

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.04.009

前混合磨料水射流对 HTPB 推进剂的切割 工艺参数优化研究^{*}

蒋大勇 郭三学
武警工程大学装备管理与保障学院(陕西西安,710086)

[摘 要] 利用前混合磨料水射流,对高、低两种燃速的 HTPB 推进剂开展切割试验,着重研究不同切割条件下工艺参数对切割效率的影响,进而为工艺参数优化提供理论依据。选取切割速度(v)、出口压力(p)、磨料浓度比(T)和靶距(L)4个工艺参数为主要影响因素,以最大切割深度(H)作为切割效率的衡量指标,分别通过单因素试验和正交试验进行分析,进而完成工艺参数的优化。试验结果表明,最大切割深度随切割速度的增加而减小,且单位时间内的切割面积存在最佳值;随着出口压力的增加,最大切割深度在特定范围内近似线性增加,并逐渐趋于平缓;磨料浓度比与靶距和最大切割深度均存在最佳对应关系。正交试验结果表明,切割速度对指标影响较为显著,靶距等3个工艺参数的影响相对较小。该研究可为前混合磨料水射流作为 HTPB 推进剂的工程化处废技术提供理论支持。

[关键词] 安全工程;磨料水射流;HTPB 推进剂;切割效率;参数优化

[分类号] TJ410. 89

Cutting Efficiency and Process Parameter Optimization of Pre-mixed Abrasive Water Jet to HTPB Propellant

JIANG Dayong, GUO Sanxue
Equipment Management and Support College, Engineering University of PAP (Shaanxi Xi'an, 710086)

[ABSTRACT] Cutting test was used to HTPB propellant with high and low burning rates by using the pre-mixed abrasive water jet. Influence of process parameters on cutting efficiency under different cutting conditions was studied, and theoretical basis was provided for parameter optimization. Cutting process speed (v), outlet pressure (p), abrasive concentration ratio (T) and target distance (L) were selected as the main influencing factors, and the maximum cutting depth was used as the measurement index of cutting efficiency by single factor test method to analyze the reasons for their impact separately. On this basis, orthogonal experiments were carried out to optimize the process parameters. The results show that the maximum cutting depth decreases with the increase of cutting speed, and the cutting speed per unit time exists an optimum value; the maximum cutting depth increases with the outlet pressure, and increases linearly in certain range and tends to be steady; There are preferred correlations for both abrasive concentration and target distance. The optimization results of the orthogonal test show that the cutting speed has a significant influence on the index, while target distance and other parameters were minor factors. This study provides theoretical support for the pre-mixed abrasive water jet as an engineered waste technology for HTPB propellants.

[KEYWORDS] safety engineering; abrasive water jet; HTPB propellant; cutting efficiency; parameter optimization

引言

端羟基聚丁二烯(HTPB)推进剂因其特殊的热

力学性能,使得清除退役固体火箭发动机成为一种危险性极大的技术工作,其过程安全性和实用性已成为目前该领域的研究热点之一^[1-3]。水射流切割方式具有降感、降温等突出优点,能够大大地降低过

^{*} 收稿日期:2018-12-12
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”团队基金
第一作者:蒋大勇(1981-),男,博士,副教授,主要从事含能材料的研究。E-mail:wanghe717@163.com

程中的危险性。如果适当添加磨料,在保证安全性的前提下可以极大地提高切割效率,降低次生危险。相关研究表明,射流参数是影响磨料水射流切割性能的重要因素^[4]。

本文中,以装备最为广泛的发动机装药——三组元 HTPB 推进剂 (AP/Al/HTPB) 为研究对象,以非淹没条件下磨料射流冲蚀切割理论为基础,开展相关参数优化试验。着重分析出口压力、靶距、磨料浓度比和切割速度对磨料水射流切割固体推进剂切割效率的影响,并在此基础上通过正交试验适当进行优化。通过试验得到的主要水射流参数,可在磨料水射流处置此类发动机装药的工程化应用上提供理论依据和技术支持,从而达到降低危险、提高效率和节约成本的目的。

1 试验部分

1.1 试验条件

1.1.1 切割设备

切割试验设备:前混合磨料水射流切割装置,保定锐迅公司。其组成为压力发生装置、磨料装置、控制装置等,如图 1 所示。磨料选用规格为 80 目的石榴石,莫氏硬度 6.5~7.5,密度 3.6~4.2 g/cm³。



