

文章编号: 1003-1480 (2022) 06-0023-06

基于自蔓延切割技术的切割弹喷管结构研究

吴艺英, 赵利军, 邓 威, 陈彦龙

(陆军特种作战学院, 广西 桂林, 541002)

摘 要: 为满足抢险救灾、战场抢修等无外界能源条件的应急切割要求, 针对一种无需外界能源、基于自蔓延切割技术的切割弹关键部件喷管进行了研究, 通过理论分析、建模仿真、试验验证确定合理的结构参数, 提高切割弹的切割效率。研究表明, 喷管参数中的收敛角(β)、曲率半径与出口半径比值(R/R_t)对喷管的效率影响较大; 本切割弹采用渐缩型喷管, 当 β 为 45° 且 R/R_t 为 1.5 时, 出口的金属射流流速稳定, 对铝合金、黄铜和 Q235 钢的切割效果均较好。

关键词: 自蔓延切割; 切割弹; 喷管; 设计参数

中图分类号: TJ45+9 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.06.005

Research on Nozzle Structure of Cutting Ammunition Based on Self-propagating Cutting Technology

WU Yi-ying, ZHAO Li-jun, DENG Wei, CHEN Yan-long

(Army Special Operations Academy, Guilin, 541002)

Abstract: In order to meet the demands of emergency cutting such as disaster relief and battlefield repair etc., a kind of cutting ammunition based on self-propagating reaction technology without external energy was designed, and the key component of nozzle was studied. Through theoretical analysis, modeling and simulation, and test verification, the reasonable structural parameters of nozzle were determined, to improve the cutting efficiency of the cutting projectile. The results show that the angle of convergence (β) and the ratio of radius of curvature to radius of exit (R/R_t) have an important effect on the efficiency of nozzle. As the conclusion, convergent nozzle is applied to the design of cutting ammunition, the value of β is about 45° and R/R_t is equal to 1.5, which make the exports velocity of metal jets stable and better cutting effect for aluminum alloy, copper and Q235 steel.

Key words: Self-propagating cutting; Cutting ammunition; Nozzle; Design parameters

切割技术作为一种重要的抢修手段, 在抢险救灾及战场武器装备抢修方面具有广泛的应用, 现行的野外切割技术主要以等离子弧切割和气割为主^[1]。然而, 等离子弧切割要求具有大功率能源和沉重、昂贵设备; 气割需强助燃剂, 在恶劣环境下容易发生泄漏、爆炸等情况。因此, 研制一种无需外界能源和设备、简易携带、能够快速反应且切割效果良好的切割技术, 对野外条件下的应急切割具有重要的意义。

本文在自蔓延切割技术的基础上, 结合固体火箭弹装药原理提出了一种用于切割的新型弹药(简称切

割弹), 着重对切割弹的关键部分——喷管结构进行了理论分析和设计, 并开展模拟仿真分析, 进而通过试验验证, 最终得出最优的结构设计, 以实现无外界能源条件下的简便切割。

1 切割弹原理及切割效果分析

切割弹结构简图如图 1 所示, 包括喷管、切割剂、弹壳、底火 4 部分。图 1 中, 切割剂以铝热剂($\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Al}$ 及 $\text{CuO}+\text{Al}$) 为主, 包含微量催化剂^[2]。

收稿日期: 2022-06-21

作者简介: 吴艺英 (1988 -), 男, 讲师, 主要从事自蔓延切割技术研究及智能化制造。

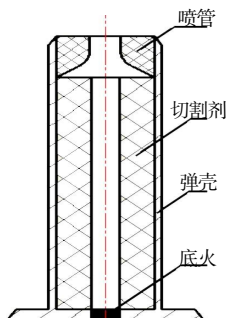


图1 切割弹结构简图

Fig.1 The sketch of cutting ammunition

催化剂的作用主要是降低铝热剂引燃温度,使切割剂可在较低温度下发生自蔓延反应。其切割基本原理为:位于切割弹底部的底火被击发后,引燃弹药内部的切割剂,切割剂发生自蔓延反应,产生的高温高压金属射流从喷管出口喷出实现切割。实际切割过程中,可将切割弹装入特制的切割枪或信号枪中,通过扣动扳机击发底火,实现切割剂的引燃,产生的金属射流通过枪口喷出。此时,只需将枪口对准被切割金属,缓慢移动枪口即可实现切割。整个切割过程中,切割弹一直留在枪膛内,待弹内切割剂燃烧完全后,可退弹再填装新的一枚切割弹进行下一轮的切割。

