

文章编号: 1006-9941(2011)04-0454-05

柔性线型聚能切割器的应用研究

蒋耀港¹, 沈兆武¹, 龚志刚¹, 倪小军¹, 翁奉权²

(1. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027; 2. 安徽舜泰世纪爆破工程有限责任公司, 安徽 合肥 230001)

摘要: 从聚能射流形成及侵彻理论出发,总结了影响聚能射流穿深的因素,根据这些因素的分析及工程实际条件,设计并制造了一种铅质外壳柔性线型聚能切割器,对 10 mm 厚的 45# 钢板和斜支撑上截取的钢板进行聚能切割实验,发现线密度为 $158 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$,炸高为 2.4 mm 的柔性线型聚能切割器完全贯穿 45# 钢板和斜支撑上截取的钢板;把此种柔性线型聚能切割器应用到钢管塔架立窑爆破拆除的斜支撑处理中,该柔性线型聚能切割器完全贯穿了斜支撑厚壁空心钢管,确保了结构倒塌方向无误,成功地辅助了钢管塔架爆破拆除的实施。

关键词: 爆炸力学; 聚能装药; 柔性线型聚能切割器; 钢板穿深; 钢管构筑物拆除

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.023

1 引言

从 1792 年工程师 Franz Von Baader 在假设中提到聚能现象以来^[1],聚能效应的研究与应用从未间断,而且越来越丰富,特别是在军事方面的研究应用。20 世纪 40 年代^[1],民用工程上开始采用聚能装药技术,随后聚能爆破在民用工程中的应用范围越来越广,如石油开采方面的聚能穿孔、打捞沉船时聚能切割船体、建筑石方开采方面的聚能切割^[2]等,但是利用聚能切割辅助大爆破的成功实施却未查到相关文献,因为辅助大爆破时聚能切割须面对一些高强度、复杂轮廓、厚壁面的结构,采用铜等硬质材料作为药型罩的切割器不易弯曲,而一般柔性的聚能切割器面对高强度材料时侵彻深度又有限^[3]。因此,本课题组设计并研制了一种铅质外壳柔性聚能切割器,该切割器具有足够侵彻能力,可以满足此类工程需要。

2 柔性聚能切割器的实验研究

为了提高工程聚能切割效果,需要对聚能切割影响因素进行简单回顾,以便有效指导聚能切割条的制作。

收稿日期: 2010-09-28; 修回日期: 2010-11-16

基金项目: 安徽省教育厅安徽省高等学校省级自然科学基金重大项目(KJ2010ZD03)

作者简介: 蒋耀港(1983-),男,博士,从事现代爆破技术研究。

e-mail: jiangyg6@mail.ustc.edu.cn

2.1 聚能切割影响因素

影响聚能切割效果的因素主要有炸药性能,药型罩的材料、形状、锥角、壁厚,炸高,隔板,药包壳体,聚能药包形状几何参数以及靶板材料有关^[4]。由经典流体力学理论^[5],把药型罩形成射流的过程当做理想不可压过程,并假设炸药为瞬时爆轰,药型罩的壁面同时平行地向轴线压合,由此可推导出射流速度与射流质量关系如式(1)、(2)所示:

$$v_j = v_0 \cot \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

$$m_j = m \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

式中, v_j 为射流速度, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; m_j 为射流质量, g ; α 为药型罩半锥角, ($^\circ$); m 为罩元质量, g ; v_0 为压合速度, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。

由式(1)、(2)可以看出,射流速度 v_j 随着药型罩锥角的减少而增大,随着压合速度的增大而增大,射流质量则随着锥角的减小而减小。压合速度 v_0 由冲量定理式(3)可得:

$$\int p dt = m v_0 \quad (3)$$

由式(3)可知,压合速度与炸药爆轰压力和作用时间有关,而作用时间与聚能切割器的壁厚有关,假定聚能装药炸药爆轰为 C-J 爆轰,则炸药爆轰压力由式(4)可得^[6]:

$$p_{C-J} = \frac{1}{\gamma + 1} \rho_0 D^2 \quad (4)$$

式中, $p_{C,J}$ 为炸药的 C-J 爆轰压力, Pa; γ 为介质等熵指数, ρ_0 为聚能药包装药密度, $g \cdot mm^{-3}$; D 为爆轰速度, $mm \cdot \mu s^{-1}$ 。爆轰速度由式(5)可得^[7]:

$$D = \sqrt{2(\gamma^2 - 1)Q_v + C_0^2} + \sqrt{2(\gamma^2 - 1)Q_v} \quad (5)$$

式中, Q_v 为炸药的爆热, J; C_0 为声速, $mm \cdot \mu s^{-1}$ 。

综合式(3)、(4)、(5)可知,随着炸药爆热的增加,炸药的爆轰速度增大,爆轰压力也随之增加,压合速度增大,射流速度增加。由式(1)、(2)可知,随着罩锥角的增大,射流速度减少,而射流质量增大,由式(6)可知,射流速度的减少直接影响到射流的穿深。因此为了提高射流质量,可选用高能炸药制作聚能药包,设法提高聚能药包的装药密度,并选用合适的射流锥角。

