快变换超音频直流脉冲 GTAW 电弧行为

杨明轩 齐铂金 从保强 李 伟

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 基于超音频直流脉冲钨极氩弧焊(GTAW,Gas Tungsten Arc Welding)电源输出脉冲电流沿变化率 $di/dt \geqslant 50\ A/\mu s$ 的超音频直流脉冲方波电流,将其用于 0Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢 GTAW 焊接过程,研究分析了焊接电弧特性、电弧力及焊缝熔透特性. 结果表明:超音频直流脉冲方波电流参数对电弧电学特性、形态及电弧力产生显著影响,与常规直流 GTAW 相比,快变换超音频直流脉冲 GTAW 电弧表现出明显的收缩效应,焊缝熔深在一定范围增大,熔宽减小,平均电弧力大幅增长,焊接效率提高.

关 键 词: 快变换超音频脉冲; 钨极氩弧焊; 电弧行为; 电弧力

中图分类号: TG 403

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)04-0468-05

Fast-convert ultrasonic frequency pulse GTAW arc behavior

Yang Mingxuan Qi Bojin Cong Baoqiang Li Wei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on ultrasonic frequency pulse gas tungsten arc welding(GTAW) power, the out current with $di/dt \geqslant 50\ A/\mu s$ for the ultrasonic fast current rate of rise and fall was achieved. The arc behavior was investigated in the use of ultrasonic frequency pulse tungsten inert-gas welding for 0Cr18Ni9Ti stainless steel, including the electrical characteristics of arc, the arc force and welds penetration rate. The experimental results show that compared with conventional direct current GTAW, arc plasma has an obvious pinch effect, and the arc force a huge increment with the effect of ultrasonic frequency pulse current. Similarly, the weld penetration of ultrafast frequency pulse GTAW could be improved with enhance of the arc force as the increasing depth of penetration and the decreasing weld width. It is beneficial to improve weld quality and effectively to achieve perfect welds of 0Cr18Ni9Ti stainless steel.

Key words: fast-convert ultrasonic frequency pulse; GTAW(gas tungsten arc welding); arc behavior; arc force

奥氏体不锈钢由于具有无磁性、良好的焊接性能及抗蚀性能,成为产量、用量最大、型号最多的一种不锈钢[1],常规直流钨极氩弧焊(GTAW,Gas Tungsten Arc Welding)是其常用的焊接方法.

高频脉冲焊接是一种先进的焊接工艺方法. 研究表明,在自由电弧的基础上加入高频脉冲电流的调制作用,可提高电弧的稳定性,有利于改善和提高焊接质量[2]. 目前研究发现:高频脉冲电流将引起明显的电弧收缩效应[3],增强了电弧挺度和能量密度,与同等功率常规直流 GTAW 相比,电弧压力有较大提高[4]. 脉冲电流焊接时,周期性变化的电弧压力对熔池的搅拌作用能够破碎枝晶,增加熔池的结晶中心,促进焊缝晶粒细化[5]. 同时,脉冲电流幅值、频率、占空比,电流沿的变化速率、电弧力对电弧形态及其热力作用等有较大影响. 由于 GTAW 电源设备的局限,传统

收稿日期: 2010-12-01; **网络出版时间**: 2012-04-20 09:13

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120420.0913.001.html

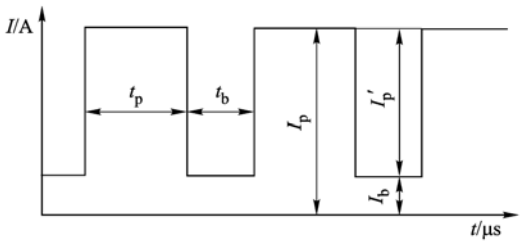
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975015)

作者简介: 杨明轩(1985 -),男,四川南充人,博士生,oybenq@gmail.com.

高频脉冲焊接在电流较大时很难实现电流沿的快速变换. 本文基于自主研发的脉冲 GTAW 焊接电源实现了 0Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢快变换超音频直流脉冲 GTAW 试验,分析其电弧电学特性、电弧力、电弧形态和焊缝熔透特性,归纳阐述其电弧行为,对快变换超音频直流脉冲 GTAW 的工程应用具有重要意义.

