

doi: 10.7690/bgzd.2014.03.006

无后坐力爆炸物销毁器身管强度分析

龚建华, 邢春洪, 乔晓辉, 李慧

(武警特种警察学院反劫持装备技术北京市重点实验室, 北京 102211)

摘要: 为了满足大口径无后坐力爆炸物销毁器一体化、轻量化设计要求, 建立一种基于非线性有限元方法的无后坐力爆炸物销毁器瞬态动力模型。依据无后坐力爆炸物销毁器两端对称的结构特点和膛压变化过程, 理论分析了其身管强度, 并采用非线性有限元方法, 对身管整体强度进行数值仿真及验证。结果表明: 新型无后坐力爆炸物销毁器身管在一体化设计的前提下, 整体强度满足材料弹性极限要求, 并且具有足够的安全系数, 弹仓部可以减少其壁厚, 以实现其轻量化。该研究为大口径无后坐力爆炸物销毁器和排爆机器人身管的设计提供理论依据。

关键词: 非制式爆炸物; 销毁器; 无后坐; 爆炸物处理

中图分类号: TJ530.89 **文献标志码:** A

Strength Analysis on Recoilless Improvised Explosive Device Disruptor Tube

Gong Jianhua, Xing Chunhong, Qiao Xiaohui, Li Hui

(Beijing Key Laboratory of Anti-hijack Equipment Technology, Special Police Academy of CAPF, Beijing 102211, China)

Abstract: In order to meet the requirement of the integration and light weight design on the recoilless improvised explosive device (IED), the transient dynamics model was established by the nonlinear finite element method. According to the symmetrical structure and chamber pressure of the recoilless IED disruptor, the strengths were obtained by the theoretical analysis and verified by the nonlinear finite element model. The results illustrated that the maximum strength meets the material elastic limit requirement and the thickness of the tube could be diminished under the requirement of the light weight, which provided theoretical foundation for the heavy caliber recoilless IED disruptor and explosive ordnance disposal (EOD) robot.

Keywords: improvised explosive device (IED); destruction device; recoilless; explosive ordnance disposal (EOD)

0 引言

非制式爆炸物一直是恐怖活动、危害公共安全刑事犯罪中一种常见的袭击手段^[1]。无后坐力爆炸物销毁器(水炮枪)在销毁非制式爆炸物时, 使用水作为分解介质, 具有取材方便、快捷、安全、分解彻底、无后坐力等优点, 是处置非制式爆炸物时使用的主要装备之一。其工作原理是利用火药燃烧产生高温、高压气体快速推动水等介质, 猛烈冲击非制式爆炸物, 使爆炸物的外包装、炸药、电源和起爆装置快速分解, 从而使其失去爆炸性能。

但是, 现有的爆炸物销毁器一般为小口径(< 20 mm), 仅满足于小型的非制式爆炸物的销毁, 比如邮件炸弹或者小型包裹爆炸物等, 并不满足大型的非制式爆炸物的销毁, 比如行李箱爆炸物等。因此, 为满足外形较大爆炸物的排除和遂行任务的要求, 笔者研制了大口径、一体化、轻量化的无后坐力爆炸物销毁器。

1 无后坐力爆炸物销毁器结构特点

由于无后坐力爆炸物销毁器膛压较低($P_m \leq$

30 MPa), 故身管壁薄, 与迫击炮、无后坐力火炮一样, 同属于薄壁身管范畴, 但与无后坐力火炮、普通火炮不同的是^[2-3]: 当无后坐力火炮执行压制任务, 发射榴弹时其发射速度较快, 最大发射速度可达 10 发/min 左右, 其身管温度上升较快; 而无后坐力爆炸物销毁器执行非制式爆炸物销毁任务时, 事发现场一般仅有一枚 IED, 只需要发射一次, 不存在连发情形; 因此, 在强度设计时可以不考虑身管温升问题。同时, 由于药室径向尺寸较小, 在保证发射强度和内堂结构合理的情况下, 为了便于加工、勤务保管和安装, 身管与药室做成一体, 形成整体式身管。因为无后坐力爆炸物销毁器身管两端完全对称, 所以不需采用拉瓦尔喷管消除后坐。