由文献[5,8]可知,考虑靶板材料强度的聚能射流靶板穿深按准定常不可压缩流体理论计算,由式(6)得:

$$L = (H + b) \left\{ v_j \frac{T_0}{T} \left[\frac{T_0 + \sqrt{T_0^2 - (1-c)^2 v_{jc}^2}}{T + \sqrt{T^2 - (1-c)^2 v_{jc}^2}} \right]^{1/\gamma} - 1 \right\} \quad (6)$$

$$T = -cv_j + \sqrt{cv_j^2 + (1-c)v_{jc}^2} \quad (7)$$

$$T_0 = -cv_{j0} + \sqrt{cv_{j0}^2 + (1-c)v_{jc}^2} \quad (8)$$

$$v_{jc} = \sqrt{\frac{2p}{\rho_j}} \quad (9)$$

$$c = \frac{\rho_t}{\rho_j} \quad (10)$$

式中, L 为聚能射流在靶板内的穿深, mm; H 为炸高, mm; b 为聚能穴高度, mm; v_j 为射流速度, $mm \cdot \mu s^{-1}$; p 为靶板材料强度, Pa; ρ_t 为靶板材料密度, $g \cdot mm^{-3}$; ρ_j 为射流密度, $g \cdot mm^{-3}$; v_{j0} 为射流头部速度, $mm \cdot \mu s^{-1}$; v_{jc} 为临界射流速度, $mm \cdot \mu s^{-1}$ 。

由式(6)可知,随着炸高与聚能穴高度的提高,聚能穿深增大^[9],随着射流速度、射流密度的增加,射流穿深也随之增大,而随着靶板材料强度与密度的提高^[3,10],射流穿深减小。但是考虑射流断裂,炸高对聚能射流穿深有两个方面的影响,一方面在小炸高下,随着炸高的提升,穿深增大;另一方面在大炸高下,随着炸高的提升,穿深减小。而且炸高又受药型罩锥角、炸药性质等的影响。综合上述分析:实际工程应用中,主要靠选用高能炸药,提高装药密度、选用延展性较好的高密度聚能罩材料,在小炸高下适当调节聚能穴底部宽度、高度与炸高来提高工程聚能效果。

2.2 实验分析

为了提高聚能切割效果,实验采用黑索今(RDX)

作为线型聚能切割器的主装药;由于所需切割的物体形状是圆环形的,因此需要采用可随意弯曲的柔性聚能切割器,即聚能切割器的外壳和聚能穴材料应选用柔性材料,而由式(3)可知,外壳材料强度越大,增加了炸药对药型罩的作用压力与作用时间,导致聚能罩所获得的压垮速度越大,聚能效果越好;由式(6)可知,聚能罩密度越大,聚能穿深越大,靶板材料强度与密度的越大,聚能穿深越小。因此综合考虑上述因素,试验与工程应用都采用铅质材料作为聚能切割器的壳体与药型罩以达到较好的聚能效果。线型柔性聚能切割器采用拉拔机制作,制作流程及工艺如图1所示,拉拔后的柔性线型聚能切割器如图2所示。

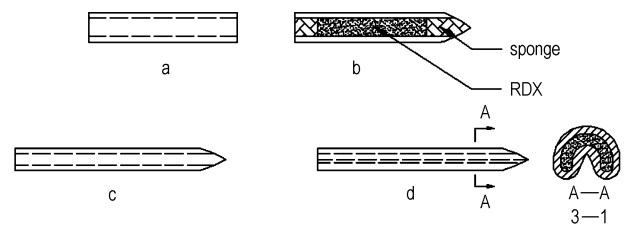


图1 线型聚能切割器制作流程图

a—选用空心铅管, b—中心装药, c—过模多次拉拔, d—加楔形模具二次拉拔成型

Fig. 1 Flow chat of making the flexible and linear shaped charge cutter

a—chose the hollow leaden tube, b—dynamite was filled in the middle of tube, both sides was jammed by sponge, one side sealed, the other side contraction orifice, c—the charged leaden tube was drawn by mold several times, d—the charged leaden tube was drawn by wedge-shaped mold and formed up



