

杆式射流微元应力特性数值仿真

杜焯^{1,2}, 冯顺山¹, 李强¹, 周彤¹

(1. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 中北大学 机电工程学院, 山西, 太原 030051)

摘要: 应用 LS-DYNA 动力学仿真软件及示踪点测试技术, 对球缺型罩形成杆式射流的过程及不同位置微元所受应力随时间变化的规律进行了仿真研究. 通过分析药型罩顶部微元受轴向应力的二次峰值及持续时间、射流与杆体交界处微元等效应力、药型罩轴线上外侧微元与内侧微元应力差等参数, 得到罩微元应力分布与杆式射流成型性的关系. 结果表明当罩锥角在 $100^{\circ} \sim 110^{\circ}$ 时, 药型罩壁厚取 $0.07d$ 时可得到成型性较好的杆式射流.

关键词: 杆式射流; 数值仿真; 示踪点; 应力

中图分类号: TJ 410.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2015)增刊 2-0136-05

DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.增刊 2.033

Numerical Simulation and Calculation of Pressure and Temperature of the Composite Rod-Like Jet Micro-Elements

DU Ye^{1,2}, FENG Shun-shan¹, LI Qiang¹, ZHOU Tong¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract: Using the LS-DYNA dynamics simulation software and tracer testing technology, the formation process of jet formed by hemispherical shaped charge liner and the pressure of micro-elements changing with time were simulated. With research of the parameters of the axial stress's second peak value and duration of micro-elements on the top of liner, equivalent stress of micro-elements on the border of jet and slug and stress difference of micro-elements inside and outside of axis, the relationships between the stress distribution and rod-like jet formation of micro-elements were obtained. The results show that when the cone angle is in the range of 100 to 110 degrees and the wall thickness is $0.07d$, the better rod-like jet can be obtained.

Key words: rod-like jet; numerical simulation; trace; stress

目前, 国内外学者对杆式射流的研究大多集中在射流宏观形态及速度梯度上, 对通过调整药型罩结构来改变杆式射流速度及长径比较为关注, 而对药型罩结构与罩微元成型过程中所受应力场之间的关系研究极少^[1-2]. 由于材料在不同的应力场下会产生不同的动态响应, 因此, 研究药型罩形成杆式射流过程中的应力场变化规律对研究射流成型性有着重大意义.

由于射流有效飞行距离往往不足 2 m, 该范围内受到装药起爆的冲击影响很大, 因此通过试验手

段很难得到射流内部应力场的变化规律, 更无法对固定射流微元进行跟踪监测. 若运用有限元数值仿真方法, 则可模拟出药型罩材料在大变形复杂条件下的几何形状和受力分布, 通过示踪点标记手段分别对药型罩上固定微元和拉格朗日点上的应力场进行跟踪监测, 从而得到杆式射流形成过程中的应力变化规律. 本文通过对不同结构的药型罩进行仿真, 结合已有的射流形态和速度梯度等判断方法分析出影响杆式射流成型性能的微元受力因素, 再由不同罩结构得到的罩微元所受应力变化规律来反推

收稿日期: 2015-03-20

作者简介: 杜焯(1979—), 女, 讲师, 博士生, E-mail: 29872858@qq.com.

出有利于形成优质杆式射流的药型罩结构,为药型罩结构的设计提供参考依据。

1 杆式射流成型动态仿真

1.1 模型构建

运用 LS-DYNA 动力学仿真软件构建三维 1/4 球缺型药型罩仿真模型,数值模型由炸药、药型罩、空气以及壳体组成。采用欧拉网格建模,其中炸药、药型罩、空气采用 ALE 算法,空气边界采用无反射边界条件消除边界效应,壳体采用拉格朗日算法。药型罩、炸药、空气与壳体之间考虑流固耦合。起爆方式采用顶部单点起爆。有限元模型及网格分布如图 1 所示。

