, 而数值模拟结果为自由场压力, 两者间的关系可用反射系数表示。由冲击波刚壁正反射规律可计算反射系数:

$$K = \frac{p_2}{p_1} = \frac{(3k-1)p_1 - (k-1)p_0}{(k-1)p_1 + (k+1)p_0} \quad (3)$$

式 (3) 中: K 为反射系数; p_0 为波前压力; p_1 为入射压力; p_2 为反射压力; k 为绝热指数。取 $k=1.4$, $p_0=0.1$ MPa, 入射压取模拟结果, 计算得 30 mm, 40 mm, 70 mm 处的反射系数分别为 5.04, 4.86, 3.97。但表 3 中实测反射系数接近 2.0。式 (3) 是针对平面冲击波在无限大刚性壁面反射情况, 而本文试验中冲击波阵面近似圆柱面, 传感器的迎风面很小, 且刚性不足 (固定在薄壁框架上)。另一方面, 试验中测试系统及工装会对冲击波流场产生干扰。综合以上原因, 试验中的反射系数低于理论计算值。

依据模拟结果拟合冲击波峰值压力衰减曲线, 由于无限长条装药爆炸可看作平面点源爆炸, 拟合式中以平面比例距离代替比例距离, 得到该工况下切割索背向冲击波峰值压力的变化规律为:

$$p = 0.200 5 + \frac{15}{Z}, \quad 5 < Z < 45 \quad (4)$$

式 (4) 中: p 为冲击波峰值压力, MPa; Z 为平面比例距离, $\text{mm}^{3/2} \cdot \text{mg}^{-1/2}$ 。

$$Z = r / \sqrt{M}, \quad M = M_0 E_0 / E_{\text{TNT}} \quad (5)$$

式 (5) 中: r 为冲击波传播距离, mm; M_0 、 M 分别为炸药的平面质量及其 TNT 当量, mg/mm ; E_0 和 E_{TNT} 分别为所用炸药及 TNT 的单位质量爆轰能量 (可用爆热近似)。拟合曲线及数据点如图 3 所示。

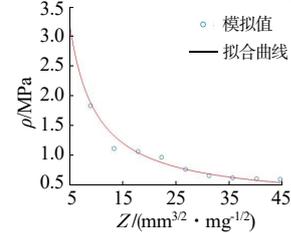


图 3 冲击波峰值压力模拟值及拟合曲线
Fig.3 Fitted curve of simulated peak pressure vs plane scaled distance

4 结论

通过测试和数值模拟, 对小型切割索背向爆炸流场压力进行了研究, 得到以下结论: (1) 对装药线密度 3.73g/m HMX 铅壳切割索带橡胶护套切割平板工况背向压力进行了测试, 30 ~ 40 mm 距离处的冲击波峰值压力实测约为 2MPa, 至 70mm 处降至约 1.2 MPa。(2) 模拟结果约为实测结果的 1/2, 由于实测结果为反射压, 反射系数约为 2。(3) 利用模拟结果得到了该工况下的峰值压力衰减曲线。

参考文献:

- [1] 宋保永, 卢红立, 阳志光, 等. 分离结构在冲击载荷作用下的破坏机理研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(S2): 102-106.
- [2] 陈继强, 褚恩义, 吴瑞德, 等. 靶板硬度对线型聚能切割索侵彻效应的影响[J]. 火工品, 2018(6): 9-13.
- [3] 周庆, 李艺, 曹维国. 铝管状态对切割索性能的影响研究[J]. 火工品, 2018(2): 32-34.
- [4] 赵国民, 张若棋, 彭常贤, 等. 铅壳柔爆索冲量作用下圆柱壳体结构响应实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(2): 126-131.
- [5] 周毓麟. 一维非定常流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [6] SUCESKA M. Explo 5 User Guide, V6.04[M]. OZM, 2017.