文章编号：1000-5773(2004)02-0139-05

超高压水射流形成过程中的压力损失研究*

李海军，何远航，段卓平，张庆明

（北京理工大学爆炸与安全科学国家重点实验室，北京 100081）

摘要：对超高压水射流形成过程中的压力损失进行了理论研究，并且对不同条件下超高压水射流速度的变化规律进行了实验研究，最后确定了不同条件下超高压水射流的初始参数。结果显示，在超高压水射流形成过程中，压力损失主要是在水流从高压管道进入高压喷嘴时由于流道发生断面收缩而造成的，压力损失大约为最终超高压水射流动能密度的 49%；随着喷嘴口径的增大，压力损失减小，整个系统的能量利用率越高；随着水射流压力的增大，压力损失增大，但增大的程度会减小。

关键词：超高压水射流；压力损失；断面收缩；喷嘴直径；水射流压力

中图分类号：TP601 **文献标识码**：A

1 引 言

近年来，超高压水射流作为一门新兴技术，在工业清洗、除锈、切割方面得到广泛应用，特别是在处理废旧弹药方面显示出了其独特的优势。为了掌握高效、安全的超高压水射流拆弹技术，进而开发生产相应的拆弹设备，除了必须研究水射流与炸药的相互作用机制以外，还必须研究在超高压水射流的形成过程中，各种因素（射流的压力、导管的孔径和长度、喷嘴直径等）对水射流初始参数的影响。

通常所说的水射流压力 p^{V} 是指高压水发生装置所能达到的最大压力。随着压力的升高，高压水发生装置出口处的压力脉冲会很大，为得到连续稳定的水射流，必须增设稳压容器，因此稳压容器的初始压力必然小于通常所说的水射流压力。在高压水到达喷嘴之前，将不可避免地发生压力损失，损失的压力一部分转换为与水流接触的设备的内能，另一部分则提高了水流的温度，从而降低了最终水射流的动能以及水射流的滞止压力。由于水射流设备千差万别，所以在相同的水射流压力下，水射流可能具有不同的滞止压力。Labus[1] 曾对高压水射流在软管中的压力损失过程进行了研究，认为在软管中水射流的压力损失与流量 q 的平方成正比，与软管内径 d 的 5 次方成反比，与雷诺数 Re 的 1/4 次方成反比。Summers[2,3] 对压力为 70 MPa、流量为 44 L/min 的高压水射流的压力损失进行了实验研究，结果发现，当配管长度为 10 m、内径为 4.76 mm、喷嘴直径为 1.4 mm 时，水流在配管中的压力损失约为初始总能量的 37%，而在喷嘴附近由流道断面收缩而引起的压力损失约为 5%，高压水射流最终的滞止压力为 41.5 MPa。与一般高压水射流设备相比，超高压水射流的设备及其配件具有明显不同特点，从而在压力损失的大小和方式方面也存在很大的差异，因此有必要研究超高压水射流在形成过程中的压力损失。

2 水流流动过程中压力损失的理论分析

超高压水射流形成过程的实质是超高压水在圆管中的流动。考虑初速为 0、压力为 p_0 的水流在圆管中的流动，水流的流动状态主要取决于流速 v、密度 ρ、管长 l、管径 d、管壁粗糙度 ε、压力变化 Δp、加速度 g、粘度 μ 和体积弹性模量 K 这 9 个物理量，它们的量纲分别为：LT^{-1}、ML^{-3}、L、L、L、$ML^{-1}T^{-2}$、

* **收稿日期**：2003-11-12；**修回日期**：2004-02-06

基金项目：国家自然科学基金(10172019)

作者简介：李海军(1977—)，男，硕士研究生，主要研究方向为爆炸力学. E-mail：lihaijun83@bit.edu.cn

LT^{-2}、$ML^{-1}T^{-1}$、$ML^{-1}T^{-2}$，其中的基本量纲有 3 个：M、L、T，因此可以用 6 个无量纲积来描述水流的运动状态。选取 ρ、v、d 为不能组成无量纲数的物理变量，则可求出以下 6 个无量纲积

$$\pi_1=\Delta p/\rho v^2;\pi_2=\varepsilon/d;\pi_3=gd/v^2;\pi_4=\mu/\rho vd;\pi_5=K/\rho v^2;\pi_6=l/d$$