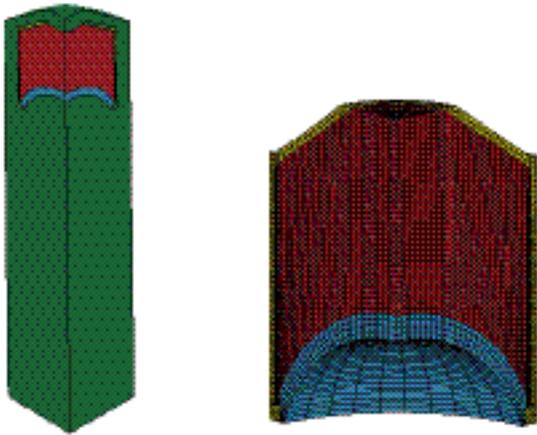


图 1 数值仿真模型
Fig. 1 Model of numerical simulation

1.2 材料模型及参数

1.2.1 炸药

计算中选用炸药类型为 8701 炸药,材料模型为高能炸药爆轰模型,状态方程为 JWL 状态方程^[3],相关参数见表 1,其基本的形式为

$$p = A \left[1 - \frac{\omega}{R_1 v} \right] e^{-r_1 v} + B \left[1 - \frac{\omega}{R_2 v} \right] e^{-R_2 v} + \frac{\omega E}{v} \quad (1)$$

表 1 8701 炸药计算参数

Tab. 1 Parameters of 8701 explosive

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	E_0 / GPa	p_{CJ} / GPa	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω
1.787	8 390	9.0	34	581.4	6.80	4.1	1.0	0.35

1.2.2 药型罩与壳体

药型罩与壳体均选用 Johnson-Cook 材料模型^[4],参数如表 2 所示。

表 2 药型罩及壳体参数

Tab. 2 Parameters of shaped charge liner and wall thickness

部件	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$C_v / [\text{J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}]$	A / MPa	B / MPa	n	C	m
罩	4.05	758	238	58.5	0.77	0.090	1.00
壳	7.80	477	1 200	510	0.26	0.014	1.03

1.3 示踪点测试技术

在药型罩截面沿母线方向上取 4 组动态示踪点,每组沿壁厚方向在罩外表面、罩中心、罩内表面各取一个点,如图 2 所示。

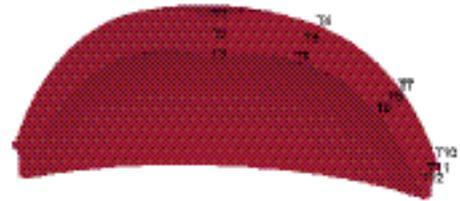


图 2 药型罩动态示踪点选取方案
Fig. 2 Dynamic tracer point of shaped charge liner

2 计算结果及分析

2.1 杆式射流成型过程分析

图 3 直观地反映出射流成型过程中不同时刻药型罩微元的运动规律,图 4 从数值角度反映了示踪微元轴向运动的 $y-t$ 关系,90 μs 时,点 1,4,7 出现在杆体上,点 3,6,9 出现在射流头部及前端,点 2,5,8 出现在射流中部,点 10,11,12 则在射流尾裙部分出现,说明球缺型药型罩顶部内表面的微元构成了射流的头部,杆体由药型罩外表面微元组成,而药

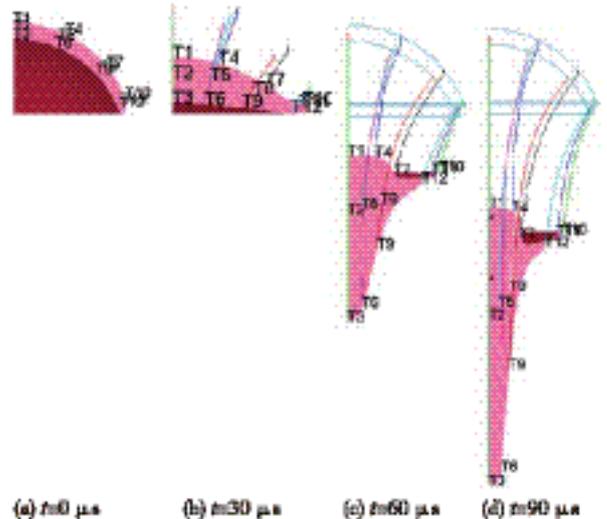


图 3 杆式射流成型过程微元运动规律
Fig. 3 Motion characteristics of differential elements in the jet formation process

型罩底部圆周部分的微元形成了射流的尾裙. 点 1 和点 3 分别出现射流的头尾两段, 而点 10, 11, 12 在形成射流后彼此距离很近, 说明越靠近药型罩顶部的微元组形成射流后轴向距离越大.