图 1 试验设备
Fig. 1 Test equipment

试验设备运行机理:在切割装置的水箱内,事先加入的纯净水与磨料储罐中的磨料经过充分混合后,供入装置的增压系统;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;经过压力发生装置后,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被输送至喷嘴,喷出,即形成磨料水射流;切割时,将被切割材料置于切割装置中喷嘴的下方,并加以固定,启动伺服机构,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。

1.1.2 研究对象

研究对象选取高燃速和低燃速两种具有代表性

的三组元 HTPB 推进剂,将其制备为尺寸规格为 100 mm×100 mm×200 mm 的长方体试件,其力学性能见表 1^[4-5]。

表 1 高、低燃速 HTPB 推进剂的
力学性能(20℃)

Tab. 1 Mechanical properties of HTPB propellant with high or low burning rates (20℃)		
参数	高燃速 HTPB 推进剂	低燃速 HTPB 推进剂
抗压强度/MPa	10.88	24.48
抗拉强度/MPa	41.0	63.0
延伸率/%	6.0	7.4
破坏延伸率/%	6.3	8.1
抗冲强度/MPa	5.31	8.32

1.1.3 辅助测温装置

温度传感器选择 pt1000 型热电偶,精度为 0.01℃。在推进剂试件浇筑过程中,预先沿射流切割路径两端埋设 6 个该型温度传感器,并通过导线分别与 6 通道记录仪相连接,用于测试固化后推进剂在切割过程中的内部温度变化,以安全为前提,为参数的选择提供具体依据。

1.2 试验过程

磨料水射流切割技术共涉及 18 个水力和射流参数^[6-8]。由于试验条件及设备自身限制,并结合对切割效率影响较大且易于调节的实际情况,选择切割速度、出口压力、磨料浓度比和靶距 4 个工艺参数作为研究对象,开展单因素试验与正交试验。参数控制可遵循以下方法:出口压力可直接在仪表盘处进行调节,其调节幅度为 0~50 MPa;磨料浓度比由砂阀控制,其调节幅度为 0~50%;切割速度和靶距均可由伺服机构精确并连续地进行调节。切割试验旨在确保在推进剂材料不被切断的前提下,测量其最大切割深度,如图 2 所示。应沿切割行进方向采集数据,使用游标卡尺,每隔 5 mm 分别测量 3 次深度并记录,取其平均值作为试验数据。



图 2 切割深度测量
Fig. 2 Cutting depth measurement

切割试验必须以稳定的安全性试验(内部升温测试)为前提,过程安全性的温度判定范围可近似依据热点学说,即推进剂内部温度不应超过400℃^[9],否则易发生燃烧或爆炸等不可控事故。通过前期测试,试验选取部分极限参数,如出口压力为50 MPa,切割速度为1.0 mm/s,磨料浓度比为50%,靶距为3 mm时,发现两种推进剂内部的升温变化不大,最高温度在切断试件前始终未超过35℃,如图3所示。

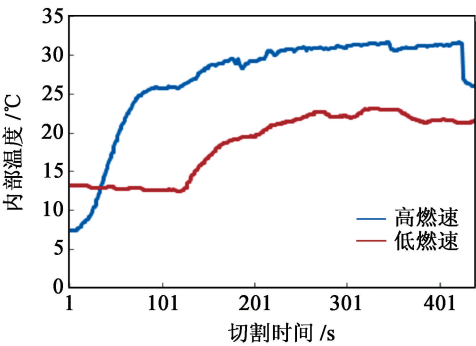


图3 切割过程中的温度变化

Fig.3 Temperature changes in cutting process

由此可知,推进剂的致密结构以及磨料水射流的低压高能特性是保证切割安全性的重要原因。因此,原则上切割效率试验以上述参数作为上限开展后续测试,应该能保证安全性。

单因素试验以高、低燃速两种HTPB推进剂为试验对象。切割效率是与时间有关的变量^[10],在比较工艺参数对其的影响时,一般应采用最大切割深度来衡量。但是,切割速度作为唯一一个与时间有关的变量,对切割效率的影响不宜采用最大切割深度,而应采用单位时间的切割面积加以衡量,即切割速度与切割深度的乘积来表示。在此基础上,正交试验选取高燃速HTPB推进剂为试验对象,其中各工艺参数的选择同样依据安全性原则,以最大切割深度为目标,但是靶距的选取范围适当扩大。最终建立了4因素3水平的正交试验表,见表2。参数的选择与优化结论应当结合单因素试验和正交试验