图2 拉拔成形的柔性线型聚能切割器

Fig. 2 Flexible and linear shaped charge cutter after drawing

截取已制作的多种型号聚能切割器,采用胶带把它们粘贴在10 mm厚的45#钢板上和从待爆破塔架的钢管斜支撑上截取的一小块长×宽×壁厚为200 mm×200 mm×10 mm的钢板上,导爆管雷管对心起爆,进行聚能切割实验,实验共分5组,每组实验都是在上一组实验结果总结分析的基础上对聚能切割器性能参数进行改进后的聚能切割实验。实验情况及

结果如图3、图4和表1所示。

由图4与表1试验可知,随着线装药密度的不断增大,柔性线型聚能切割器的穿深也随之增大;随着炸高、聚能穴宽度与高度的提高,聚能切割器的穿深也随之增大,但是达到一定炸高后,由于射流发散,使得切割器穿深反而降低。当线密度达到 $158 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$ 、炸高为 2.4 mm 时,铅质外壳聚能切割器能够完全贯穿 10 mm 厚的 $45^\#$ 钢板和待聚能切割的斜支撑上的钢板。

3 工程应用

某水泥厂内一座钢管塔架立窑结构需要爆破拆除,塔架高约 75 m ,重约 1000 吨 ,长为 16 m ,宽为 16 m 。塔架由四根主立柱和 8 根三角斜立柱支撑,主立柱由直径 70 cm ,壁厚为 18 mm 的空心钢管内浇筑高强度混凝土组成,斜立柱由直径 48 cm ,壁厚为 10 mm 的空心钢管组成,实际结构如图5所示,局部放大结构如图6所示。

表1 聚能切割实验结果

Table 1 Results of linear shaped charge cutter experiments

No.	steel plate	linear density of charge/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$	blasting height /mm	bottom width of energy cavity/mm	height of energy cavity/mm	depth of penetration/mm
1	$45^\#$	80	1.6	5	2.5	3.5
2	$45^\#$	107	2	5	2.5	5
3	$45^\#$	107	2+7	9	4.5	2.7
4	$45^\#$	158	2.4	9	4.5	10 (penetration)
5	inclined brace	158	2.4	9	4.5	10 (penetration)

爆炸拆除塔架立窑的主支撑后,考察塔架立窑的斜支撑稳定性。首先考察斜支撑的压杆稳定,压杆稳定的柔度系数可由式(11)表示^[11]:

$$\gamma = \frac{\mu L}{\sqrt{I/A}} \quad (11)$$

式中, γ 为杆柔度; μ 是与支承情况有关的长度系数,这里取 0.5 ; L 为支撑杆长度,一层取 12 m ,二层取 14 m ; I 为支撑杆横截面对中心轴的惯性矩; A 为杆截面积。

代入系数计算可得:一层 γ 为 36 、二层 γ 为 42 ,均小于 γ_0 (优质碳钢为 60),因此爆炸拆除主支撑后,斜支撑杆不会出现压杆失稳。然后考察斜支撑的抗弯屈服强度与抗剪切强度,为了简化计算,初步估算斜支撑的稳定性,假定塔架主支撑爆破后由 8 根斜支撑支撑,重力均匀分布在其斜支撑上,忽略杆自身重力,因此单根斜支撑的受力图如图7a所示,斜支撑底部截面应力如图7b所示,由图7及上述假设可知:

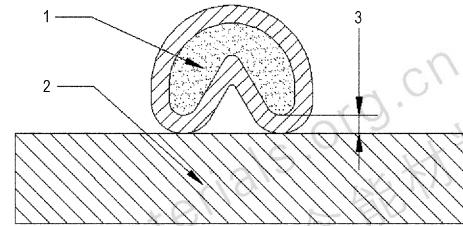


图3 聚能切割实验情况

1—线性聚能切割器, 2—钢板, 3—炸高

Fig. 3 Details of linear shaped charge cutter experiments

1—the flexible and linear shaped charge cutter, 2— $45^\#$ steel plate, 3—blasting height

