

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.01.008

前混合磨料水射流切割 HTPB 推进剂的可行性研究*

蒋大勇

武警工程大学装备管理与保障学院(陕西西安,710086)

[摘要] 针对前混合磨料水射流切割 HTPB 推进剂的过程安全性和效率,开展了理论分析与试验验证。在理论分析的结果上,分别开展了基于固定和移动两种试验模式下的安全性和效率试验。该切割方式由于有效降低了出口压力,在保证切割能力的前提下其冲击压力远远低于推进剂的冲击感度,导致推进剂内部升温不明显,安全性有足够保证。研究表明,在90%的置信水平下,切割的安全可靠度不低于99.52%。而磨料粒子的添加极大地提高了射流的切割效率。试验结果表明,当保持出口压力30 MPa以上、磨料质量分数不低于50%时,磨料水射流约为相同条件下纯水射流切割效率的2倍。由此得出可行性结论:由于前混合磨料水射流具有极强的冷态冲蚀磨削作用,在安全性和效率方面均能够满足对三组元 HTPB 推进剂的切割作业。

[关键词] 安全工程;前混合磨料水射流;HTPB 推进剂;可行性试验

[分类号] TJ410.89

Feasibility Study on Cutting HTPB Propellants with Pre-mixed Abrasive Water Jet

JIANG Dayong

Equipment Engineering College, Engineering University of PAP (Shaanxi xi'an, 710086)

[ABSTRACT] Process safety and efficiency of cutting test of HTPB propellant by pre-mixed abrasive water jet was studied. Based on theoretical analysis, safety and cutting efficiency of the cutting process were tested by fixed and moving cutting modes. It shows that, the cutting method effectively reduces the outlet pressure, and the impact pressure is far lower than the impact sensitivity under the premise of ensuring the cutting ability. The internal temperature rise is insignificant, so the safety is guaranteed. The research results show that at 90% confidence level, the safety of cutting is no less than 99.52%. Moreover, addition of abrasive particles greatly improves the cutting efficiency of the jet. When the outlet pressure is maintained above 30 MPa and the abrasive concentration is no less than 50%, cutting efficiency of the abrasive water jet is twice of that of the pure water jet under the same conditions. The study shows that the pre-mixed abrasive water jet has a strong cold erosion grinding effect, which can meet the cutting operation of the three component HTPB propellant in terms of safety and efficiency.

[KEYWORDS] safety engineering; pre-mixed abrasive water jet; HTPB propellant; feasibility test

引言

大型火箭发动机的“处废”是一项难度极大的军工技术作业,其中关键和重要内容之一是将火箭发动机中的推进剂安全去除,从而实现壳体的回收利用。传统的技术方法主要是利用机械刀具或者高压水射流对推进剂进行掏药处理,但是经过大规模实践后,二者被认为均存在重大缺陷。利用机械刀具需要人工近距离作业,推进剂遭受机械作用后易

引起燃烧、爆炸等事故。高压水射流在切割过程中虽然具有降温、降感的优势,一度被认为是固体发动机处废的首选,但该技术由于切割效率极低,导致气溶胶集聚等次生危害的几率极高^[1]。因此,寻求安全可靠的切割技术势在必行。前混合磨料水射流切割是一种新型的现代切割技术,通过将高压水与磨料事先混合而形成液固两相高能束流,在相同切割能力的基础上大大降低了出口压力,尤其适用于切割各种具有压敏、热敏、易燃、易爆等性质的材料^[2-3]。本研究中,基于可靠性理论开展相关实验,

* 收稿日期:2018-09-19

基金项目:国家自然科学基金(51503224);武警工程大学“智能反恐防暴装备”创新团队基金

第一作者:蒋大勇(1981-),男,博士后,副教授,从事含能材料的研究。E-mail:wanghe717@163.com

探讨前混合磨料水射流对存量巨大的三组元HTPB推进剂(以下简称 HTPB 推进剂)的切割安全性和切割效率,以期获得可行性结论,为其日后的工程化应用提供理论指导。

1 可行性分析

基于安全的前提下,前混合磨料水射流较高压纯水射流能否具有更高的切割效率,是得出可行性结论的必要条件。因此,首先在理论上对过程的安全性和效率进行分析。

1.1 安全性分析

根据含能材料起爆的热点说理论,在HTPB推进剂中受冲击形成的热点,只有持续一定的时间(10^{-7} s 以上),达到一定的尺寸(半径 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ cm)和温度($300 \sim 600$ °C)时,推进剂才会发生爆炸^[4]。当磨料水射流以极高的速度直接作用于推进剂时,对于黏弹性性质的推进剂而言,切割过程可视为一种冲蚀破碎而非绝热压缩,此状态下热量不易集聚。因此,基于临界起爆判据 $p_i^2 \tau = K$,在此区间内只需考虑建立以水锤压力为危险源的飞片冲击模型,无需考虑建立以滞止压力为危险源的黏弹体-热点安全模型。