1　实验方法

快变换超音频直流脉冲 GTAW 电源可实现电流变换频率≥20 kHz 且具有超快速的电流沿变化速率($di/dt \geq 50$ A/μs),快变换超音频直流脉冲方波电流理想波形如图 1 所示,其中,脉冲峰值电流 $I_p = I_b + I'_p$,脉冲电流占空比 $\delta = t_p/(t_b + t_p)$.



I_b—脉冲基值电流;I'_p—脉冲幅值电流;I_p—脉冲峰值电流;t_b—脉冲基值电流作用时间;t_p—脉冲峰值电流作用时间.

图 1　超音频直流脉冲电流波形示意图

进行电弧电学特性实验时,从氩弧焊枪和焊接工件两近端引线,经过 RC 滤波电路由数字式示波器获得电弧电压;采用 LT-300 霍尔电流传感器(1∶2 000)获取焊接输出回路电流信号. 实验过程中焊接有效电流值计算公式如式(1)所示;电弧形态通过数码摄像采集系统(100 帧/s)获得.

$$I_{eff} = \sqrt{(1-\delta) \times I_b^2 + \delta \times I_p^2} \qquad (1)$$

式中 I_{eff}为焊接电流有效值.

基于精度可达 0.01 g 的精密测力传感器及轻质支架式焊接平台搭建了平均电弧力测量平台,可在正常焊接状态下对不锈钢超音频直流脉冲 GTAW 焊平均电弧力进行测量,测量值单位 g,经单位换算以力单位 mN 度量(取 $g = 10\ m/s^2$).

2　电弧特性

2.1　电弧电学特性

试验条件:6 mm 厚 0Cr18Ni9Ti 不锈钢平板(80 mm × 50 mm),焊前经砂纸打磨和酒精清洗;电极为 ϕ2.4 mm 铈钨 W-2% Ce,电极顶端与工件表面距离 3 mm;保护气为 99.99% 普通氩气,流量 12 L/min,焊接速度 v = 120 mm/min. 脉冲电流参数如表 1 所示,分别取常规直流 GTAW 和快变换超音频直流脉冲 GTAW 脉冲电流频率 f = 20 kHz(如图 2 所示)、40 kHz 时的电弧电压以分析脉冲电流对电弧电学特性的影响.

表 1　脉冲电流参数表

焊接方法	脉冲电流参数	I_{eff}/A
快变换超音频直流脉冲 GTAW	I_b = 50 A; I_p = 130 A; f = 20 kHz,40 kHz; δ = 50%	98.5
常规直流 GTAW		100

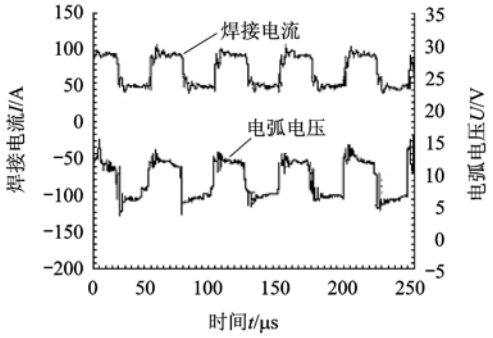


图 2　电弧 U-I 波形

快变换超音频直流脉冲 GTAW 过程中,以电压有效值表征电弧电压,则由脉冲频率 20 kHz 和 40 kHz 时的电弧电压波形可得该脉冲频率下的电弧电压分别为 10.10 V 和 10.25 V,同时可得常规直流 GTAW 焊电弧电压值为 9.87 V. 由图 3 可知,在电流有效值相近的条件下,快变换超音频直流脉冲 GTAW 的电弧电压高于常规直流 GTAW. 分析认为,随着脉冲频率的增大,由于快变换超音频直流脉冲方波电流的作用产生径向脉动电磁收缩力,使得电弧产生收缩效应[6],从而导致电弧电压增大.