前期试验研究发现,若喷管出口速度(c)较小,会导致从喷管喷出的高温熔融金属射流在被切割金属表面凝固,并堆积在其表面,这种现象称为“挂渣”。“挂渣”会导致被切割金属材料表面形成一层残渣,阻碍热传导的进行,起到保护层的作用,影响切割进行^[3]。通常,为解决“挂渣”问题,可通过加快金属射流的喷管出口速度来减缓固态残渣的堆积,将固态残渣从被切割金属表面冲走,起到“吹渣”的作用。然而,若 c 的取值过大,则会导致金属射流停留在被切割工件表面上的时间缩短,传热时间短,且切割时间变短,影响切割效果。因此,切割弹喷管的合理设计对提高切割性能、确定切割弹结构尺寸及提出改善性能的措施具有重要意义。

2 喷管理论设计

2.1 喷管类型选择

喷管是一种变截面的短管,在喷管中进行能量转换的同时,金属射流的流动速度和热力状态同时都在

变化,主要有渐缩喷管、渐扩喷管和缩放喷管^[4]。3种喷管均可起到增加流速的作用,但渐扩喷管要求来流速度要大于或等于声速(340m/s)。对于本切割弹,根据前期未安装喷管的实验结果,其出口射流流速较低,为10m/s量级,远低于音速,故应在渐缩喷管和缩放喷管两者间选取。另一方面,因喷出的金属射流需用于切割,要求喷管出口的金属射流应尽可能集中,而缩放喷管在扩张段会引起射流的扩散,不利于切割。综合考虑以上因素,选取渐缩喷管。

2.2 喷管出口流速分析

假设弹体内部压强为 p_0 ,初速 $c_0=0\text{m/s}$;金属射流由弹体内部中空管道流至喷管入口处时,压强变为 p_1 ,流速为 c_1 ;而后经喷管流出,出口处的压强和流速分别为 p_t 和 c_t ,金属射流在渐缩喷管中的流动如图2所示。

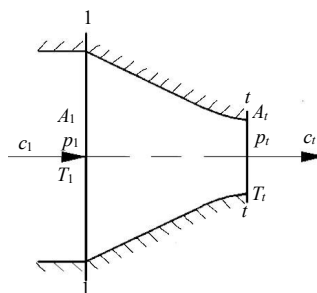


图2 渐缩喷管流动示意图

Fig.2 The sketch of flow in convergent nozzle

由于铝热反应产生的金属射流流经喷管的时间较短,通过喷管向外界的散热量极少,可以认为是绝热的稳定流动过程^[5]。因此由能量方程可得理想出口速度 c_t 为^[6]:

$$c_t = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R T_1 \left(1 - \frac{p_t}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (1)$$

式(1)中: c_t 为理想出口流速, m/s; k 为比热容比; R 为气体常数, J/kmol; T_1 为燃烧温度, K; p_1 为喷管入口处压强, MPa; p_t 为喷管出口处压强, MPa。

实际过程中,熔融的液体金属射流及汽化物与喷管之间存在摩擦,使一部分动能重新转换为热能,造成不可逆的熵增,相应的会降低射流的动能,即出口流速比理论值略小。采用工程上由于摩擦等不可逆因素造成的能量损失而引进相应的经验系数,用速度系数 φ 表示,则有:

$$\varphi = \frac{c_{t'}}{c_t} \quad (2)$$

式(2)中: $c_{t'}$ 为喷管出口实际流速, m/s; c_t 为理想出口流速, m/s。

速度系数 φ 为 1 个经验值, 依据喷管型式、材料和加工工艺精度而定, 一般在 0.92 ~ 0.98 之间^[6]。根据假定值 φ 将式(2)代入式(1)求得 $c_{t'}$, 即:

$$c_{t'} = \varphi \sqrt{\frac{2k}{k-1} R T_1 \left(1 - \frac{p_t}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (3)$$