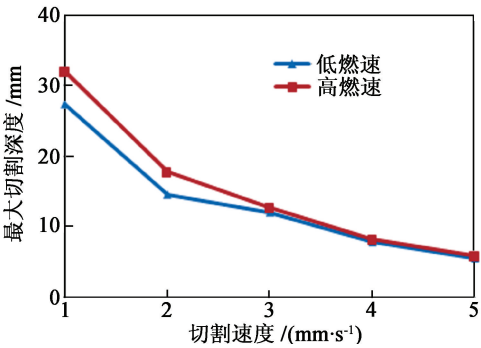
二者的结果来综合判定。

2 试验结果

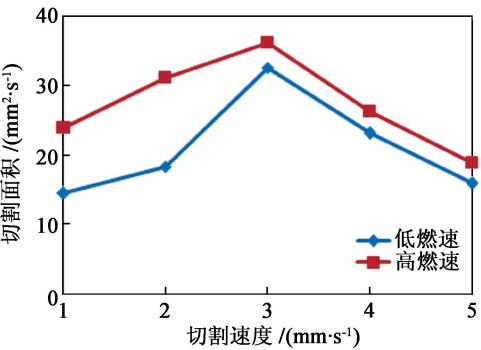
2.1 单因素的影响

2.1.1 切割速度对切割效率的影响

该项试验中工艺参数设定如下:出口压力30 MPa,磨料浓度比30%,靶距3 mm。如图4(a)所示,最大切割深度与切割速度呈反比关系,随切割速度的增大而趋于平缓;可以预见,当切割速度增加到某一定值时,此时的最大切割深度极小,可能无法加以实际应用。在特定的切割速度范围内,切割面积随之呈先增大后减小的趋势,如图4(b)所示。当切割速度达到某一特定值时,切割面积最大,即切割效



(a) 最大切割深度



(b) 切割面积

图4 切割速度对切割性能效率的影响

Fig.4 Effect of cutting velocity on cutting property

表2 高燃速HTPB推进剂的正交试验参数选择范围

Tab.2 Selected parameter ranges of HTPB propellant with high burning rates in orthogonal experiments

出口压力/ MPa	切割速度/ (mm·s ⁻¹)	靶距/ mm	磨料浓度比/ %	喷嘴直径/ mm	测量长度/ mm	切割角度/ (°)	磨料粒度/ 目
30	2	1	30	0.8	50	90	80
40	3	3	40	0.8	50	90	80
50	4	5	50	0.8	50	90	80

率值最高。因此,切割速度的选择至关重要,需要反复试验寻求最佳值。

原因分析:一是随着切割速度的增加,单位时间内的射流能量被分散到了更长的距离上,削弱了单位距离内推进剂受到的冲击力;而此时磨料浓度比没有变化,即磨料射流中单位时间内包含的磨料颗粒总数不变,这会导致该段推进剂上所收到磨料颗粒的打击次数相应减少;这部分磨料颗粒由于能量利用率降低,使得初始加速能力衰弱,不能产生对推进剂的疲劳破坏作用,这些都是导致最大切割深度减小的重要原因。二是当切割行进时,部分射流能量不可避免地增加了切缝宽度,导致切割效率远低于理想状态;随着切割速度的增加,切缝宽度和最大切割深度均随之减小,但是由于切割效率的增加,使得在有效范围内某处的切割效率最高;一旦对应的切割速度超过该值,射流边缘区域的磨料颗粒对推进剂的打击频率和力度均无法达到材料的疲劳破坏,单位面积被磨料击打的次数减少,从而导致水射流整体的能量利用率降低;最终,切割效率的降低源于最大切割深度的减量大于切割速度的增量而造成的最大切割面积的减小。

2.1.2 出口压力的影响

该项试验中的工艺参数设定如下:切割速度为 2.0 mm/s,磨料浓度比为 30%,靶距为 3 mm。如图 5 所示,最大切割深度与出口压力近似呈线性增加关系。

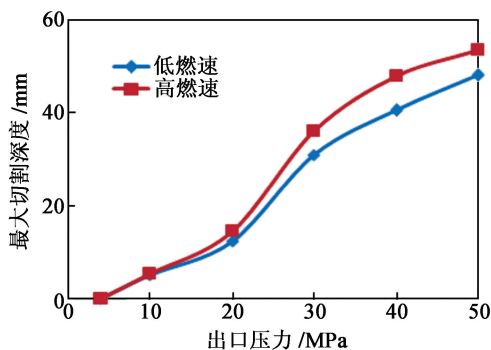


图 5 出口压力对最大切割深度的影响

Fig. 5 Effect of outlet pressure on the maximum cutting depth

按照传统理论,纯水射流切割条件下,HTPB 推进剂的门限出口压力为 11 MPa 时,磨料水射流的切割能力约为纯水射流的 2.8 倍^[11],可以大致计算出磨料射流下的门限压力约为 4 MPa,即在该压力以下,磨料与推进剂只能发生弹性碰撞,无法实行有效切割。可以设想,出口压力超过 50 MPa 后,最大切割深度将继续增大,而趋势将继续减缓。这说明对于推进剂这种软质的黏弹体而言,满足基本切割条