根据前苏联 RA 狄克霍米诺夫经验公式^[5],得出射流中磨料对推进剂的打击力

$$F_1 = \left(\frac{40\pi}{3} \rho_L \right)^{\frac{3}{5}} \cdot R_s^2 \cdot \left[\frac{u^3}{6 \left(\frac{1-\mu_s^2}{E_s} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)} \right]^{\frac{2}{5}}; \quad (1)$$

$$\rho_L = \rho_w \times 50\% + \rho_s \times 50\%。 \quad (2)$$

式中: R_s 为磨料颗粒粒度,mm; E_s 为磨料颗粒弹性模量,MPa; μ_s 为磨料颗粒的泊松比; E_2 为推进剂弹性模量,MPa; μ_2 为推进剂的泊松比; F_1 为磨料颗粒的作用力,MPa; ρ_L 为射流密度, g/cm^3 ; ρ_w 为水的密度, g/cm^3 ; ρ_s 为磨料密度, g/cm^3 。 u 为射流的速度, m/s 。

根据 VF 巴巴宁经验公式^[6],得出水流对推进剂的打击力

$$F_2 = 120 \cdot \left(\frac{p}{100} \right)^{1.15} d_n^{1.75}。 \quad (3)$$

式中: F_2 为射流中水对推进剂的作用力,MPa; p 为出口压力,MPa; d_n 为喷嘴直径,mm。

作业过程中对推进剂的水锤压力 F_{max} 可视为磨料和水流的共同作用,即总打击力,包括磨料颗粒及水流两部分的打击力之和,可大致表示为

$$F_{max} = F_1 + F_2。 \quad (4)$$

当设备的喷嘴直径为 0.8 mm、出口压力为 30 MPa、磨料质量分数为 50% 时,可计算出射流对推进剂表面打击的最大水锤压力为 162.4 MPa。该数值与推进剂的撞击感度相比较,可以在理论上初步判断其安全性。撞击感度一般用落锤法测定。HTPB 推进剂在落锤质量为 2 kg、落高为 64 cm、落锤与之接触面 < 10 mm、接触时间 100 μs 条件下的撞击感度为 50%^[7]。

根据动能定理与动量定量可得:

$$F = \frac{m \sqrt{2gh}}{t}。 \quad (5)$$

式中: F 为落锤与推进剂的冲击压力,MPa; m 为落锤的质量,kg; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为落高,cm; t 为落锤与推进剂的碰撞时间,s。

可计算出落锤对推进剂的冲击压力为 715 MPa。

通过比较,磨料水射流在一般工作条件下,对推进剂产生的水锤压力远远小于其冲击感度,从这个角度讲射流冲击并不会造成危险。

1.2 效率分析

由于磨料与水的预先充分混合,前混合磨料射流对材料切割能力约为相同出口压力下纯水射流的 2.8 倍^[8],即前混合磨料射流在保持相同切割能力的前提下可有效降低出口压力。出口压力是指水射流经由喷嘴出来的最初压力,其经靶距过程中的压力损耗达到界面时便成为滞止压力。在冲击过程中,滞止压力 p_z 是最终反映有效破坏的关键因素,而出口压力 p_0 是滞止压力的衡量指标。当水射流的靶距处于起始段内且喷嘴直径不变的情况下,损耗压力 p_s 一般约为滞止压力 p_z 的 49%。在工程实践中,出口压力与滞止压力的经验公式^[9]为

$$\begin{cases} p_s \approx p_z \times 0.49; \\ p_0 = p_z + p_s。 \end{cases} \quad (6)$$