2.3 喷管尺寸设计

切割弹燃烧过程中, 切割剂燃烧产生的金属射流由弹体中空管道流至喷管入口处, 即从装药末端到喷管入口截面的区域(如图3所示)发生压力变化。

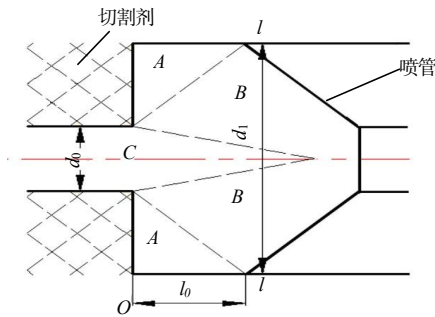


图3 喷管入口处流动示意图

Fig.3 The sketch of flow at inlet of convergent nozzle

这是由于切割剂开始燃烧时, 弹体内部中空通道的内径 d_0 较小, 当射流抵达喷管入口时, 空间瞬间增大, 造成压力降低, 弹体内部压力 p_0 与喷管入口的压力 p_1 的比值可由式(4)确定^[6]:

$$\frac{p_1}{p_0} \approx 1 - \frac{k}{k+1} \lambda_0^2 \zeta \quad (4)$$

式(4)中: λ_0 为燃烧室(弹体内部)流速系数; ζ 为局部阻力系数。由式(3)可知在切割剂成分确定的情况下, 射流出口流速与喷管入口压力 p_1 有关, p_1 越大, 出口流速越快, 其切割效果越好。再由式(4)可知, 局部阻力系数 ζ 是影响喷管入口压力 p_1 的主要因素之一。对于内孔装药燃烧的切割弹, 喷管入口的阻力系数可通过式(5)确定^[6]:

$$\zeta = 0.15 \frac{l}{d_0} \quad (5)$$

式(5)中: l 为装药末端到喷管出口截面距离; d_0 为装药中空内孔直径。

喷管收敛段如图4所示, l 的长度主要由 2 部分组成: 一部分是收敛段的长度 l_1 , 另一部分则是出口处, 即最小横截面的长度 l_2 。

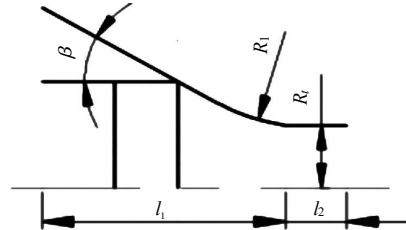


图4 由直线和圆弧组成的收敛段

Fig.4 Contraction section consist of linear and circular arc

收敛段长度的主要设计参数是收敛半角 β 。 β 小有利于气流在喉部均匀流过, 但会使收敛段长度 l_1 增大, 即总长 l 变大, 入口压力变小, 出口流速降低。若 β 过大, 则可能会导致射流在收敛段末端, 也即进入直线区域时离开壁面, 形成涡流区, 不仅降低了出口速度, 使喷管效率变低, 同时还会加重对喷管的冲刷和烧蚀, 因此 β 角不宜过大, 依据设计经验一般取值为 $30^\circ \sim 50^\circ$ ^[7]。为改善射流流入出口截面的流线, 收敛段末端与出口相交处应采取圆弧设计, 其曲率半径 R 的大小会影响该区域流速的分布, 从而影响气流的稳定性, 设计时一般应取 $R=(0 \sim 2)R_t$ ^[7] (R_t 为出口横截面的半径)。收敛半角 β 和曲率半径 R 值确定后, 即可确定长度 l_1 的值。

出口处的直线段 l_2 可以起到稳定射流、减少烧蚀的作用, 但 l_2 过长会增加摩擦阻力, 降低出口流速, 一般取 $l_2=(0.2 \sim 0.6)R_t$ ^[7]。

在切割剂成分及装药尺寸确定的条件下, 可由式(6)计算出口截面半径 R_t ^[8]:

$$R_t = \left(\frac{\rho_p \varphi(a_0) A_b a \sqrt{x f_0}}{\pi \varphi \Gamma p_0^{1-n} \times 10^6} \right)^{1/2} \quad (6)$$

式(6)中: ρ_p 为切割剂密度, g/cm³; $\varphi(a_0)$ 为平均侵蚀比; A_b 为装药燃烧面积, m²; a 为燃速系数, m/s; n 为压强指数; x 为热损失系数; f_0 为火药力, N · m · kg⁻¹; p_0 为弹内压强, MPa; Γ 为切割剂的比热容比 k (绝热指数) 的函数。

根据式(1) ~ (6) 可得主要设计参数的取值范围, 见表 1。

表1 主要设计参数

Tab. 1 The main technical parameters				
l_1	$\beta/^\circ$	R	l_2	R_f/mm
$(6 \sim 10) R_f$	$30 \sim 50$	$(0 \sim 2) R_f$	$(0.2 \sim 0.6) R_f$	3