件即可,单纯提高前混合磨料水射流的出口压力,没有实际的工程价值。

出口压力是反映磨料水射流能量大小的决定性因素。随着出口压力的增加,射流对磨料的加速作用明显,反映为水射流的能量也随之增加,微观上表现为磨料对推进剂的打击作用明显。因此,射流的切割能力增强。但是随后最大切割深度与出口压力的关系曲线变得愈加平缓。

原因分析:一是对磨料加速作用增强,使得射流整体的有效靶距增大,磨料与推进剂接触后往往未达到最佳靶距,磨料颗粒的能量未能充分释放,导致能量利用率不高;二是磨料颗粒间的相互碰撞情况加剧,在到达推进剂界面磨料颗粒之间的破碎严重,导致粒径变小,能量损耗加大,能量利用率降低;三是射流在进入切缝后会产生水垫作用,从而产生极强的反射现象,削弱了后续射流的切割作用,这也是最大切割深度增加缓慢的主要因素;而且出口压力越大,该反射作用越强。在实际切割过程中,通过增大出口压力来获取更高的切割能力的做法是不可取的,受到设备本身限制(一般不超过 50 MPa),加之前混合磨料水射流的优点就是在相同切割能力条件下降低出口压力以保证安全。因此,出口压力的选择应根据被切割物的力学性质和理化性质,保持适中原则即可。

2.1.3 磨料浓度比的影响

该项试验中的工艺参数设定如下:切割速度为 2.0 mm/s,靶距为 3 mm,出口压力为 30 MPa。如图 6 所示,最大切割深度与磨料浓度比的关系曲线呈先增大、后减少的趋势。

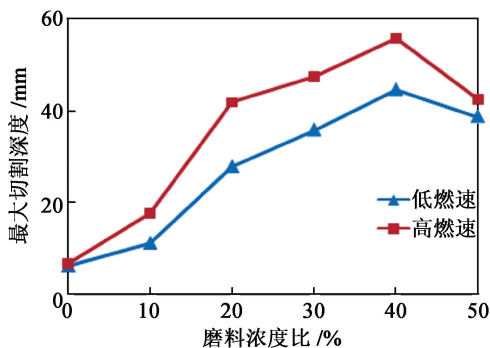


图 6 磨料浓度比与最大切割深度的关系

Fig. 6 Relationship between abrasive concentration ratio and the maximum cutting depth

磨料浓度比代表磨料在射流中的质量分数,是决定磨料水射流切割性能的一项重要参数,也是区别纯水射流性能的唯一参数。随着磨料浓度比的增加,最大切割深度上升趋势明显,显示出在相同工况

条件下前混合磨料水射流与高压纯水射流在切割性能方面的巨大差异。当磨料浓度比增幅在 0 ~ 50% 时,对于高燃速 HTPB 推进剂而言,最大切割深度由 4.1 mm 增加到 55.3 mm,增幅达 12.5 倍;而对于低燃速 HTPB 推进剂,最大切割深度则由 3.4 mm 增加到 45.7 mm,增幅也达到了 12.4 倍。当磨料浓度比达到一定程度时,最大切割深度出现极值,随后逐渐降低。