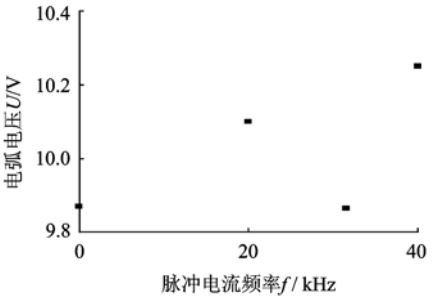


图 3　电弧电压与脉冲频率关系

焊接热输入 P 如式(2)所示[7],若以 U_b和 U_p 分别表示基值电压、峰值电压,则快变换超音频直流脉冲 GTAW 的焊接热输入 P_p可用式(3)表示.

$$P = \eta \cdot \frac{UI}{v} \qquad (2)$$

式中,P 为焊接热输入,kJ/mm;η 为焊接热效率;U 为电弧电压,V;I 为焊接电流,A;v 为焊接速度,mm/s.

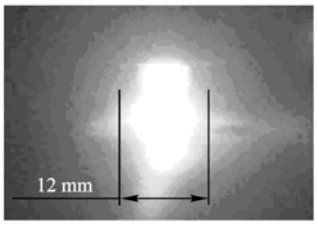
$$P_{\mathrm{p}} = \eta \cdot \frac{\frac{1}{T}\int_t U_t I_t \mathrm{d}t}{v} = \eta \cdot \frac{U_{\mathrm{p}} I_{\mathrm{p}} + U_{\mathrm{b}} I_{\mathrm{b}}}{2v} \tag{3}$$

式中,P_{p}为快变换超音频直流脉冲 GTAW 焊接热输入,kJ/mm;U_{b}为基值电压;U_{p}为峰值电压.

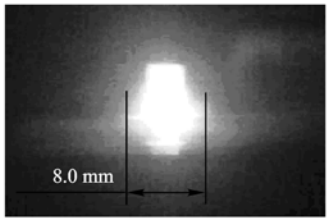
焊接速度保持恒定(v = 120 mm/min),有效电流保持一致,由于脉冲电流的作用,试验中 $U_{\mathrm{p}} > 2U_{\mathrm{b}}$,设焊接热效率系数 η 为常数,由式(1)~式(3)可得:满足 $I \leqslant \frac{U_{\mathrm{b}} I_{\mathrm{b}} + U_{\mathrm{p}} I_{\mathrm{p}}}{U_{\mathrm{b}} + U_{\mathrm{p}}}$时有 $P_{\mathrm{p}} > P$,故经验证本批次试验中,在同等焊接有效电流情况下,基于奥氏体不锈钢的快变换超音频直流脉冲 GTAW 焊接热输入高于常规直流 GTAW.

2.2 电弧形态

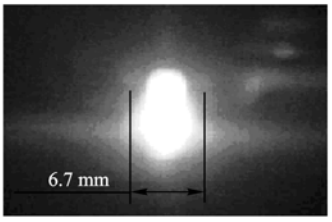
试验条件与 2.1 节相同,焊接速度 120 mm/min. 电弧成功引燃并定点燃烧约 5 s 后利用数码摄像采集系统(100 帧/s)获得焊接过程中电弧的工作形态,连续记录 15 s 以上. 通过所获取的脉冲占空比 δ = 50%、脉冲频率 f = 20 kHz 和 80 kHz 时的图像(如图 4 所示)测量电弧下截面尺寸,分析电弧形态变化.



a 常规直流



b f = 20 kHz(δ = 50%)



c f = 80 kHz(δ = 50%)

图 4 GTAW 电弧形态

从图 4 可得,与常规直流 GTAW 相比,快变换超音频直流脉冲 GTAW 电弧出现明显收缩. 分析认为,这是因为超音频脉冲电流产生了脉动的径向电磁收缩力,随脉冲频率的增大,电弧电流密度的脉动变化随之增强,根据电磁学理论,电弧的收缩作用也将更为明显[8],因此超音频脉冲电流提高了电弧挺度,使其方向性、稳定性增强;另外,收缩的电弧使得电弧热量集中,提高了能量密度.

3 平均电弧力

试验条件与 2.1 节中相同,由第 1 节所述方法测量常规直流 GTAW 平均电弧力以及脉冲电流占空比 20% 和 50% 下,脉冲频率分别为 20 kHz 和 40 kHz 时的快变换超音频直流脉冲 GTAW 平均电弧力,见图 5.

