

电液压力脉冲腔室压力数学模型的研究

裴江红¹, 张凤华¹, 廖振方²

(1. 湖南工业大学 水射流研究所, 湖南 株洲 412008; 2. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400030)

摘要: 基于电液压力脉冲的产生机理建立了电液压力脉冲效应的等离子体膨胀模型, 并运用能量守恒原理确立了电液压力脉冲腔室压力计算的数学模型。对模型进行研究所得结果表明: 放电通道内的压力与等离子体膨胀半径和放电时间的平方成反比, 与击穿电压和电容成非线性关系。利用该模型计算所得的电液压力脉冲腔室压力值与文献[6]中的实测值相比, 吻合度较好。该数学模型为电液压力脉冲技术在工程中的应用提供了理论依据。

关键词: 电液压力脉冲; 等离子体; 膨胀半径; 放电时间; 压力

中图分类号: TP601

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)03-0043-04

Study on the Pressure Mathematic Model of Electro-Hydraulic Impulse Chamber

Pei Jianghong¹, Zhang Fenghua¹, Liao Zhenfang²

(1. The Modern Jetting Department, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China;

2. Institute of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Based on the mechanism of electro-hydraulic impulse, the plasm expanding model is established, and by applying principle of energy conservation, the mathematic model of the pressure of electro-hydraulic impulse chamber is built. The research shows that the pressure of discharge channels is inversely proportional to the expanding radius of plasm and to the square of discharge time, and it has nonlinear relation with breakdown voltage and capacitance. The calculated value is similar to the test result of References 6. The mathematic model provides theory basis for the application of electro-hydraulic impulse in engineering.

Keywords: electro-hydraulic impulse; plasm; expanding radius; discharge time; pressure

0 引言

随着科学技术的迅猛发展, 工业生产对设备精度的需求不断提高, 使得对机械零、部件的制造加工提出了更高的要求; 不仅是对零件的尺寸、形状精度和表面粗糙度方面的要求, 而且对零件的力学特性也提出了更严格的要求。在一般机械加工方法中, 零件的加工表面常不可避免地出现残余拉应力, 从而造成零件的力学性能大大降低, 缩短了工件的使用寿命。特别是对于具有复杂表面的零件或一些大零件, 根本不

能保证零件表面获得均匀的力学特性, 更不能用常规方法对复杂表面进行强化处理, 还有些加工方法强化后易引起表层脱落、翘曲、和增加工件的表面粗糙度(如用喷丸强化)。为此, 采用电液压力脉冲效应来处理金属表面的新方法正逐渐引起科研人员的重视, 并进行了相关方面的研究。

实验研究结果表明: 利用电液压力脉冲效应强化淬火后的工具钢表面及复杂零件表面时, 只是表层金属结构发生改变, 硬度提高, 金属表面的形状和尺寸精度几乎不发生任何改变, 大大提高了金属表面的力学

收稿日期: 2010-03-11

基金项目: 科技部国际科技合作基金资助项目(2008DFA70300), 湖南省大学生研究性学习与创新性实验计划基金资助项目(湘教通[2009]320-226)

通信作者: 裴江红(1973-), 男, 重庆垫江人, 湖南南工业大学教师, 重庆大学博士研究生, 研究方向为射流理论及应用, 电液压力脉冲理论及应用, E-mail: pjh_cq@163.com

性能^[1-3]。在利用这一新工艺对工件表面进行强化处理时,工件表面的力学性能取决于作用在工件表面的压力能的大小(此压力能由电液脉冲效应产生)^[4-5]。目前对于电液脉冲的研究主要集中在利用其工作过程中产生的压力实现对难处理污水和金属表面进行处理的实验研究方面。因电液脉冲效应是一种高速流体的瞬变过程,鉴于液体压缩性比较小,观察研究其中发生的快速过程比较困难,往往需要比较复杂的光学仪器设备,在放电中心更难用一般压力传感器测量,所以致使对电液脉冲自身的压力效应研究还少有报道。已有的研究也只是研究了放电通道内的电液液动力特性^[6]。为了更有效地利用、调节和控制电液液动力效应,本文在参考文献^[6]的研究基础上,应用电液脉冲效应理论,建立了数学模型,用于推导电液脉冲腔室内电液脉冲效应的压力。

1 电液脉冲工作原理^[1,7]