加入磨料后的高压水射流会大幅度提高其能量利用率,反映为最大切割深度的显著增加。

原因分析:一是根据能量守恒定律,磨料在获取能量后,因其密度较大且具有不规则形状,对推进剂的作用力较纯水大得多;二是随着磨料浓度的增加,单位时间内磨料颗粒对推进剂的打击次数增加;三是射流束边缘区域内的磨料颗粒数增加会使得切缝的宽度增加,使得更多的磨料颗粒进入到切缝中,增强了对推进剂的疲劳作用,从而产生持续的切割作用。但是,磨料颗粒在加速过程中的能量消耗问题同样不容忽视,相关文献显示:磨料颗粒在经过高压管时会发生相互碰撞,发生严重破碎,破坏率高达 80%^[12]。随着磨料浓度比的增大,即如果磨粒颗粒的数量持续增加,磨料之间、磨料与高压输送管之间、磨料与水流之间的碰撞均会加剧,这些都逐渐增大射流的能量内耗。因此,当磨料浓度比增加到一定程度后,最大切割深度减小。同时,在射流能量不变的前提下,磨料浓度比的增加会直接降低单个磨料颗粒的动能,导致打击作用减弱,这也是最大切割深度减小的重要原因。因此,在不增加出口压力的条件下,可以在特定范围内通过增加磨料浓度比来大幅提高切割效率,但应通过反复试验寻找其最佳参数,否则会降低设备特别是喷嘴的寿命,增加使用成本。

2.1.4 靶距的影响

该项试验中的工艺参数设定如下:切割速度为 2.0 mm/s,出口压力为 30 MPa,磨料浓度比为 30%。如图 7 所示,随着靶距的增加,最大切割深度呈先增加后持续减小的趋势,即存在一个最佳参数,试验所选条件下的最佳靶距为 3 mm。

一般而言,脱离喷嘴后的磨料颗粒,其加速过程将继续进行,直到达到最大速度^[13],拥有最大切割能力。即磨料水射流会在距喷嘴出口某一位置处处于最佳靶距。随即射流由于加速过程结束,受各种因素作用进入减速过程,这个过程能量损耗增多,切割能力逐渐降低,最大切割深度开始减小。可见,最佳靶距值与磨料的加速过程有关,而磨料的加速过

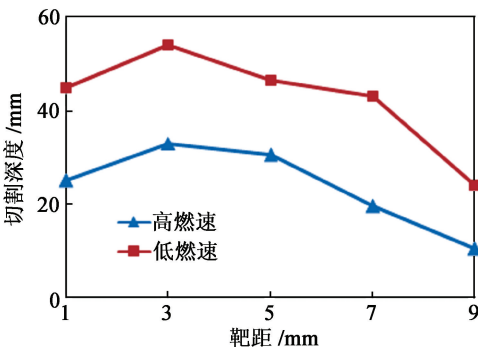


图 7 靶距与切割深度的关系

Fig. 7 Relationship between target distance and cutting depth

程又由射流的初始能量源——出口压力所决定,也就是说射流的最佳靶距最终由出口压力决定。

通过试验可知,在不同出口压力下,靶距与最大切割深度的关系如图 8 所示。由于此项试验耗时较长,且与切割速度、磨料浓度比二者无关,为节约时间和成本,试验对象只选择高燃速 HTPB 推进剂,试验条件中切割速度选择 4.0 mm/s,磨料浓度比选择 10%。

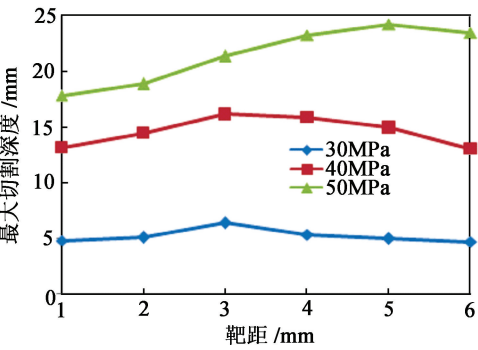


图 8 靶距与出口压力的关系

Fig. 8 Relationship between target distance and outlet pressure

由图 8 可知,出口压力的增加会导致最佳靶距呈逐渐增大的趋势。在较低的出口压力下,磨料颗粒能达到的最大速度相对较小,因此所需的加速距离较短。随着出口压力的增大,水射流对磨料颗粒的加速作用增强,磨料可达到的最大速度和所需的加速距离也相应增大。实际应用中,应选择在射流的最佳靶距条件下进行切割,此时可获得最大的切割能力。同时,应注意出口压力与最佳靶距二者的对应关系,正确加以匹配以获取最高的能量利用率。

2.2 工艺条件的优化

由表 3 中结果可知,4 种因素的极差 R_i 差距极大,昭示着切割速度是影响切割效率的主要因素,另外 3 个次要因素依次为靶距、出口压力和磨料浓度

比。因此,优化后的试验条件可采用 $v_1L_2p_3T_3$,即靶距 3 mm、出口压力 50 MPa、切割速度 2 mm/s,磨料浓度比 50%,验证试验得到的最大切割深度达到 58.2 mm。