对于推进剂而言,极限破坏点主要是依据其抗压强度的大小而定。选择 20 °C 时 HTPB 推进剂的抗压强度作为破坏依据(见表 1^[10])。使材料产生明显破坏的压力称为门限压力^[11],而水射流以最低的比能工作时,所对应的最小滞止压力 p'_z 一般为门限压力 p_m 的 3 倍,故表达式为

$$p'_z = p_m \times 3。 \quad (7)$$

经计算可知,当门限压力大于 11 MPa 时,纯水射流可以对推进剂实施有效的破坏,由式(6)、式(7)可得,此时的最小滞止压力为 33 MPa。在实际情况中,纯水射流的出口压力不应低于 60 MPa。显然,该数值远高于磨料水射流的最低出口压力,即在

相同出口压力条件下,磨料水射流的切割效率要优于纯水射流。

表 1 HTPB 推进剂的力学性能参数

Tab. 1 Mechanical property parameters of HTPB propellant

试验温度/℃	50	20	-40
抗压强度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	75.9	111.1	250.0
抗拉强度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	—	41.0	—
延伸率/%	—	6.0	—
破坏延 伸率/%	—	6.3	—
抗冲强度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	6.54	5.31	3.32

2 试验验证

通过固定式和移动式两种切割试验模式,验证上述理论分析。

2.1 试验系统

试验设备选用保定锐迅公司出品的前混式磨料水射流切割装置,其组成包括压力发生装置、磨料装置、控制装置等,如图 1 所示。



图 1 试验设备

Fig. 1 Experimental installation

其运行原理如下:设备水箱内的纯水与磨料储罐中的磨料经过充分混合后供入增压系统;增压系统通过高压柱塞泵带动功率匹配器进行驱动,用于向整个工作系统提供压力;经过发生装置后,即可调制出具有一定浓度的磨料浆体;磨料浆体通过高压胶管输送至喷嘴喷出,即形成磨料水射流;将被切材料置于切割装置下方的运动机构上,运动机构使被切材料相对切割装置移动,从而完成整个切割作业过程。系统的主要技术参数见表 2。

2.2 试验对象

2.2.1 推进剂试件

根据试验需要,预制两种规格的推进剂试件,分别命名为 1# 和 2#。其中,1# 试件为圆柱体,直径为 50

表 2 参数调节范围

Tab. 2 Parameter adjustment range

参数	范围
射流压力/MPa	0 ~ 50
磨料质量分数/%	0 ~ 50
进给速度/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	100 ~ 600
靶距/mm	1 ~ 11
喷嘴内径/mm	0.8

mm,高度为 40 mm,药量约为 150 g,用于固定式切割试验。2# 试件为 100 mm × 100 mm × 200 mm 的长方体,药量约为 3 600 g,其内部埋置多组温度传感器,主要用于移动式切割试验。

2.2.2 温度传感器与记录仪

温度传感器选择 pt1000 热电偶,精度为 0.01 ℃。在 2# 试件浇筑过程中,沿射流切割路径两端预先埋设 6 个该型温度传感器,并与记录仪相连接,固化后用于测试切割过程中的推进剂内部的温度。

2.2.3 磨料

试验选用的磨料为石榴石。其莫氏硬度 7.5,努氏硬度 1 350,粒度 80 目,密度 3.4 ~ 4.3 g/cm^3 。

2.3 试验方法

2.3.1 固定式切割试验

固定式切割试验,也称穿孔试验,试验条件为:靶距 3 mm,磨料质量分数 0 ~ 50%,出口压力 50 MPa。试验目的:一是通过测试射流的穿透时间检验磨料浓度对切割效率的影响;二是进行成型型安全试验,为了保证该试验数据的可靠性,试验的样本量为 474 个。将 1# 试件装入 3 个强磁铁夹具之间,喷嘴正对其顶端中心位置,利用磨料水射流将试件击穿,并记录时间与过程变化。见图 2。



图 2 固定式切割试验

Fig. 2 Fixed cutting test

2.3.2 移动式切割试验

移动式切割试验的试验目的:一是记录不同出口压力下磨料水射流对推进剂内部的温度变化的影响,检验出口压力对安全性的影响;二是通过记录切割深度,比较磨料射流与纯水射流对切割效率的影响。由于移动式的切割效率是与时间有关的变量,

因此采用相同时间内的最大切割深度来衡量。喷嘴垂直于 2# 试件进行水平切割,切口长度为 8 cm,切割深度用探针和游标卡尺沿着切口每 1 mm 测量 1 次,并取平均值。试验条件为:室外 7 ℃,靶距为 3 mm,出口压力由 10 ~ 50 MPa 逐渐增加,横移速度保持 1 cm/s,磨料质量分数为 50%。见图 3。