所以水流的运动状态可由以下函数描述

$$f\left(\frac{\Delta p}{\rho v^2},\frac{\varepsilon}{d},\frac{gd}{v^2},\frac{\mu}{\rho vd},\frac{K}{\rho v^2},\frac{l}{d}\right)=0 \tag{1}$$

引入 Froude 数 $Fr=v^2/(gd)$、Reynolds 数 $Re=\rho vd/\mu$ 以及马赫数 $Ma=v/\sqrt{K/\rho}$，从(1)式可以得到

$$\Delta p=\rho v^2 f_1\left(\frac{\varepsilon}{d},Fr,Re,Ma,\frac{l}{d}\right) \tag{2}$$

从(2)式中可以看出，在水流的流动过程中，压力变化与流体密度、水流速度的平方成正比。在超高压水射流形成过程中，由于重力的影响极小，所以可以忽略 Fr 对压力降低的影响；而通常喷嘴长度远小于管道长度，于是可以忽略水流在喷嘴中运动引起的压力变化；另外，考虑到水流在进入喷嘴之前的流速远低于水的声速，所以还可以忽略马赫数 Ma 的影响。基于以上分析，可以认为水流在圆管中流动时，压力变化主要由 Reynolds 数 Re 和管道参数决定，即有

$$\Delta p=-\frac{\rho v^2}{2}f_2\left(\frac{\varepsilon}{d},Re,\frac{l}{d}\right) \tag{3}$$

当水流为理想流体，圆管为光滑管时，水流在流动过程中的能量损失为 0，由伯努利方程可以得到

$$p_0=p+\frac{1}{2}\rho v^2 \tag{4}$$

从(3)式、(4)式可以得出：$f_2(\varepsilon/d,Re,l/d)=1$。但实际上水流有一定的粘性，圆管也不可能做到完全光滑，所以在水流流动的过程中肯定存在压力损失，f_2 必然大于 1。令流阻系数为 ζ，则水流流动过程中的压力损失 p^* 可表示为

$$p^*=\zeta\frac{\rho v^2}{2} \tag{5}$$

考虑有能量损失的伯努利方程

$$p_0=p+\frac{1}{2}\rho v^2+p^* \tag{6}$$

由(3)式、(5)式、(6)式可以得出

$$\zeta=f_2\left(\frac{\varepsilon}{d},Re,\frac{l}{d}\right)-1 \tag{7}$$

由于目前从理论上无法导出 f_2 的表达式，所以通常根据实验来给出 ζ 的经验值。

3 超高压水射流形成过程中压力损失的理论分析

超高压水射流在形成过程中的流动可以分为以下三类：水流在水平直线管道中的流动，水流在弯管中的流动，水流在流道断面收缩处的流动。水流在高压管道中的流动属于第一种情况，水流由高压管道向喷嘴过渡的流动属于第二种情况，水流由高压水发生设备进入高压管道以及由高压管道进入高压喷嘴时的流动属于第三种情况。令水流在高压管道和喷嘴中的速度分别为 $\bar{v}$ 和 v，高压管道和喷嘴的内径分别为 $\bar{d}$ 和 d，长度分别为 $\bar{l}$ 和 l，则由连续方程可以得出

$$\bar{v}\bar{d}^2=vd^2 \tag{8}$$

3.1 水流在水平直线高压管道中运动时的压力损失

水流在水平管道中运动时，由于水流的粘性，水流与管壁的摩擦是造成压力损失的主要原因。根据卡门-普朗特尔经验公式[4]，在雷诺数 $Re<10^5$，使用管道为光滑管时，水流在水平直线高压管道中运动时的流阻系数为

$$\zeta_1=\frac{0.3164}{Re^{1/4}}\frac{\bar{l}}{\bar{d}} \tag{9}$$

高压管道中雷诺数 $Re=\rho\bar{v}\bar{d}/\mu$，其中 μ 为水的动力粘度，ρ 为水的密度，将其代入上式并化简，可得水流

在水平直线高压管道中运动时的压力损失为

$$p_1^* = \zeta_1 \frac{\rho \bar{v}^2}{2} = 0.3164 \rho^{3/4} \mu^{1/4} \frac{\bar{l} \bar{d}^{7/2}}{\bar{d}^{19/4}} \frac{v^{7/4}}{2} \tag{10}$$