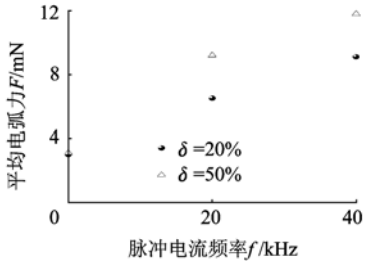


图 5 超音频直流脉冲 GTAW 电弧力

根据以上实验数据可知,常规直流 GTAW 电弧力为 3.0 mN,与之相比,快变换超音频直流脉冲 GTAW 电弧力提高了 2 倍以上. 分析认为,电弧力包括电磁力、等离子流力以及气体蒸发力,其中电磁力和等离子流力是主要来源[9]. 轴向电磁力 F_{zv}与电流平方成正比,如式(4)所示.

$$F_{\mathrm{zv}} = I^2 \ln \frac{R_{\mathrm{b}}}{R_{\mathrm{a}}} \tag{4}$$

式中,F_{zv}为轴向电磁力;R_{a}为锥形弧柱上截面半径;R_{b}为锥形弧柱下截面半径.

由于 R_{a}所指的上截面即钨极端部,故认为 R_{a}恒定,结合电弧形态数据分析,由于超音频脉冲电流的作用,电弧收缩,造成 R_{b}减小,由式(1)可知,快变换超音频直流脉冲 GTAW 轴向电磁力 F'_{zv}如式(5)所示.

$$F'_{\mathrm{zv}} = [(1-\delta) \times I_{\mathrm{p}}^2 + \delta \times I_{\mathrm{b}}^2] \ln \frac{R_{\mathrm{b}}}{R_{\mathrm{a}}} \tag{5}$$

由于实验过程中有效电流保持一致,则轴向电磁力与电弧截面半径之比的自然对数值成正比,故与常规直流比较,随着 R_{b}的减小,快变换超音频直流脉冲 GTAW 焊轴向电磁力减小.

焊接电弧中等离子流力的径向分布一般认为呈高斯或双面指数分布,若假设为双面指数分布,

则在包含电弧轴线的轴向截面上,等离子流力表达式如式(6)所示.

$$F_r = F_{max}\exp(-a\mid r\mid) \tag{6}$$

式中,F_r为电弧等离子流力;F_{max}为电弧轴线处压力;a 为分布曲线集中系数,常数;r 为径向坐标值.

$$\overline{F}_r = \int_0^{\pi}\int_{-R_b}^{R_b}\frac{1}{2r}F_r\mathrm{d}r\mathrm{d}\theta = \frac{\pi a^2 F_{max}}{2R_b^2}\int_0^{R_b}\frac{r^3}{1-\mathrm{e}^{-ar}(1+ar)}\mathrm{e}^{-ar}\mathrm{d}r \tag{7}$$

式中$\overline{F}_r$为电弧平均等离子流力.

电弧下截面区域所受电弧等离子流力平均值$\overline{F}_r$如式(7)所示,结合常规直流 GTAW 以及占空比 50% 下快变换超音频直流脉冲 GTAW 电弧形态数据,运用积分逼近法计算可得其量化结果,如表 2 所示.

表 2　电弧力主要构成因素

组号	试验分析参数	常规直流 GTAW	$\delta=50\%$	
			$f=20$ kHz	$f=40$ kHz
1	R_b/mm	6.0	4.0	3.5
2	F'_{zv}	1	0.82	0.76
3	$\overline{F}_r$	1	2.06	2.56

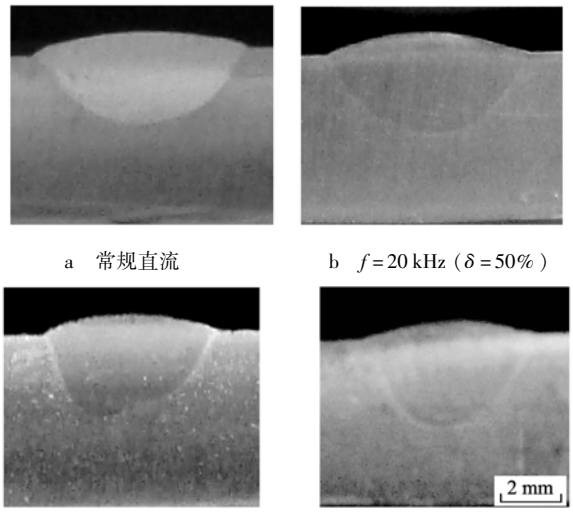
注:F'_{zv}与$\overline{F}_r$为量化值,视常规直流对应值为 1 作比较.