无后坐力爆炸物销毁器主要由身管、前堵头、前密封件、后堵头、后密封件、压弹帽、起爆弹和填充水等组成, 如图 1 所示。身管采用滑膛方式。为了便于密封件出炮口后快速分解, 前堵头、后堵头采用海绵材质, 前密封件、后密封件采用塑料材质。在前堵头和前密封件之间、后堵头和后密封件之间都注满水, 为了保证在发射过程中, 销毁器不发生倾倒和后坐等现象, 前、后注水的容积一致。

收稿日期: 2013-11-10; 修回日期: 2013-12-10

作者简介: 龚建华(1981—), 男, 山西人, 硕士, 讲师, 从事反劫持装备的系统建模、仿真和设计研究。

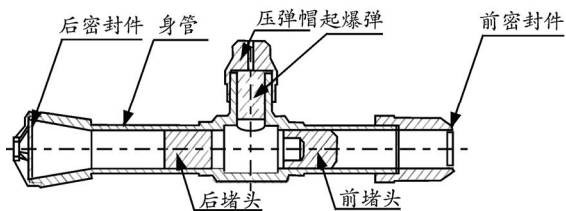


图 1 无后坐力爆炸物销毁器剖面图

2 无后坐力爆炸物销毁身管强度理论分析

目前，常用的静强度设计理论主要是根据厚壁圆筒理论和强度理论导出来的。但是，对于无后坐力爆炸物销毁器中间弹仓部位，由于结构的特殊性，不能进行强度设计。从图 1 中可以看出：无后坐力爆炸物销毁器身管壁厚最薄处，发生在两端，而药室结构相对特殊；因此，应以分析身管两端强度为主。无后坐力爆炸物销毁器常温下的膛压测试曲线如图 2 所示，其最大膛压为 30 MPa。

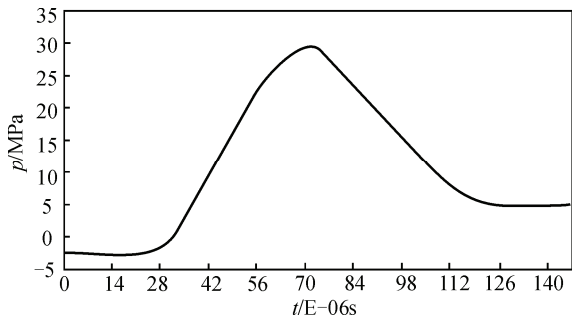


图 2 无后坐力爆炸物销毁器膛压测试曲线

根据单筒身管的受力情况和厚壁圆筒理论，在只有内压力 p 单独作用时，危险点在管的内壁上。3 个主应力表达式^[4-5]分别为：

$$\begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_t &= p \cdot \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \\ \sigma_2 = \sigma_z &= 0 \\ \sigma_3 = \sigma_r &= p \end{aligned} \quad (1)$$

其中： σ_t 为身管内表面的切向应力； σ_z 为身管内表面的轴向应力； σ_r 为身管内表面的径向应力。

采用第二强度理论(最大线应变理论)，其强度准则为

$$\sigma_{d2} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

对于无底的圆筒，当 $\mu=1/3$ 时，有

$$\sigma_{d2} = \frac{2}{3} p \cdot \frac{2r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (3)$$

采用第四强度理论(形变比能理论，von Mises 应力)，其强度准则为：

$$\sigma_{d4} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4)$$

化简后，得

$$\sigma_{d4} = p \cdot \frac{\sqrt{3r_2^4 + r_1^4}}{r_2^2 - r_1^2} \quad (5)$$

在身管设计中，苏联和我国多采用第二强度理论的身管弹性强度极限公式，美国则采用第四强度理论的身管强度极限公式^[4]。在膛压为 30 MPa 的条件下，内径为 40 mm，外径为 50 mm 时，按第二强度理论，计算身管的最大应力为 147 MPa；按第四强度理论，计算身管的最大应力 154 MPa，均小于身管材料的弹性强度极限。