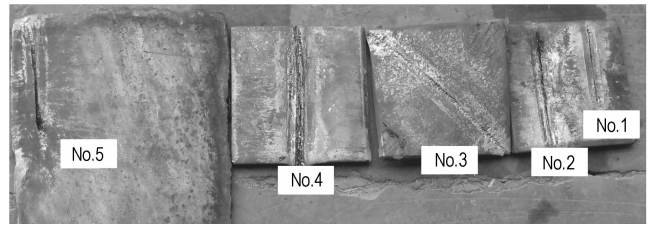


图4 聚能切割实验结果

Fig. 4 The results of linear shaped charge cutter experiments

$$F = G/8 = 1250 \text{ kN}, F_1 = F \sin \theta = 117.2 \text{ kN},$$

$$F_2 = F \cos \theta = 427.4 \text{ kN} \quad (12)$$

压应力

$$\sigma = F_1 / A = 79.6 \text{ MPa} < [\sigma] \quad (13)$$

弯矩

$$M = F_2 \times L = 5128.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

弯曲强度

$$\sigma_{\max} = M/W = MR/I = 3.077 \text{ GPa} \gg [\sigma] \quad (14)$$

最大切应力

$$\tau_{\max} = 2F_2 / A = 57.92 \text{ MPa} < [\tau] \quad (15)$$

由式(13)、(14)、(15)可知,塔架立窑的主支撑被爆破后,塔架立窑的钢管斜支撑将发生弯曲破坏,塔架发生失稳,但由于四面都有支撑,因此失稳过程不可控,塔架立窑倒塌方向不能确定。由于塔架立窑四周有待保护的变电厂、食堂、分析室等,因此必须确保爆破一次成功、塔架立窑失稳过程可控、倒塌过程整体结

构不能过分解体、倒塌方向无误。由上述分析可知,为了防止塔架立窑倒塌方向的1层与2层斜支撑爆后支撑住塔架,迫使塔架悬而不倒;或塔架四向失稳,倒塌方向变化不定,需要在主支撑爆破过程中对1层与2层预定倒塌方向的斜支撑进行聚能切割爆破处理。爆破前把柔性线型聚能切割器固定在1层与2层预定倒塌方向的斜支撑中部位置,固定情况如图8所示。爆后查验聚能切口位置,发现切口位置整齐,聚能切割切口情况如图9所示。从爆破倒塌过程与爆堆情况来看(如图10和图11所示),塔架立窑顺利倒塌,倒塌方向无误,塔架立窑在倒塌过程中没有解体,着地后由于高速冲击地面,地面反作用力迫使结构发生解体。