由图1知,电液脉冲发生器由2部分组成:a)脉冲电流发生器(由1—高压变压器,2—高压硅堆,3—限流电阻,4—脉冲电容器,5—空气开关组成);b)电液脉冲水气射流发生器(由6—正电极,7—工作腔和8—负电极组成)。电液脉冲的实质在于将储存在电容器中的能量瞬间(10~100 μs)释放出来,在液体中形成脉冲放电。放电时电极间形成等离子体通道,其温度可高达 $10^4 \sim 3 \times 10^4$ °C。在放电通道中形成一个发生强烈局部加热液体的小横截面,这时,过热离化气体和蒸汽的能量储存在液体里面。放电通道以空腔的形式快速膨胀,在内部压力作用下,对周围的不可压缩介质产生压缩和冲击压力(压力可高达1 000 Mpa)。当通道内的能量大量释放时,它的膨胀速度可超过液体中的声速,从而把压缩波转变为冲击波。空腔的膨胀一直到空腔内的压力小于外界压力时才停止,此时由于惯性作用发生液流闭合,液流作反向运动,空腔内的压力再次急剧增加。这个过程重复几次,其脉动幅值逐渐衰减。

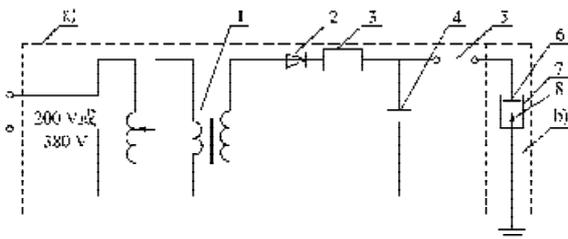


图1 电液脉冲发生器工作原理示意图

Fig.1 The diagram of operating principle of electro-hydraulic impulse generator

2 电液脉冲室压力数学模型及计算

大功率冲击电流向液体中放电通道输入能量,引起通道内部压力急剧增加,导致通道以接近音速或超音速膨胀。通道内部等离子体密度与液体密度相差极大,在通道膨胀过程中,可以认为通道与周围液体不相渗透。因此,设通道内的膨胀为活塞式膨胀。

通道内的等离子体具有高能密度的特征,因此,设通道内温度、压力和密度沿半径不变。且通道周围液体的导热性较差,而电液脉冲效应又是高速流体的瞬变过程,因此把通道的膨胀过程看成是绝热过程。

图2为计算用数学模型。放电室内充满了水,假设放电的等离子体活塞呈球形膨胀,放电时间为 t 时等离子体活塞的半径增大到 R ,等离子体膨胀及闭合按正弦规律变化。根据这些假设,则有:

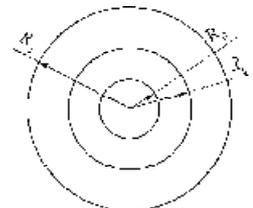


图2 压力数学模型

Fig.2 The pressure mathematic model

$$R = \int_0^t v dt, \quad (1)$$

$$v = \int_0^t a dt, \quad (2)$$

式中: R 为等离子体活塞膨胀半径,单位m;

a 为等离子体活塞膨胀的加速度,单位 m/s^2 ;

v 为等离子体活塞膨胀的速度,单位 m/s 。

假设放电室内的水不流出,即将放电室内的水密封,则在 $0 \sim t_d$ 时间内,放电室内的水将被压缩,有:

$$R_d - R_0 = R_0 - R_0 = \bar{v} t_d. \quad (3)$$

式中: R_k 为放电室半径,单位m;

R_0 为等离子体活塞的初始半径,单位m;

\bar{v} 为 $0 \sim t_d$ 时间内等离子体活塞膨胀的平均速度,单位 m/s 。

压缩波阵面的推移量为:

$$R_s - R_0 = u t_d, \quad (4)$$

式中: R_s 为声波在 $0 \sim t_d$ 时间内的传输半径,单位m;

u 为水中的声速,单位 m/s 。

若设 t_d 时刻等离子体活塞的膨胀速度为 v_d ,且令

$$\bar{v} = \frac{1}{2} v_d, \quad (5)$$

则等离子体活塞的平均加速度为:

$$a = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} a dt = \frac{2\bar{v}}{t_d}. \quad (6)$$

放电时从放电通道内(两极之间)释放出来的能

量用于使等离子体活塞膨胀(克服水的惯性)和将水压缩, 故其作用力为:

$$\bar{F} - m\bar{a} + S\varepsilon K, \quad (7)$$

式中: \bar{F} 为等离子体活塞膨胀表面所受压力, 单位 N;

m 为受等离子体活塞作用的水的质量, 单位 kg,

$$\text{且 } m = S\bar{\rho} \int_0^{t_d} (u - \bar{v}) dt = S\bar{\rho} t_d \frac{u - \bar{v}}{2}, \quad (8)$$

式(8)中 $\bar{\rho}$ 为压力波的平均体质量, ρ_0 为水的体质量, 单位均为 kg/m^3 ;

S 为等离子体活塞膨胀表面面积, 单位 m^2 ;