3 数值仿真及结果分析

3.1 数值仿真

为了保证非制式爆炸物销毁任务的顺利完成和操作人员的人生安全，要求无后坐力爆炸物销毁器在发射过程中，不允许出现炸膛、身管内壁出现烧蚀等影响射击安全现象，很有必要对整个身管进行强度的校核；因此，需要分析整个身管的强度。由于结构的对称性，利用 ANSYS 软件，建立其 1/2 有限元模型，其采用 SOLID 92 划分网格，如图 3 所示。依据实测其内弹道膛压曲线，加载瞬态压力，以确定整个身管的强度是否满足使用要求。

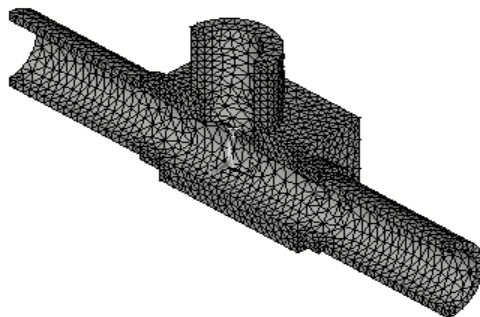


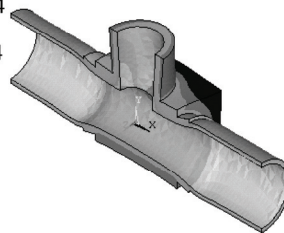
图 3 无后坐力爆炸物销毁器有限元网格模型

其动态应力如图 4~图 8 所示。

NODAL SOLUTION



STEP=8
SUB=6
TIME=0.740E-04
SEQV (AVG)
DMX=0.203E-04
SMN=174854
SMX=0.231E+09

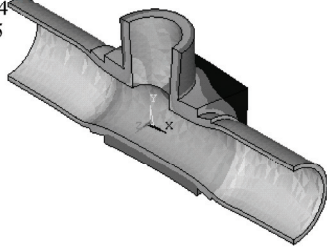


174854 0.514E+08 0.103E+09 0.154E+09 0.205E+09
0.258E+08 0.771E+08 0.128E+09 0.180E+09 0.231E+09

图 4 最大膛压时，von Mises 应力分布图

NODAL SOLUTION

STEP=8
SUB=6
TIME=0.740E-04
EPTOEQV (AVG)
DMX=0.203E-04
SMN=0.135E-05
SMX=0.00105

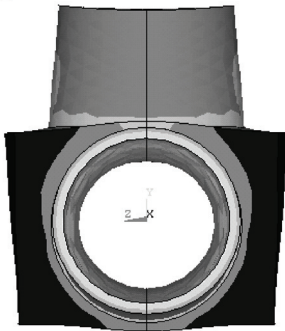


0.135E-05 0.234E-03 0.467E-03 0.700E-03 0.933E-03
0.118E-03 0.351E-03 0.584E-03 0.817E-03 0.00105

图5 最大膛压时，von Mises 总应变分布图

NODAL SOLUTION

STEP=8
SUB=6
TIME=0.740E-04
/EXPANDED
SEQV (AVG)
DMX=0.203E-04
SMN=174854
SMX=0.231E+09



174854 0.514E+08 0.103E+09 0.154E+09 0.205E+09
0.258E+08 0.771E+08 0.128E+09 0.180E+09 0.231E+09