由表 2 可知,与常规直流 GTAW 比较,快变换超音频直流脉冲 GTAW 平均等离子流力有 2 ~ 2.6 倍的增加,而轴向电磁力略有降低. 分析认为,由于超音频直流脉冲方波电流的作用,电弧出现收缩,由式(7)积分逼近可得其平均等离子流力 $\overline{F}$ 增大,在一定频率范围内,平均等离子流力随电弧收缩程度的增大而增加. 有研究表明:等离子流力占电弧机械作用力的 80% 以上[10],因此可推断等离子流力的增加是导致平均电弧力增大的主要原因.

4　焊缝熔透特性

试验条件与 2.1 节中相同,可获得常规直流 GTAW 以及快变换超音频直流脉冲 GTAW 占空比 $\delta=50\%$ 的焊缝熔透成形,其中脉冲频率分别为 20 kHz,40 kHz,80 kHz 时的焊缝熔透成形如图 6 所示. 通过测量计算可得其焊缝熔深、熔宽,如图 7 所示.

由图 7 可知,快变换超音频直流脉冲 GTAW 焊缝熔宽减小,熔深增加,焊缝熔透率提高,从而有利于减小焊缝热影响区并提高焊接质量. 分析认为,由于电弧收缩效应,熔宽随电弧径向尺寸的减小而减小,同时收缩的电弧导致电弧挺度增加、能量集中. 由第 3 节分析可知,电弧力对熔池的轴向作用增大,另外,电弧中的磁场强度与导电半径的平方成反比,电弧高温区被压缩,磁场强度大幅增加,电磁对流增强,使熔池表面金属向中心流动,因此电弧力和电磁对流增强共同作用,使得焊缝熔深增大,提高了焊缝熔透率[11]. 另有研究表明:随着焊接热输入的增加,焊缝熔透率将显著提高[12]. 根据 2.1 节所述结论,奥氏体不锈钢的快变换超音频直流脉冲 GTAW 的焊接热输入高于常规直流 GTAW,故前者的焊缝熔透率较高.



a　常规直流　　b　$f=20$ kHz ($\delta=50\%$)

c　$f=40$ kHz ($\delta=50\%$)　　d　$f=80$ kHz ($\delta=50\%$)

图 6　快变换超音频直流脉冲 GTAW 焊缝成形

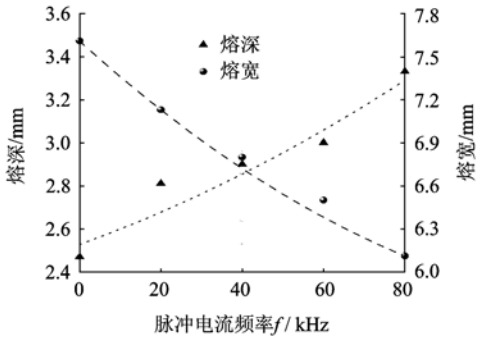


图 7　焊缝熔深和熔宽与频率的关系

5　结　论

1) 超音频直流脉冲方波电流使电弧显著收缩,电弧挺度及能量密度提高;

2) 与常规直流 GTAW 相比,快变换超音频直流脉冲 GTAW 平均电弧力有显著增长;

3) 快变换超音频直流脉冲 GTAW 焊缝熔宽减小,熔深增大,焊缝熔透率提高.

参考文献 (References)

[1] 赵进刚,张宝伟,王明林. 高强度奥氏体不锈钢的发展[J].