2.2 杆式射流成型性影响因素分析

图 4 所示为药型罩顶部 3 个动态示踪点 1, 2, 3 的轴向应力随时间变化情况, 可见轴向应力在 $12 \mu\text{s}$ 时达到了峰值, 随后快速下降至 0. 示踪点各微元的压力峰值由药型罩外表面到内表面逐渐减小, 药型罩外表面示踪点 1 压力峰值达 21.2 GPa, 而内表面示踪点 3 压力峰值仅为 3.2 GPa, 约为示踪点 1 的 1/7.

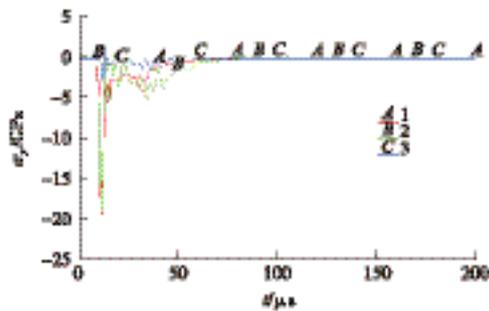


图 4 药型罩顶部微元轴向应力随时间变化
Fig. 4 Changes of the liner upper tracer axial stress with time

由图 5 可以看出, 药型罩顶部微元 1 在 $12 \mu\text{s}$ 时达到了压力峰值, 随后快速下降直至 0, 而从 $30 \mu\text{s}$ 开始, 示踪点 1 的压力曲线出现了二次峰, 持续了 $10 \mu\text{s}$, 说明在该过程点 1 受到两侧微元汇聚到轴向上的集中挤压作用, 那么该二次峰的峰值和持续时间则可以表征药型罩外侧微元向轴线汇聚的能力, 该能力越强, 则越可以实现射流头部和尾部的同步性, 使得射流两端速度差减小, 射流连续性增强. 如果可以将该峰值控制在一定的范围内, 则可以得到长度适中、速度适中的优质杆式射流.

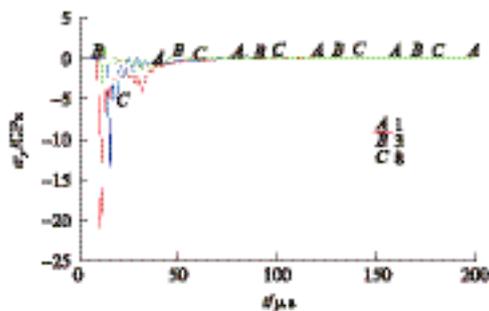


图 5 示踪点轴向应力分布
Fig. 5 Axial stress of the tracer element

由图 3 可看出药型罩中间的微元同时要受到径

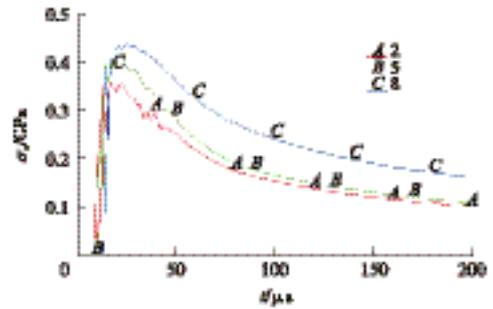


图 6 药型罩中层动态示踪点等效应力
Fig. 6 Equivalent stress of central liner dynamic tracer

向挤压碰撞作用和轴向压垮、拉伸作用, 不能用单轴应力表示各微元受力情况. 因此, 选用 Mises 等效应力对微元力学响应情况进行描述. 示踪点 8 处于射流与杆体的交界面, 在初始阶段受到的等效应力峰值主要由爆轰波对其轴向压垮而产生, 该值与点 1 压力峰值越接近, 说明形成射流尾部与杆体的一致性越好. 由图 6 发现药型罩中层示踪点的等效应力在到达峰值后缓慢下降到一个稳定值, 该值是衡量射流中后部分稳定性的重要指标; 该值越高则说明射流尾部和杆体结合越紧密, 保持在高水平挤压碰撞的动态过程中, 则射流整体的连贯性越好.