3 仿真模拟分析

3.1 理论参数的仿真实验

由于参数变量较多,为减小试验成本费用及周期,采用 Fluent 仿真软件实现流场模拟。首先,通过仿真验证理论获得的参数取值是否合理,即在理论设计的参数范围内,喷管内部的流速和压强是否会发生突变。

从表1中取1组数值($R_f=3\text{mm}$, $l_1=6R_f=18\text{mm}$, $\beta=30^\circ$, $R=R_f=3\text{mm}$, $l_2=0.2R_f=0.6\text{mm}$)建立喷管模型,采用结构化网格技术对研究对象进行网格划分。假定本例属于可压缩流体的范畴,采用耦合隐式求解方法求解能量和动量方程,并采用 VOF 模型模拟流体喷射、流体中气泡运动问题,湍流模型选用标准的 k- ϵ 模型。流体入口采用压力入口边界,给定滞止压力 p_1 、滞止温度 T_1 以及适当的湍流条件,流体出口采用压力出口边界,给定静压及适当的回流条件^[9]。

仿真得到的喷管内部流体流速和压强分别如图5~6所示,由于喷管上下两部分沿轴对称,本仿真仅展示喷管上半部分流速与压强分布。

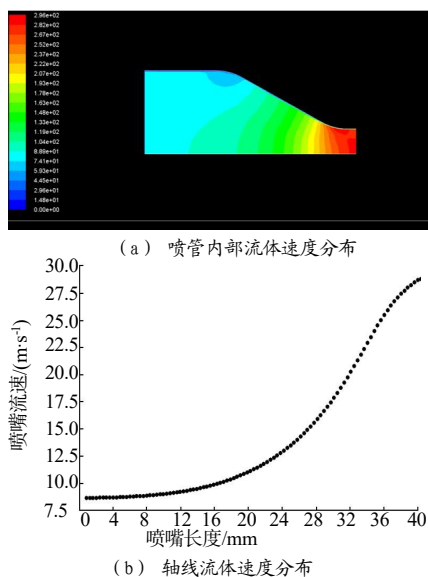


图5 喷管流体速度仿真结果

Fig.5 Simulation results of nozzle fluid velocity

从仿真结果看,喷管内部的流体速度和压强分布

均匀,在边界处无突变。且轴线上的流速和压强沿喷管长度方向均匀渐变,最大流速位于喷管出口处,速度为 29.8m/s ,最大压强为 0.15MPa ,在弹体和喷管的承受范围之内。下面通过在设计范围内改变参数数值,分析其对出口流速的影响。

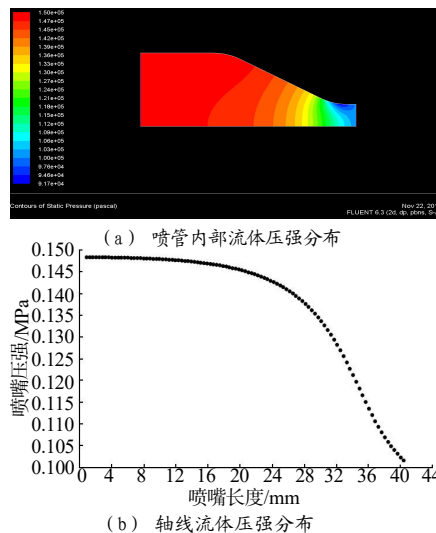
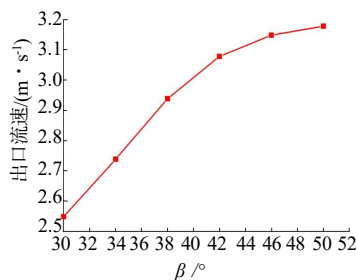


图6 喷管流体压强仿真结果

Fig.6 Simulation results of nozzle fluid pressure

3.2 收敛半角 β 对出口速度影响

在 $30 \sim 50^\circ$ 范围内均匀选取6组值,其他参量保持不变,利用 Fluent 分别对其进行数值模拟,结果如图7所示。由图7中可以看出,出口速度随收敛半角 β 的增加而增大,但随着 β 的不断增大,出口速度的增加变得缓慢。

图7 出口流速与收敛半角 β 关系Fig.7 The relationship between export velocity and angle of convergence β