材料开发与应用,2005,20(4):38-40
Zhao Jingang, Zhang Baowei, Wang Minglin. Development of high strength austenitic stainless steel[J]. Development and Application of Material, 2005, 20(4): 38-40(in Chinese)

[2] 从保强,齐铂金,周兴国. 超快变换高频变极性方波TIG电弧行为[J]. 焊接学报,2009,30(6):87-90
Cong Baoqiang, Qi Bojin, Zhou Xingguo. TIG arc behavior of ultra fast-convert high-frequency variable polarity square wave[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(6): 87-90(in Chinese)

[3] Ghosh P K, Dorn L, H bner M, et al. Arc characteristics and behavior of metal transfer in pulsed current GMA welding of aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 194: 163-175

[4] Onuki, Yoshisa Anazawa, Masayasu Nihei, et al. Development of a new high-frequency, high-peak current power source for high constricted arc formation[J]. Jpn J Appl Phys, 2002(41): 5821-5826

[5] 齐铂金,许海鹰,张伟. 0Cr18Ni9Ti超音频脉冲TIG焊接头组织与性能[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(2):132-133
Qi Bojin, Xu Haiying, Zhang Wei. Microstructure and property analysis of 0Cr18Ni9Ti joints welded by ultra-sonic pulse tungsten-inert-gas welding technology[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(2): 132-133(in Chinese)

[6] Amin M. Pulse current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding[J]. Metal Construction, 1983(15): 272-278

[7] Jerzy Nowacki, Pawel Pybicki. The influence of welding heat input on submerged arc welded duplex steel joints imperfections[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005: 1082-1088

[8] 赵家瑞,孙栋,胡绳荪,等. 高频脉冲TIG焊电弧的阳极行为[J]. 焊接学报,1992,13(1):59-66
Zhao Jiarui, Sun Dong, Hu Shengsun, et al. Arc behavior of high frequency pulse TIG welding arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1992, 13(1): 59-66(in Chinese)

[9] 安藤弘平,长谷川光雄. 焊接电弧现象[M]. 北京:机械工业出版社,1985:249-250
Ando K, Hasegawa M. Welding arcphenomena[M]. Beijing China Machine Press, 1985: 249-250(in Chinese)

[10] 贾昌申,肖克民,殷咸青. 焊接电弧的等离子流力研究[J]. 西安交通大学学报,1994,28(1):23-28
Jia Changshen, Xiao Kemin, Yin Xianqing. The plasmas flow force of welding arc[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1994, 28(1): 23-28(in Chinese)

[11] 孙清洁,杨春利,林三宝,等. 超声钨极氩弧复合焊金属熔化行为分析[J]. 焊接学报,2010,31(3):41-44
Sun Qingjie, Yang Chunli, Lin Sanbao, et al. Research on melting metal behavior of ultrasonic-tungsten inert gas welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(3): 41-44(in Chinese)

[12] Quan Y J, Chen Z H, Gong X S, et al. Effects of heat input on microstructure and tensile properties of laser welded magnesium alloy AZ31[J]. Materials Characterization, 2008(59): 1491-1497

(编 辑:文丽芳)

(上接第467页)

[4] 毛范海. AD型喷油泵燃油喷射系统计算机建模和仿真分析研究[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2003
Mao Fanhai. Modeling and simulation on fuel injection system of AD type pump by computer[D]. Dalian: School of Mechannical Engineering, Dalian University of Technology, 2003(in Chinese)

[5] Shu Jianjun. A finite element model and electronic analogue of pipeline pressure transients with frequency dependent friction[J]. Transactions of ASME, 2003, 25(1): 194-198

[6] 蒋丹. 存在气泡和气穴时无阀微泵动态特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电学院,2009
Jiang Dan. Study on dynamic characteristics of a valve-less micropump accompanying gas bubbles and cavitation[D]. Harbin: School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 2009(in Chinese)

[7] 李松晶,鲍文. 采用MATLAB Simulink的液压管路瞬态压力脉动分析[J]. 工程力学,2006,23(9):184-188
Li Songjing, Bao Wen. Analysis of transient hydraulic pressure pulsation in pipelines using MATLAB Simulink[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9): 184-188(in Chinese)

[8] Li Songjing, Yang Chifu, Jiang Dan. Modeling of hydraulic pipeline transients accompanied with cavitation and gas bubbles using parallel genetic algorithms[J]. Journal of Applied Mechanics, 2008, 75(4): 0410121-0410128

[9] Jensen M J. Numerical simulations of interface dynamics in microfluidics[D]. Copenhagen: Department of Micro and Nanotechnology, Technical University of Denmark, 2005

[10] 王小平,曹立明. 遗传算法-理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002:19-49
Wang Xiaoping, Cao Liming. Genetic algorithm-theory, application and implementation of software[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002: 19-49(in Chinese)

(编 辑:张 嵘)