3.2　水流在弯管中运动时的压力损失

在弯管中,管壁迫使水流的流速方向发生改变,水流受到向心力的作用,易产生脱流现象,形成旋涡而造成压力损失。根据 Weisbach 的实验数据[4],当弯管为标准的肘管时,流阻系数可取 $\zeta_2 = 0.9$,则水流在经过弯管即由高压管道向喷嘴过渡时的压力损失为

$$p_2^* = \zeta_2 \frac{\rho \bar{v}^2}{2} = 0.9 \frac{d^4}{\bar{d}^4} \frac{\rho v^2}{2} \tag{11}$$

3.3　水流在流道发生断面收缩时的压力损失

在流道发生断面收缩时,流股先发生收缩,然后逐渐扩散,在断面后出现的局部分离脱流是造成压力损失的主要原因,此时流阻系数 ζ 主要取决于发生变化前后流道横截面积之比,截面积变化越大,流阻系数越大。实验结果显示[4],当水流从大容器流入锐缘进口的管道时,流阻系数为 $\zeta_3 = 0.5$。因此,超高压水流由稳压容器进入高压管道时压力损失为

$$p_3^* = \zeta_3 \frac{\rho \bar{v}^2}{2} = 0.5 \frac{d^4}{\bar{d}^4} \frac{\rho v^2}{2} \tag{12}$$

超高压水射流设备配套的高压管道和高压喷嘴的内径变化之比小于 0.1 时,流阻系数 ζ_4 为 0.49,所以水流在由高压管道进入高压喷嘴时压力损失为

$$p_4^* = \zeta_4 \frac{\rho v^2}{2} = 0.49 \frac{\rho v^2}{2} \tag{13}$$

4　超高压水射流速度的实验研究

当已知喷嘴口径时,如果确定了超高压水射流在单位时间的平均流量 q,就可确定水射流在喷嘴出口处的平均速度 v,即通常所说的水射流速度。在本实验中,超高压水产生后,经一根长 7.5 m、内径为 2 mm 的水平高压管道到达高压喷嘴并通过喷嘴进入流量计,所用超高压水射流设备的数控系统可严格控制超高压水射流的作用时间。当超高压水射流压力保持为 320 MPa 时,分别对喷嘴口径为 0.20 mm、0.28 mm、0.35 mm 时的平均流量 q 进行了测量;当喷嘴口径固定为 0.28 mm 时,分别对超高压水射流压力为 200 MPa、260 MPa、320 MPa 时的平均流量 q 进行了测量。测得的速度如图 1 和图 2 中离散点所示,对其进行 Sigmoidal 拟合,得到了超高压水射流的速度曲线。

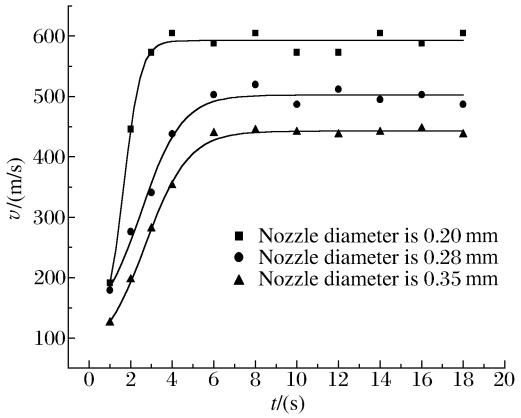


图 1　压力为 320 MPa、不同喷嘴口径的超高压水射流的速度曲线

Fig. 1　The velocity curves of hyperpressure waterjet of different nozzle diameters at the pressure of 320 MPa