由2.3节分析可知,当收敛半角 β 增大时 l 变小,则由式(5)可知,喷管前端阻力系数 ζ 下降,结合式(4)可知,通道内压降减小,喷管入口压力 p_1 增大,故由式(3)可知出口流速随着 β 的增大而增大。但随着 β 的增大,出口流速增长缓慢的原因是由于流动的工质为气液两相流,摩擦阻力不可忽略, β 过大时进入喉部时离壁而形成涡流区,增加了摩擦阻力,导致

出口流速变小。

3.3 R/R_t 比值与出口流速关系

依据 $R=(0\sim2)R_t$ 对 R 取值, 用 Fluent 模拟研究其对出口流速的影响, 结果如图 8 所示。由图 8 可知, 曲率半径越小, 出口流速越低, 即喷管效率越低; 在 $R\leq 1.7R_t$ 范围内, 出口流速随着 R 的增大而增大; 超过 $1.7R_t$ 后, 当 R 继续增加时, 流速有下降的趋势。从图 8 可知, 在 $R=(1.3\sim1.7)R_t$ 范围内, 流速基本无变化, 综合考虑可取 $R=1.5R_t$ 。

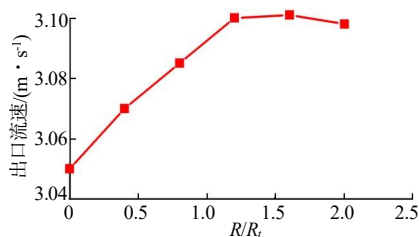


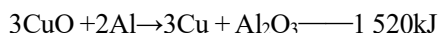
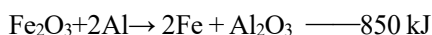
图 8 出口流速与 R/R_t 比值关系

Fig.8 The relationship between export velocity and ratio of R/R_t

改变 l_1 或 l_2 值, 出口速度几乎不发生变化, 因此, 在理论所获得的取值范围内, 其数值的改变不是影响喷管出口速度的主要因素。

4 试验验证

切割弹采用的切割剂主要成分为铝热剂, 主要的自蔓延反应为:



铝热剂燃烧合成温度可达 3 000K 以上, 主要燃烧产物都呈熔融状态^[10]。同时由于添加了造气剂, 可生成一定量气体, 射流属于高温气液两相流动, 极易对喷管壁面造成冲刷破坏, 故选用耐高温、烧蚀率低, 且烧蚀均匀的多晶石墨材料制作喷管^[11]。

由于收敛角的大小对出口流速的影响最大, 在其他参数已确定的条件下, 设计 5 组不同 β 值的喷管进行试验验证。为减少人为因素带来的干扰, 保证单一因素变量, 进行验证时, 将切割弹放在固定的试验装置上^[12], 且切割时不进行移动操作, 被切割金属为 20mm 厚的 Q235 钢板。通过测量切割后形成的孔深、

上表面孔径及孔的体积比较其切割效果, 试验结果如图 9 所示。由图 9 可以看出, 在 β 达到 45° 和 50° 时切割效果相对较好, 可将 20mm 厚的 Q235 钢板割穿, 其中 $\beta=45^\circ$ 时割孔直径较大, 可实现较好的切割效果。这是由于当 β 增大时, 出口流速也增大, 高热剂反应生成的喷射熔融金属不断的冲刷, 有效地起到了对流传热和清渣作用, 因此孔深不断增加。但当 $\beta=50^\circ$ 时, 试验观测到喷射的金属射流过快且喷射出口较为发散, 不利于热量的传递和集中, 故切割效果不如前者。

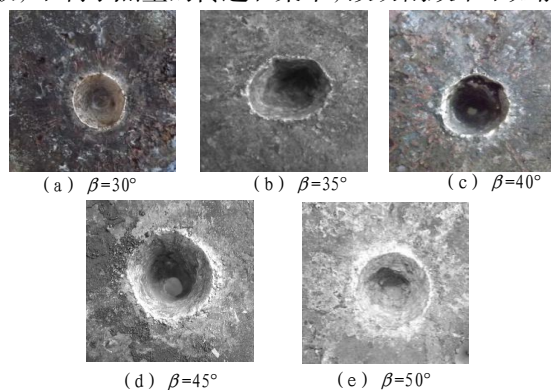


图 9 不同 β 值对应的割孔效果图 (Q235 钢)