图 3 移动式切割试验

Fig. 3 Mobile cutting test

3 结果与讨论

3.1 安全性试验结果与讨论

3.1.1 移动式切割试验中的温度变化

表 3 的试验结果得出:不同出口压力下,磨料水射流切割 HTPB 推进剂时的内部升温幅度不超过 25 ℃,最高温度为 56.7 ℃(含补偿温度 25 ℃),与其爆点 400 ℃相差甚远。因此,此阶段未发现实质性危险。

表 3 升温试验结果

Tab. 3 Heating test results

出口压力/MPa	温度变化范围/℃	温差/℃
10	7.5 ~ 24.3	16.8
20	7.5 ~ 31.7	24.2
30	8.2 ~ 29.4	21.2
40	13.4 ~ 31.5	18.1
50	10.2 ~ 24.1	13.9

3.1.2 成败试验

在一定工艺参数下,共对 474 个试件进行了穿孔,均未引起燃烧或爆炸。根据可靠性理论中二项分布的单侧置信下限估计法,实际未发生失效情况下的失效概率,即对应可靠度下限值的置信度^[12]为

$$c = 1 - R^n. \quad (8)$$

可靠度下限值为

$$R = (1 - c)^{\frac{1}{n}}. \quad (9)$$

式中: n 为没有燃烧或爆炸发生的成功试验次数, $n = 474$;取 $c = 0.9$,则 $R = 0.9952$ 。

据此可知,磨料水射流冲击 HTPB 推进剂不发生燃烧或爆炸的可靠度为:在 90% 的置信水平下,

安全可靠度不低于 99.52%。

通过内部升温变化和成败型试验分析,可以判断出对低敏感度的三组元 HTPB 推进剂而言,由于黏合剂的作用,使得磨料粒子对于推进剂的含能物质的机械作用有限,加之转化而来的热量也很快被大流量的水流带走,安全性是有足够保证的。即使在切割过程中,切缝中随时出现磨料与金属摩擦产生的微弱火花,但是由于火花被冷态高速水束所包围,同时水束充当润滑剂减轻了磨料与推进剂之间的摩擦,从而抑制了热点的产生和成长,降低了推进剂的冲击感度。总之,短时间内磨料射流的低出口压力与冷却减摩作用,是抑制 HTPB 推进剂冲击起爆的决定性因素。当然,这不能说明中试以及工程化应用的危险性,因为期间的危险因素还包括爆炸性气溶胶的产生以及切割时间的延长造成的热量聚集等因素。

3.2 切割效率试验结果与讨论

3.2.1 切割时间

保持 50 MPa 的出口压力,测试不同磨料质量分数下穿孔时间,试验结果见表 4。

表 4 切割效率试验结果

Tab. 4 Cutting efficiency test results

磨料质量分数/%	0	10	20	30	40	50
贯穿时间/s	706	630	480	392	28	20

由表 4 可看出,随着磨料质量分数的增加,射流贯穿时间缩短,说明射流的切割能力加强。当磨料质量分数在 0 ~ 30% 内,切割能力变化不大,其原因是随着切割深度的增加,实际靶距也随之不断增大,切割效果逐渐下降,当深度增加到一定程度,实际靶距超过了有效靶距,切割效果迅速下降,再加上深度增加后切槽中存水量不断增大,水垫作用也随之增大,对切割性能造成影响。当磨料质量分数达到 40% 后,射流的切割能力较纯水射流提高了 96%,实现质的飞跃。这说明该状态下的磨料射流与纯水射流表现出不同的工作状态,这也与实际工作状态下系统 50% (质量分数) 的磨料添加量相吻合。

3.2.2 切割深度

不同出口压力下,50% 质量分数的磨料水射流和纯水射流对推进剂的平均切割深度如图 4 所示。

从图 4 可以看出,在 0 ~ 30 MPa 的出口压力下,50% 质量分数的磨料水射流与纯水射流切割能力相差无几,这是由于在该压力范围内,射流速度较小,未达到推进剂的门限压力,冲蚀破碎的程度不大。当出口压力突破 30 MPa 后,纯水射流虽能完成冲蚀