通过上述对不同微元的受力分析可以得到球缺药型罩形成优质杆式射流的受力影响因素:

- ① 示踪点 1 的二次峰的峰值和作用时间;
- ② 示踪点 8 的等效应力曲线;
- ③ 示踪点 1 与 3 的压力峰值差.

下面将结合上述因素分析不同药型罩等效锥角和壁厚对杆式射流成型的影响.

2.3 不同等效锥角药型罩形成射流微元受力分析

按照相同口径相同壁厚设计了 $50^\circ, 90^\circ, 96^\circ, 104^\circ, 108^\circ, 114^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ 不同等效锥角的药型罩方案, 其中 50° 与 150° 药型罩分别作为形成常规射流和 EFP 对照方案. 按照图 2 所示的取点方法, 得到不同等效锥角药型罩示踪点 8 等效应力如图 7 所示.

从图 7 中可以看出, 当等效锥角为 50° 时, 由于射流尾部过早拉断导致示踪点 8 受到的等效应力快速降低接近于 0, 当等效锥角为 120° 和 150° 时, 由于示踪点 8 仅在起爆初期受到爆轰波轴向压垮作用, 后期变形量较小, 因此两种情况下示踪点 8 的等效应力峰值和稳定应力也相对较低. 当等效锥角 $90^\circ \sim 114^\circ$ 变化时, 示踪点 8 的应力峰值与稳定应力先升高再降低, 而根据此前分析, 应力峰值较高可以

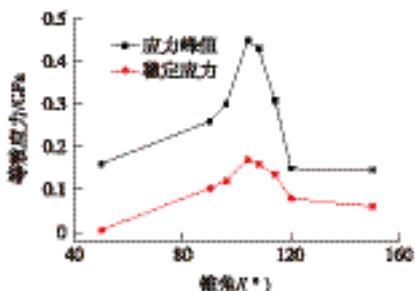


图 7 不同等效锥角时示踪点 8 等效应力分析
Fig. 7 Equivalent stress analysis of tracer 8 at different equivalent cone angles

表征初期射流中后部的一致性较好,稳定应力值较高说明射流在形成过程相互挤压拉伸作用的动态连贯性和延展性较好,则当等效锥角为 104°和 108°时,上述两项数值均最高,说明等效锥角取 104°~108°时形成的杆式射流最优。

图 8 为不同等效锥角示踪点 1 处轴向应力曲线中二次峰的峰值和持续时间对比,可以看出当药型罩锥角过小时,虽然受到轴向应力的一次峰值极高,但二次应力峰值偏低,持续时间也极短,显然不利于射流在发生塑性变形的同时保持连贯性。在大锥角范围内,二次应力峰值和时间先增大后减小,其中锥角为 104°时二次应力峰值达到 5 GPa,持续时间达 20 μs,锥角为 108°和 114°的应力峰持续时间相同,但 114°锥角的峰值比前者低 0.6 GPa,其他等效锥角方案的这 2 个参数分别出现了不同程度降低。总体来看依然是等效锥角为 104°和 108°时二次应力峰值和持续时间最长,说明这两种情况下射流外侧微元向轴心汇聚能力较强,射流连贯性好。