Fig.9 Macroscopic cutting property corresponding with different value of β (Q235 steel)

在 2 个主要参数取值确定 ($\beta=45^\circ$; $R=1.5R_t$) 的条件下, 将切割弹装入切割枪进行切割, 以验证实际切割效果。切割对象分别为铝合金、黄铜和 Q235 钢, 尺寸均为长 70mm、宽 40mm、厚 10mm, 切割效果如图 10 所示, 可见设计的切割弹均取得了较好的切割效果。

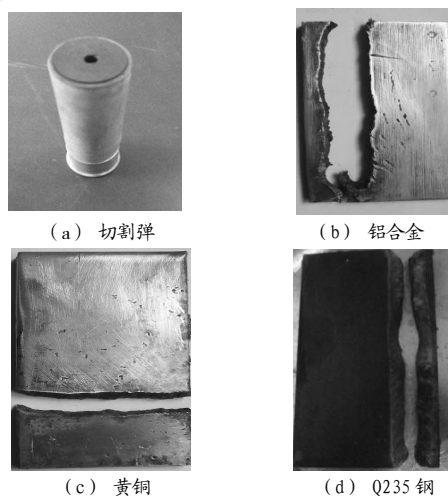


图 10 切割弹实物图及对不同材料切割效果

Fig.10 Physical map of cutting ammunition and macroscopic cutting property for different materials

5 结论

针对一种无需外界能源用于切割的新型弹药,对其关键部件——喷管进行了理论设计,采用 Fluent 进行建模仿真,并进行试验验证,得出如下结论:

(1) 对于本切割弹,应采用渐缩喷管,其中设计参数收敛角 β 的大小对切割弹的切割效果影响最大,当 β 在 $30 \sim 50^\circ$ 之间变化时,出口速率逐渐增大,喷管效率不断提高。但 β 过大 ($\geq 50^\circ$),则可能使射流离壁而形成涡流区,喷射出口的金属射流较为发散,降低喷管效率,由试验可知当 β 取值为 45° 时切割效果最佳。

(2) 增大曲率半径 R 有利于射流的平稳流动, R/R_i 的比值越小,出口流速越低,喷管效率越低。 R/R_i 比值为 1.5 时流速较快,依此设计的喷管结构参数合理,可有效实现切割剂热能的转换,达到了较好的切割效果。

(3) 喷管内流动的工质是高温 ($3\,000\text{K}$) 金属射流和气体,对喷管烧蚀较为严重,选用烧蚀率低、烧蚀均匀的多晶石墨材料喷管可达到较好效果。

参考文献:

- [1] 姜广顺.高技术武器装备的战场应急抢修问题[J].地面防空武器,2011,42(1):48-51.
- [2] 王森,辛文彤,吴永胜,等.高热剂对燃烧型切割弹切割性能影响的研究[J].火工品,2012(2):14-17.
- [3] 王鹏,张靖.烟火切割热力学分析及药剂配方设计与实验[J].含能材料,2011, 19(42):459-463.
- [4] 谢峻石,何枫.收缩喷管内部流道型线对射流流场的影响[J].机械开发,2000(4):42-48.
- [5] Luisa Duraes, Benilde F. O. Costa b, Regina Santos. $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{aluminum}$ thermite reaction intermediate and final products characterization[J]. Materials Science and Engineering, 2007 (3): 199-210.
- [6] 王光林.固体火箭发动机设计[M].西安:西北工业大学出版社,1994.
- [7] 黄振宇,徐文灿,毛鸿羽.喷管流场及其推力矢量的数值计算[J].兵工学报,2000,21(2):31-34.
- [8] 周长省,鞠玉涛,朱福亚等.火箭弹设计理论[M].北京:北京理工大学出版社,2005.
- [9] 韩占忠.Fluent-流体工程仿真计算实例与分析[M].北京:北京理工大学出版社,2007.
- [10] Weismiller M R, Lee J G., Yetter R A. Temperature measurements of Al containing nanothermite reactions using multi-wavelength pyrometry[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33 (9):1 933-1 940.
- [11] 尹健,熊翔,张红波,等.固体火箭发动机喷管用 C/C 复合材料的研究进展[J].材料导报,2004,18(4):46-48.
- [12] 吴艺英,王瑞林,辛文彤,王森,等.装药直径对切割弹燃烧及切割效率影响[J].电焊机,2014,44(3):26-30.