图6 最大膛压时，von Mises 总应变分布侧视图

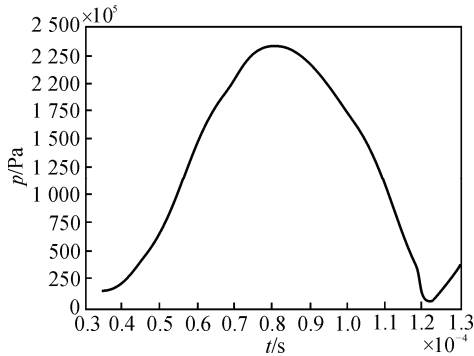


图7 弹仓头部应力最大处，应力变化过程

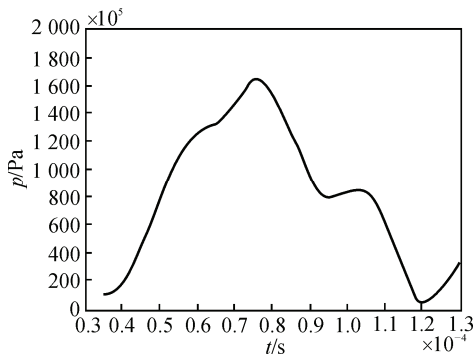


图8 身管内壁，应力变化过程

3.2 结果分析

从图4~图8可看出，无后坐力爆炸物销毁器在身管内壁和弹仓头部应力和变形最大。在时间74 μs达到最大膛压时，弹仓头部应力最大为234 MPa；身管内壁应力最大为165 MPa，静态应力计算值比按第四强度准则高了7.14%。无后坐力爆炸物销毁器在弹仓部应力比较低，最大应力仅有24.2 MPa。从图9也可以发现，其应变主要发生在径向，为0.75E-03 m；因此，可以减少弹仓部位壁厚，以满足轻量化和排爆机器人机械手的设计要求。

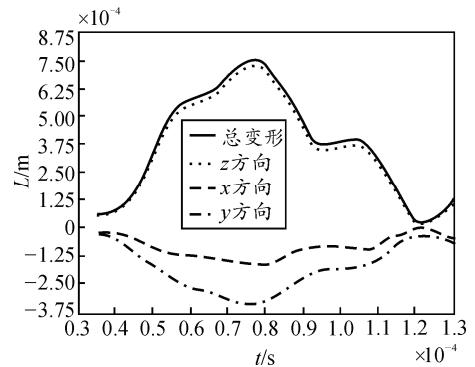


图9 身管内壁总形变及x,y,z方向形变变化过程

4 结束语

从无后坐力爆炸物销毁器身管强度的理论分析和数值仿真中得到的应力、应变的变化过程及其最大值，可以看出其受力和应变都满足材料弹性极限的要求，并且具有足够的安全系数。此结果为大口徑无后坐力爆炸物销毁器和排爆机器人的身管一体化、轻量化设计提供了理论依据。

当然，身管的强度分析应该同时考虑材料的表面缺陷^[6]、烧蚀磨损^[7]、使用寿命等。这些都将是下一步研究的重点。

参考文献：

- [1] 朱益军. 安检与排爆[M]. 北京：群众出版社，2004，26-28.
- [2] 曾志银，宁变芳，王在森. 身管动态应力有限元求解方法[J]. 兵工学报，2005(26): 725-728.
- [3] 徐亚栋，钱林方，陈龙焱. 复合身管非线性热弹性有限元分析[J]. 兵工学报，2007(28): 1428-1432.
- [4] 吴承鉴，张莺. 无后坐炮设计[M]. 北京：兵器工业出版社，1994: 136-156.
- [5] 曾志银，张军领，吴兴波. 火炮身管强度设计理论[M]. 北京：国防工业出版社，2004: 27-29.
- [6] 李亚东，李坚，等. 基于有限元仿真的火炮身管外表面缺陷分析[J]. 系统仿真学报，2008(22): 6097-6102.
- [7] 欧阳青，于存贵，张延成. 国内外火炮身管烧蚀磨损问题研究进展[J]. 兵工自动化，2012，31(6): 44-49.