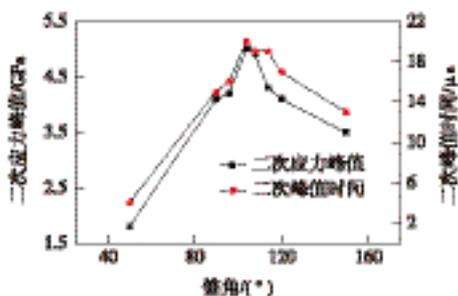


图 8 不同等效锥角时示踪点 1 二次应力峰值
Fig. 8 Tracer 1's second peak of tracer 1 at different equivalent cone angles

从图 9 中可以看出示踪点 1 受到的轴向应力峰值随等效锥角增大而减小,锥角 150°时应力峰值为 50°锥角的 1/2,而示踪点 3 的应力峰值呈相反趋势,总体来看轴向应力峰值的差值随着等效锥角增大而

迅速减小。由于示踪点 1 和 3 分别形成了杆体尾部和射流头部,由于两点应力峰值差越小,头尾部的速度越接近,射流主干的速度梯度越小,但往往以牺牲射流的长径比为代价,若要兼顾射流的拉伸性和速度梯度,可控制罩锥角在 100°~110°。

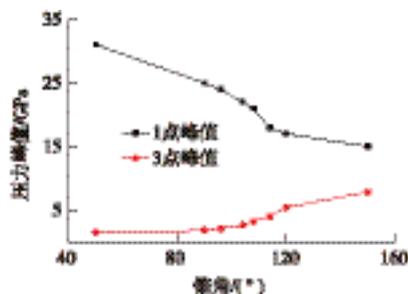


图 9 不同等效锥角时示踪点 1 和 3 轴向应力峰值
Fig. 9 Stress's peak of tracer 1 and tracer 3 at different equivalent cone angles

2.4 不同壁厚药型罩形成射流微元受力分析

按照相同口径相同等效锥角设计了 0.036d, 0.042d, 0.057d, 0.070d 和 0.086d 5 种不同壁厚的药型罩方案,其中 d 指装药直径。按照图 2 所示的取点方法,得到不同壁厚药型罩示踪点 8 等效应力如图 10 所示。

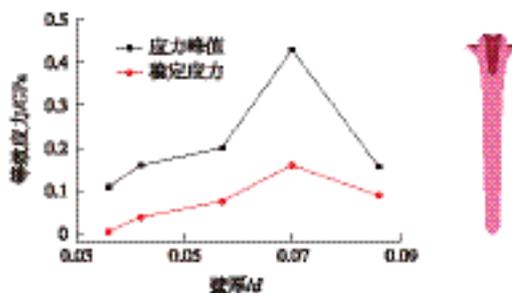


图 10 不同壁厚药型罩示踪点 8 等效应力变化规律
Fig. 10 Equivalent stress's variation of tracer 8 in different wall thickness

由图 10 可见,当药型罩壁厚在 0.070d 时示踪点 8 的等效应力峰值和稳定后的应力值在各方案中最高。通过观察不同壁厚药型罩形成的射流形态可以发现,随着药型罩壁厚减小,射流头部速度有一定程度提高,但射流尾部的中空部分越来越明显,这使得示踪点 8 的稳定等效应力逐渐减小,0.036d 时接近于零,说明此时射流尾部已经高度中空化,不利于杆式射流发挥后效作用。壁厚为 0.086d 时等效应力值相比 0.070d 出现了下降,说明罩壁过厚会造成射流汇聚速度减慢,影响射流质量。

从图 11 可以发现随着壁厚增加示踪点 1 的二

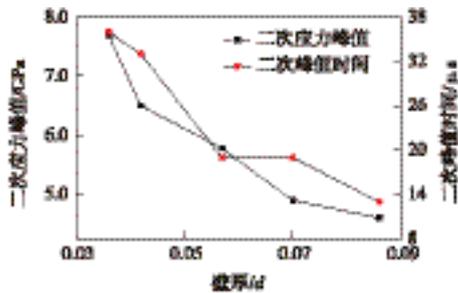


图 11 不同壁厚药型罩示踪点 1 二次应力峰值变化规律
Fig. 11 Stress's second peak stress's variation of tracer 1 in different wall thickness

次应力峰值与持续时间均呈递减规律,由于薄壁厚条件下形成的射流尾部会出现中空现象,而示踪点 1 恰恰处于中空凹槽处,因此二次峰值产生的时间即为尾部凹槽开始形成的时间,峰值的高低决定了形成凹槽的深度.从仿真后的射流形态上看,壁厚为 $0.070d$ 和 $0.086d$ 情况下没有凹槽出现,二次峰值数据属于有效值,经对比后壁厚为 $0.070d$ 的二次应力峰值与持续时间均较高,药型罩结构较优.