\bar{v} 为压力波的平均变形量;

K 为水的体弹性模量, 单位 Pa。

考虑到: $\varepsilon = (v_d)/(ut_d) = v/u$, $\bar{\rho}(u - \bar{v})t_d = \rho_c ut_d$,

$u = \sqrt{K/\rho_0}$, 并将式(6)和(8)代入式(7)得:

$$\bar{F} = S\bar{v}[\bar{\rho}(u - \bar{v}) + u\rho_c] = 2S\bar{v}\rho_c u. \quad (9)$$

由此可知, 在等离子体活塞膨胀表面单位面积上的压力(即压强) $(\bar{p} - \bar{F}/S)$ 是与其速度成正比的, 即:

$$p = F/S = (2S\bar{v}\rho_c u)/S = v_d \rho_c u. \quad (10)$$

大量实验表明: 放电结束时贮存在电容器中的能量为 $W_0 (W_0 = CU_0^2/2)$, 除了用于使等离子体活塞膨胀做功 W_p 和对水产生压缩能 W_c 之外, 还有造成液体流动的动能 W_k , 即:

$$W_p + W_c + W_k = \eta W_0, \quad (11)$$

式中: η 为放电回路内能量释放的总效率。

W_p 取决于等离子体活塞的体积 V 和它内部的压力 p , 放电结束时等离子体活塞因体积膨胀做功为:

$$W_p = pV = \frac{1}{3} pSR = \frac{1}{3} pS\bar{v}t_d, \quad (12)$$

将式(9)和 $p=2\bar{p}$ 代入式(12)得:

$$W_p = 2\bar{p} \cdot \frac{\bar{F}t_d}{6\rho_c u} = \frac{\bar{p}^2 t_d S}{3\rho_c u}. \quad (13)$$

W_k 是由水的运动速度及其质量所决定的, 即:

$$W_k = \frac{1}{2} m v_d^2, \quad (14)$$

将式(5)、式(8)和(9)代入式(14)中, 并考虑到 $\bar{\rho}(u - \bar{v})t_d = \rho_c ut_d$, 可得:

$$W_k = \frac{1}{4} [S\bar{\rho}_0 (u - \bar{v})^2 t_d] = \frac{\bar{p}^2 t_d S}{4\rho_0 u}. \quad (15)$$

由于等离子体活塞膨胀而产生压缩波, 此压缩波以声速向四周扩散, 设它的周期为 T , 在单位时间内

通过单位面积的压力波能量(即压力波强度)为 I , 则根据有关资料介绍有:

$$I = \frac{p_m^2}{2\rho_0 u}. \quad (16)$$

若第一个半周期在时间 t_d 内形成, 即 $T=2t_d$, 则有:

$$W_c = TSI = \frac{2p_m^2 t_d S}{2\rho_0 u}, \quad (17)$$

考虑到: $\rho_c = 2\bar{p}$, 故有:

$$W_c = \frac{4\bar{p}^2 t_d S}{\rho_0 u}, \quad (18)$$

将式(13)、式(15)和(18)代入式(11), 并整理得:

$$\bar{p} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{3\eta W_0 \rho_0 u}{55\pi t_d}}, \quad (19)$$

$$\text{则有 } p_m = 2\bar{p} = \frac{0.264}{R} \sqrt{\frac{\eta W_0 \rho_0 u}{t_d}}. \quad (20)$$

对水因有: $\rho_0 = 10^3 \text{ kg/m}^3$, $u = 1500 \text{ m/s}$, 代入式(20)计算可得:

$$p_m = \frac{322.76}{R} \sqrt{\frac{\eta W_0}{t_d}}, \quad (21)$$

从式(21)可知, 由于贮存在电容器中的总能量 $W_0 (W_0 = CU_0^2/2)$ 是已知的, 故只需知道放电时间 t_d 就可以求出放电室内任一点的平均压力或最大压力。

将电压 $U_0 = 10 \text{ kV}$, 电容 $C = 4 \mu\text{F}$, 放电时间 $t_d = 0.015 \text{ s}$, 放电半径 $R = 0.01 \text{ m}$, 效率 $\eta = 0.515$ (此值来源于参考文献[1]) 代入式(21)中, 计算得 $p_m = 2\,674\,562 \text{ Pa}$ 。在相同工况下, 参考文献[6]通过实验测得的压力为 $p_m = 2\,798\,000 \text{ Pa}$ 。通过模型计算所得压力与实验所测值相比, 二者的相对误差为 4.4%, 从而证实了该模型的准确性。

3 结语

电液脉冲腔室压力计算数学模型的建立, 可以有效地解决在实验中很难利用传感器直接测定电液脉冲腔室内任意位置处压力的难题。利用本模型能快速通过对放电回路参数、放电时间的确立, 方便地预测电液脉冲腔室内放电通道压力, 为电液脉冲技术在工程中的应用提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 廖振方, 潘志敏, 汪朝晖, 等. 电液脉冲有效作用范围的确定[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(10): 1122-1125.