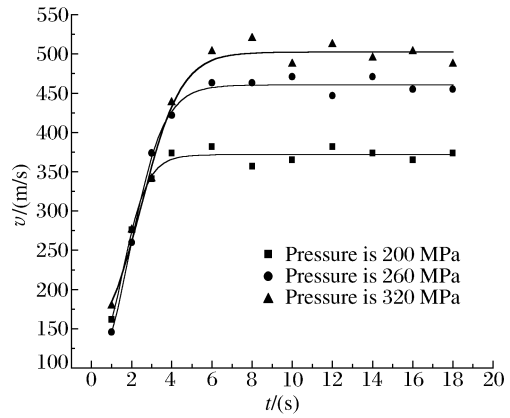


图 2　喷嘴口径为 0.28 mm、不同压力的超高压水射流的速度曲线

Fig. 2　The velocity curves of hyperpressure waterjet of different pressure with the nozzle diameter of 0.28 mm

从图中可看出,超高压水射流在开机 3～4 s 后,其速度才能稳定在某一水平。速度稳定所需时间不仅与高压水的发生设备和稳压装置有关,而且喷嘴口径和压力水平对其也有一定影响。从图中还可看出:在超高压水射流压力一定的情况下,喷嘴口径越大,水射流速度趋于稳定所需时间越长;在喷嘴口径固定的前提下,水射流压力越低,其速度达到稳定所需时间越短。

5 分析与讨论

5.1 压力损失分析及超高压水射流初始参数的确定

以喷嘴口径为 0.2 mm 为例来分析超高压水射流形成过程中的压力损失,根据实验所用水射流设备的结构参数,将其代入(10)式～(13)式可得

$$p_1^* \approx 2.96\times10^{-7}\frac{\rho v^{7/4}}{2},\ p_2^* = 9\times10^{-5}\frac{\rho v^2}{2},\ p_3^* = 5\times10^{-5}\frac{\rho v^2}{2},\ p_4^* = 0.49\frac{\rho v^2}{2}$$

对以上四式进行比较可以看出,p_4^* 远大于 p_1^*、p_2^* 和 p_3^*。由此可以认为,在超高压水射流形成过程中,压力损失主要是由水流从高压管道进入高压喷嘴时流道发生断面收缩引起的,即超高压水射流形成过程中压力损失可表示为

$$p^* \approx 0.49\rho v^2/2 \tag{14}$$

从以上分析可看出,超高压水射流形成过程中的压力损失与高压水射流有明显的不同,这主要是因为超高压水射流所用管道与喷嘴口径的变化比高压水射流大得多。对比(10)式和(13)式可以看出,管道与喷嘴口径变化增大,使得水流在水平管道中流动时的流阻系数减小,而使水流由管道进入喷嘴发生断面收缩时的流阻系数增大;另一方面,水流在喷管和喷嘴中速度变化会增大,这就使得水流在水平管道中流动时损失的压力相对更小,而水流由管道进入喷嘴发生断面收缩时损失的压力相对更大,所以在超高压水射流形成过程中,水流由管道进入喷嘴发生断面收缩是造成压力损失的主要原因。

水射流的滞止压力 p' 由下式确定

$$p' = \rho v^2/2 \tag{15}$$

由(14)式、(15)式便可确定稳压容器中超高压水流的初始压力 p_0

$$p_0 = p' + p^* \tag{16}$$

根据水射流的滞止压力 p' 和平均流量 q 便可确定水射流的功率 P

$$P = p'q \tag{17}$$

通过以上分析可确定所研究的超高压水射流初始参数如表 1 所示。

表 1 超高压水射流初始参数

Table 1 Initial parameters of hyperpressure waterjet

d/(mm)	p^V/(MPa)	q/(mL/s)	v/(m/s)	p^*/(MPa)	p'/(MPa)	p_0/(MPa)	P/(W)
0.20	320	18.6	592	85.9	175.2	261.1	3258.7
0.28	200	22.8	371	33.3	68.8	102.1	1568.6
	260	28.4	461	51.4	106.3	157.7	3018.9
	320	30.9	501	60.7	125.5	186.2	3878.1
0.35	320	42.4	441	46.7	97.2	143.9	4124.2