表 3 正交试验结果的分析
Tab.3 Orthogonal test results

试验 编号	出口 压力 p / MPa	切割 速度 v / (mm · s ⁻¹)	靶距 L / mm	磨料 浓度 比 T /%	最大 切割 深度 H /mm
1 [#]	30	2	1	30	48.3
2 [#]	30	3	3	40	38.1
3 [#]	30	4	5	50	23.3
4 [#]	40	2	3	50	49.6
5 [#]	40	3	5	30	34.6
6 [#]	40	4	1	40	24.8
7 [#]	50	2	5	40	47.2
8 [#]	50	3	1	50	39.8
9 [#]	50	4	3	30	26.5
M_1	109.7	145.1	112.9	109.4	
M_2	109.0	112.5	114.2	110.1	
M_3	113.5	74.6	105.1	112.7	
R_i	4.5	70.5	9.1	3.3	

通过上述试验结果可知,前混合磨料水射流对 HTPB 推进的切割效率受切割速度、靶距、出口压力和磨料浓度比 4 个因素的影响。其中,切割速度的影响作用最大且存在最佳值。在实际应用中,适当降低切割速度有利于发挥水射流的水楔作用,加速对推进剂的冲击和剥离,但是切割速度过低会导致切缝过宽,能量利用率过低,造成浪费。出口压力的增大会导致射流速度变大,从而增加动能效应,继而使得射流对接触面的破坏作用增大,反映为切割性能较好。但是,由于 HTPB 推进剂的力学强度较低,较高的出口压力对于切割效率的提高作用不明显,盲目增大出口压力还会产生能源浪费和未知风险,总而言之是得不偿失。因此,出口压力的选择应以满足切割条件为主,保持合理、安全的范围,不必追求最大值。靶距因素对射流的切割性能影响相对较小。这是由于射流在起始段内刚性特征明显,虽然在理论上存在一个最佳靶距值,但随着时间的推移,靶距会逐渐增大,从而导致切割性能降低,使得追求最佳靶距值毫无意义。因此,对靶距的控制主要是将其掌握在射流的起始段内,这样影响的范围极小。射流的流量与设备的喷嘴直径成正比关系,在出口压力确定的条件下,磨料浓度比是决定切割性能的

主要因素,适当加大喷嘴的直径是提高切割性能的有效手段之一。但是,磨料浓度比过高会造成其内部能量损失严重、喷嘴寿命降低和冲击过程中出现热点的几率大大增加。因此,磨料浓度比的选择也应和出口压力一样,遵循适中原则,根据实际情况进行反复试验后确定。

3 结 论

在确保安全性的基础上,利用前混合磨料水射流对 HTPB 推进剂开展了切割测试,通过单因素试验和正交试验,在工艺参数的影响和优化方面得出如下结论:

- 1)单因素试验中,最大切割深度随着切割速度的增加而减小,单位时间的切割面积则呈先增大、后减小的趋势,即存在最佳切割效率下的切割速度;随着出口压力的增加,最大切割深度在特定范围内近似呈线性增加,而增加的速度趋于平缓,说明出口压力对切割效率的影响在逐渐减弱;磨料浓度比的增大可显著提高射流的切割能力,且该参数存在最佳值;增大出口压力可延长最佳靶距值,而在特定出口压力下,最大切割深度随靶距的增加呈现出先增大、后减小的趋势。
- 2)正交试验中,影响切割效率(最大切割深度)的主要因素为切割速度,次要因素依次为靶距、出口压力和磨料浓度比,优化后的试验条件为 $v_1L_2p_3T_3$ 。当满足出口压力为 50 MPa、靶距为 3 mm、切割速度为 2 mm/s、磨料浓度比为 50% 的条件时,最大切割深度的试验值为 58.2 mm。
- 3)前混合磨料水射流作为 HTPB 推进剂的一种有效切割手段,具有较大的安全保障和应用前景,在工程应用中要注意适当降低切割速度以保证切割效果,还应根据实际情况调整靶距,确保其处于起始段内以提高能量利用率。出口压力和磨料浓度比的选择应以满足要求为主,不应寻求最大值,必要时可适当降低数值以确保安全。

参 考 文 献

[1] HASHISH M,DU PLESSIS M P. Prediction equations relating high velocity jet cutting performance to stand off distance and multiphase [J]. Journal of Engineering for Industry,1979, 101(8): 311-318.

[2] 蒋大勇. 高压水射流切割 HTPB 推进剂的实验分析 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2013, 14

- [illegible]