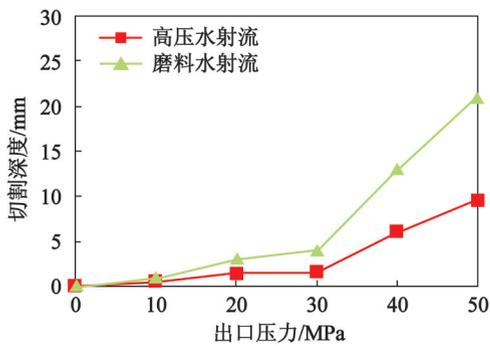


图 4 不同出口压力下两种射流的切割深度比较

Fig.4 Cutting depth of two kinds of jets under different outlet pressure

破碎,但是效率较低。相反,磨料射流由于含有大量刚性磨料粒子,使其切割能力大大提高,其综合性能约为纯水射流的 2 倍。

4 结论

在理论分析的基础上,开展了基于移动和固定模式下的前混合磨料水射流切割 HTPB 推进剂安全性和切割效率的 4 类试验,得出结论如下:

1)射流切割 HTPB 推进剂的过程安全性具有保障。其中推进剂的内部升温幅度不超过 25 °C,远低于爆发点 400 °C;成成型试验结果表明:在 90% 的置信水平下,安全可靠度不低于 99.52%。分析其原因为高速水束的冷却与减摩作用,是抑制 HTPB 推进剂起爆的决定性因素。

2)射流的切割效率能达到实用需要,即在相同压力条件下,磨料质量分数为 50% 的磨料水射流,其切割能力约为普通高压水射流的 2 倍。

3)前混合磨料水射流切割是一种安全、可行的推进剂切割新方法,该研究成果对磨料水射流技术应用于火箭发动机的“处废”工程实践具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 郁红陶,张庆明,何远航. AP/HTPB/ferrocene 混合体系粉尘爆炸特性研究[J]. 含能材料, 2009, 17(3): 283-286.
YU H T, ZHANG Q M, HE Y H. Characteristics of dust explosion of AP/HTPB/ferrocene mixed system[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(3): 283-286.

[2] 朱左明,高鑫,王焯军,等. 高压水射流冲击 HTPB 推进剂的安全性分析[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(3): 366-

371.

ZHU Z M, GAO X, WANG X J, et al. Safety analysis of high-pressure waterjet impacting HTPB propellant [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(3): 366-371.

- [3] BOGGS T L, ATWOOD A I, LINDFORS A J, et al. Hazards associated with solid propellants [M]//THOMAS B B, REN W Z, YANG V. Solid Propellant Chemistry, Combustion and Motor Interior Ballistics. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000: 221-262.
- [4] 卫玉章. 非均匀炸药的冲击引爆综合判据[J]. 爆炸与冲击, 1982, 2(1): 117-121.
WEI Y Z. A complete criterion for shock initiation of detonation in heterogeneous explosives [J]. Explosion and Shock Waves, 1982, 2(1): 117-121.
- [5] 李晓红,卢义玉,向文英. 水射流理论及在矿业工程中的应用[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2007.
- [6] LABUS T J. Fluid jet technology: fundamentals and application [M]. USA: American Water Jet Technology Association, 1995.
- [7] 何远航,郁红陶,张庆明. 固体推进剂在高压水射流作用下的点火模式[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(2): 97-99.
HE Y H, YU H T, ZHANG Q M. Ignition mode of solid propellant with high-pressure waterjet [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(2): 97-99.
- [8] 蒋旭平,胡寿根,钟声玉. 高压水射流冲击特性分析及实验研究[J]. 上海机械学院学报, 1991, 13(2): 107-110.
JIANG X P, HU S G, ZHONG S Y. Experimental investigations of impact pressure in high-pressure waterjet [J]. Journal of Shanghai Institute of Mechanical Engineering, 1991, 13(2): 107-110.
- [9] ORBANIC H, JUNKAR M. Analysis of striation formation mechanism in abrasive water jet cutting [J]. Wear, 2008, 26(5): 821-830.
- [10] 李宝玉. 易燃易爆环境下安全切割装置的研制[J]. 流体机械, 2005, 33(2): 42-44.
LI B Y. Development of safe cutting device in inflammable and explosive place [J]. Fluid Machinery, 2005, 33(2): 42-44.
- [11] 廖勇. 高围压下磨料水射流切割的模糊建模和实验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2003.
LIAO Y. Fuzzy modeling and experiment research on AWJ cutting under the high confining pressure [D]. Chongqing: Chongqing University, 2003.
- [12] 蒋大勇. 废弃 HTPB 推进剂预处理与再利用中关键问题研究[D]. 西安:第二炮兵工程学院, 2011.