5.2 喷嘴口径对超高压水射流参数的影响

当超高压水射流设备中增压器的功率确定时,超高压水射流压力一定,此时,喷嘴口径越大,流量越大,这说明超高压水流更容易从喷嘴喷出,形成射流,所以单位质量水流的能量损失会更小,即压力损失会更小,整个系统的能量利用率会更高,对表 1 中压力损失和水射流功率进行比较便可看出这一点。随着流量增大,稳压容器中单位时间消耗掉的能量就增大,而稳压容器中的能量来源保持不变,因此为了保证超高压水射流的连续和稳定,稳压容器中的压力必然会降低,即水射流的初始压力会降低,由于初

始压力的降低,最终形成的超高压水射流速度也会降低。

5.3　超高压水射流压力的改变对水射流参数的影响

喷嘴口径一定,根据以上理论分析,在超高压水射流形成过程中损失的压力与最终超高压水射流的滞止压力之比基本不变,大约为 49%。从表 1 数据可以看出,在喷嘴口径一定的情况下,随着水射流压力的升高,即增压器功率的增大,水流流量、水射流的初始压力、流速、功率以及水射流形成过程中的压力损失都会增大。另外,当喷嘴口径为 0.28 mm、水射流压力由 200 MPa 升高到 260 MPa 时,水射流流量增加了 25%,而当水射流压力升高到 320 MPa 时,水射流流量仅增加了 36%,其它参数也有相同的增加趋势,这说明在水射流压力增大幅度相同时,随着水射流压力的升高,水射流各个参数增大的程度会逐渐减小。

6　结　论

通过对超高压水射流形成过程中压力损失的理论分析和超高压水射流速度的实验研究,可得出以下结论:

(1) 超高压水射流形成过程中,压力损失主要由水流从高压管道进入高压喷嘴时流道发生断面收缩引起。

(2) 在超高压水射流压力一定的情况下,喷嘴口径越大,产生水射流的速度越低,压力损失越小,整个系统的能量利用率越高。

(3) 在高压喷嘴口径一定的情况下,随着超高压水射流压力的增加,水射流的流量、速度和压力损失都会增大,但增大的程度会逐渐减小。

References:

[1] Labus T J. Fluid Jet Technology:Fundamentals and Applications [M]. St . Louis:WJTA,1995. 43－46.

[2] Summers D A. Waterjetting Technology [M]. London:E&F N SPON,1995. 24－28.

[3] Xue S X. The Technology and Application of High-Pressure Waterjet [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998. 177－180. (in Chinese)
薛胜雄. 高压水射流技术与应用 [M]. 北京:机械工业出版社,1998. 177－180.

[4] Sheng J C. Hydraulic Pressure Hydrodynamics [M]. Beijing: Mechanical Industry Press,1980. 143－167. (in Chinese)
盛敬超. 液压流体力学 [M]. 北京:机械工业出版社,1980. 143－167.

Research on the Pressure Loss in the Generating Process of Hyperpressure Waterjet

LI Hai-Jun, HE Yuan-Hang, DUAN Zhuo-Ping, ZHANG Qing-Ming

(*State Key Laboratory of Science of Explosion and Safety, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The pressure loss in the generating process of hyperpressure waterjet is theoretically studied in this paper. The velocities of waterjets have been measured under different conditions. On the basis of theoretical results and the experimental data, the initial parameters of the hyperpressure waterjet have been obtained. The results show that the pressure loss in the generating process is mainly resulted from the section shrinkage. The lost pressure is about 49 percent of the final kinetic energy of hyperpressure waterjet. As the nozzle diameter increases, the pressure loss decreases and the output power of the waterjet generating system is enhanced. As waterjet pressure increases, the pressure loss increases, but the increased degree decreases.

Key words: hyperpressure waterjet; pressure loss; section shrinkage; nozzle diameter; waterjet pressure