从图 12 可见不同壁厚药型罩示踪点 1 受到的峰值压力基本不变,而壁厚对示踪点 3 受到的应力影响很大,应力峰值随壁厚减小而递减,可以解释为药型罩厚度越厚,初始爆轰波在到达示踪点 3 的过程中衰减越多,对点 3 的直接作用作用越小.当壁厚为 $0.086d$ 时,示踪点 3 的轴向应力峰值已经不足 1 GPa ,而考虑到壁厚过薄时的高应力峰值有部分爆轰波的影响,因此药型罩壁厚宜取 $0.057d \sim 0.070d$.

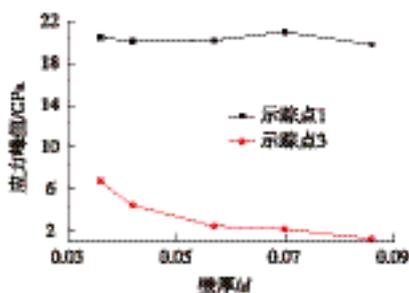


图 12 不同壁厚示踪点 1 和 3 轴向应力峰值对比
Fig. 12 Stress's peak stress's comparison of tracer 1 and tracer 3 in different wall thickness

综上所述,对不同壁厚药型罩各示踪点受力情况的分析,得出当药型罩壁厚宜取 $0.070d$ 时,形成的杆式射流质量较优.

3 结 论

① 药型罩外表面、中间部分、内表面分别生成了射流的尾裙、主干和射流头部.

② 药型罩顶部微元受轴向应力的二次峰值和持续时间可以表征药型罩外侧微元向轴线汇聚的能力,射流与杆体交界处微元等效应力是衡量射流中后部分稳定性和连贯性的重要指标,药型罩轴线上外侧微元与内侧微元应力差可以表征射流头部和尾部的速度梯度.

③ 在仿真的方案中,当罩锥角在 $100^\circ \sim 110^\circ$ 内,药型罩壁厚取 $0.070d$,可得到成型性较好的杆式射流.也说明示踪点法对罩微元应力分布的仿真研究对药型罩结构设计有参考价值.

参考文献:

- [1] 姜春兰,邢郁丽,王在成,等.串联反跑道子弹药随进级结构参数优化[J].北京理工大学学报,2000,20(5):647-650.
Jiang Chunlan, Xing Yuli, Wang Zaicheng, et al. Optimizing structure parameters of following bomb of tandem anti-runway submunition[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000, 20(5): 647 - 650. (in Chinese)
- [2] 陈智刚,赵太勇,侯秀成.聚能装药金属射流形成技术研究[J].爆破器材,2004,33(2):4-7.
Chen Zhigang, Zhao Taiyong, Hou Xiucheng. Study on the technique of jet of shaped charge [J]. Explosive Materials, 2004, 33(2): 4 - 7. (in Chinese)
- [3] 李裕春,时党勇,赵远. ANSYS 11.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践[M].北京:中国水利水电出版社,2008:27-28.
Li Yuchun, Shi Danyong, Zhao Yuan. Theory and engineering practice of ANSYS 11.0/LS-DYNA [M]. Beijing: Chinese Water Conservancy and Hydropower Press, 2008; 27 - 28. (in Chinese)
- [4] 时党勇,李裕春,张胜明.基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M].北京:清华大学出版社,2005.
Shi Danyong, Li Yuchun, Zhang Shengming. The dynamic explicit analysis based on ANSYS/LS-DYNA 8.1 [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)

(责任编辑:刘雨)