- Liao Zhenfang, Pan Zhimin, Wang Zhaohui, et al. Effective Working Areas of the Electro-Hydraulic Power Impulse[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(10): 1122-1125.
- [2] 裴江红, 唐川林, 张凤华, 等. 电液脉冲水气射流强化金属表面性能的机理及实验研究[J]. 表面技术, 2007, 36(3): 67-69.
- Pei Jianghong, Tang Chuanlin, Zhang Fenghua, et al. The Principle and the Laboratorial Research on the Surface of Metal Strengthened by the Electro-Hydraulic Impulse Water-Air Jet [J]. Surface Technology, 2007, 36(3): 67-69.
- [3] 蒋翎. 电液脉冲水气射流强化淬火后工具钢的表面研究[J]. 表面技术, 2008, 37(6): 51-53.
- Jiang Ling. Study on Surface of Tool Steel after Quenching Intensified by Electro-Hydraulic Power Impulse Water-Gas Jet[J]. Surface Technology, 2008, 37(6): 51-53.
- [4] 刘成伦, 杜娟, 徐龙君. 电液脉冲法降解酚和苯乙酮的动力学研究[J]. 压电与声光, 2005, 27(5): 490-492.
- Liu Chenglun, Du Xian, Xu Longjun. Research on Destruction Kinetics of Phenol and Acetophenone by Electric-Hydraulic Impulse Discharge Technology[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2005, 27(5): 490-492.
- [5] 张海珍. 医院废水处理技术新进展[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(1): 135-137.
- Zhang Haizhen. New Progress of Technique of the Hospital Sewage Disposal[J]. Environmental Science and Management, 2006, 31(1): 135-137.
- [6] 刘宁, 廖振方, 蔡珍红, 等. 电液液动力特性分析[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(2): 123-125.
- Liu Ning, Liao Zhenfang, Cai Zhenhong, et al. Analysis on Hydrodynamic Characteristics of Electro-Hydraulic Power Pulsed[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(2): 123-125.
- [7] 敖澍, 鲁建举, 周从直, 等. 电液脉冲放电与铁屑内电解法联用处理 TNT 废水试验研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(11): 1981-1984.
- Ao Lu, Lu Jianju, Zhou Congzhi, et al. Research on TNT Wastewater Treatment by Electro-Hydraulic Pulse Discharge/ Iron-Inner-Electrolysis[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(11): 1981-1984.

(责任编辑: 李玉珍)

(上接第 36 页)

- Interacting with An Atom[J]. Acta Physica Sinica, 1995, 44(4): 536-544.
- [7] 顾樵. 双光子 Jaynes-Cummings 模型中的压缩[J]. 物理学报, 1988, 37(5): 751-759.
- Gu Qiao. Squeezing in A Two-Photon Jaynes-Cummings Model [J]. Acta Physica Sinica, 1988, 37(5): 751-759.
- [8] 周鹏, 彭金生. 双光子 Jaynes-Cummings 模型中原子的压缩效应[J]. 物理学报, 1989, 38(12): 2044-2048.
- Zhou Peng, Peng Jinsheng. Atomic Squeezing Effects in the Two-Photon Jaynes-Cummings Model[J]. Acta Physica Sinica, 1989, 38(12): 2044-2048.
- [9] Pan C N, Fang M F, Hu Y H, et al. Squeezing Properties of A Trapped Ion in the Running-Wave Laser Beyond the Lamb-Dicke Limit[J]. Chin. Phys., 2007, 16(6): 1549-1552.
- [10] 林继成, 郑小虎, 曹卓良. Kerr 介质中双模纠缠相干光与 Bell 态原子相互作用系统的原子偶极压缩[J]. 物理学报, 2007, 56(2): 0837-0844.
- Lin Jicheng, Zheng Xiaohu, Cao Zhuoliang. Dipole Squeezing in the System of the Two-Mode Entangled Coherent Field Interacting with Atoms in Bell States in Kerr Medium [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(2): 0837-0844.
- [11] 潘长宁, 赵学辉, 杨迪武. 耗散环境下原子库场相互作用系统中原子的偶极压缩特性[J]. 物理学报, 2010 (已接收).
- Pan Changning, Zhao Xuehui, Yang Diwu. Dipole Squeezing of Atomic Systems in Dissipative Environments[J]. Acta Physica Sinica, 2010(accepted).
- [12] Scully M O, Zubairy M S. Quantum Optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

(责任编辑: 李玉珍)