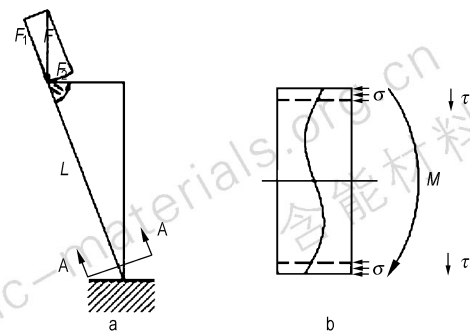


图7 斜支撑受力图及应力图

Fig.7 Force diagram and stress diagram of the skew brace



图5 塔架立窑实际结构

Fig.5 Structure of the tower shaft kiln

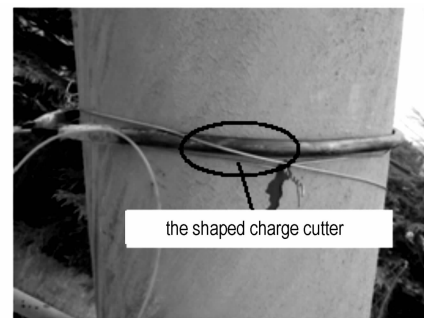


图8 柔性线型聚能切割器的固定

Fig.8 Fixed flexible and linear shaped charge cutter

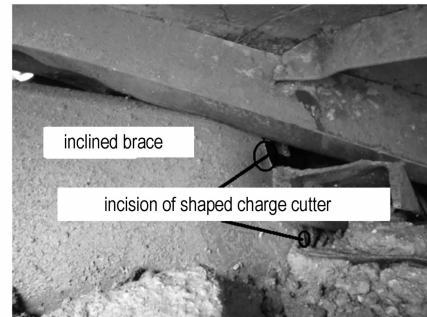


图9 聚能切口

Fig.9 Cut of shaped charge cutter

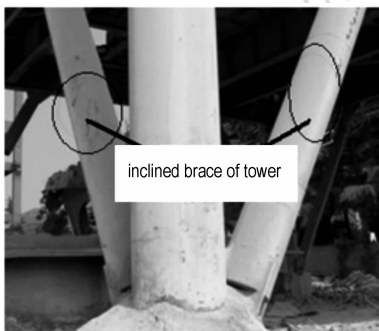


图6 结构局部放大图

Fig.6 Local amplification of structure



图10 钢塔架立窑倒塌瞬间

Fig.10 Collapse moment of the tower shaft kiln



图 11 钢塔立窑爆堆情况

Fig. 11 The muck pile of the tower shaft kiln

4 结 论

由试验研究可知,线密度为 $158 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$,炸高为 2.4 mm 的铅质外壳柔性线型聚能切割器完全贯穿 10 mm 厚的 $45^\#$ 钢板,其穿深性能较好,能够满足一般聚能切割工程的需要,且实用柔性线型聚能切割器由于其柔展性较好,能够满足物体特殊曲面(圆形面等)切割需求。由工程实践结果证明,采用线密度为 $158 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$,炸高为 2.4 mm 的柔性线型聚能切割器完全贯穿 10 mm 厚的优质碳素结构钢管,使得铁塔立窑结构按设计方向失稳、倒塌,爆破拆除取得圆满成功。因此对于大爆破,为了确保爆破一次成功、失稳过程可控、倒塌方向无误,需要对一些不能预处理的钢结构构件(关乎结构整体稳定性)进行爆破处理时,可以采样此类柔性线型聚能切割器处理,辅助大爆破的实施。

Application Study of Flexible and Linear Shaped Charge Cutter

JIANG Yao-gang¹, SHEN Zhao-wu¹, GONG Zhi-gang¹, NI Xiao-jun¹, WENG Feng-quan²

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. Anhui Shuntai-Shiji blasting Co. Ltd, Hefei 230001, China)

Abstract: The influence factors on the penetration depth of shaped charge jet were summed up by analyzing the formation of shaped charge jet and penetration. According to the factors and the condition of engineering practice, a sort of the flexible and linear shaped charge cutter was designed. The target steel plate with the thickness of 10 mm was penetrated through by the linear density $158 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$ and blasting height 2.4 mm of the flexible and linear shaped charge cutter with lead shell from experiments. This type of cutter was used for cutting inclined brace steel tube in the steel tower blasting demolition that made an accurate collapse. Finally, the inclined brace steel tube with thick wall was penetrated through by the cutter, the direction of collapse was inerrability and the steel tower blasting demolition was very success.

Key words: explosion mechanism; shaped charge; flexible and linear shaped charge cutter; penetration depth of the steel plate; demolition of the steel building

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.023

参考文献:

- [1] 庙延钢,张智宇,栾龙发,等. 特种爆破技术[M]. 北京: 冶金工业出版社,2004: 154-158.
- [2] LUO Yong, SHEN Zhao-wu. Study on orientation fracture blasting with shaped charge in rock[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*,2006,13(3): 1-6.
- [3] Dikshit S N, Kutumbarao V V, Sundararajan G. The influence of plate hardness on the ballistic penetration of thick steel plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*,1995,16(2): 293-320.
- [4] Held M. Liners for shaped charges [J]. *Journal of Battlefield Technology*,2001,4(3): 1-6.
- [5] 顾红军,刘宏伟. 聚能射流及防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 3-10.
- [6] 苟瑞君,赵国志,杜忠华,等. 炸药能量与聚能射流凝聚性探讨 [J]. *弹箭与制导学报*,2004,24(5): 476-478. GOU Rui-jun, ZHAO Guo-zhi, DU Zhong-hua, et al. Research on explosive energy and agglomeration of jet [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*,2004,24(5): 476-478. 炸药系列教材编审委员会炸药理论编写组. 炸药理论[M]. 北京: 国防工业出版社,1982: 121-122.
- [7] 炸药系列教材编审委员会炸药理论编写组. 炸药理论[M]. 北京: 国防工业出版社,1982: 121-122.
- [8] 北京工业学院八系爆炸及其作用编写组. 爆炸及其作用(下册) 爆炸对目标的作用及穿甲作用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 127-143.
- [9] Svirsky O V, Kovalev N P, Klopov B A, et al. The shaped charge jet interaction with finite thickness targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*,2001,26(1-10): 443-447.
- [10] Gooch W A, Burkins M S, Walters W P, et al. Target strength effect on penetration by shaped charge jets [J]. *International Journal of Impact Engineering*,2001,26(1-10): 243-248.
- [11] 党锡康,张根芳,吉梅. 工程力学[M]. 南京: 东南大学出版社, 1995: 195-202.