

# 螺杆泵井下油水分离系统设计及地面试验

赵传伟, 李增亮, 董祥伟

(中国石油大学机电工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:**将地面驱动螺杆泵与井下油水分离系统相结合,设计出一种地面驱动螺杆泵井下油水分离系统,介绍系统的结构组成、工作原理,双流道单螺杆泵衬套工作部分长度及双级串联式水力旋流器设计方法。选择X井进行双级串联式水力旋流器的地面实际介质分离性能试验。结果表明:在一定范围内,分流比越大底流含油质量分数越小,底流含油质量分数随入口流量的增大先减小后增大;当分流比大于0.3、入口流量为24~42 m<sup>3</sup>/d时,底流含油质量分数小于200×10<sup>-6</sup>;系统关键装置的设计方法是合理的。

**关键词:**螺杆泵; 井下油水分离; 水力旋流器; 设计; 试验

**中图分类号:**TE 933.3 **文献标志码:**A

## Design and ground test of downhole oil-water separation system with screw pump

ZHAO Chuan-wei, LI Zeng-liang, DONG Xiang-wei

(College of Mechanical Electronic Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** An innovative system of downhole oil-water separation with surface driving screw pump was designed by combination of the surface driving screw pump and downhole oil-water separation system. The structure compositions and working principle of this system, the design method of the bushing effective length of the single screw pump with double flow channels and the dual-class hydrocyclone in series were introduced. The X well was used to the separation performance test of the dual-class hydrocyclone in series with actual media on the ground. The results show that in a certain range, the oil mass fraction of the underflow decreases with the increase of the split ratio and it increases firstly and then decreases with the increase of the inlet flow rate. When the split ratio is larger than 0.3 and the inlet flow rate is between 24 m<sup>3</sup>/d and 42 m<sup>3</sup>/d, the oil mass fraction of the underflow is below 200×10<sup>-6</sup>. The design method of the key devices is reasonable.

**Key words:** screw pump; downhole oil-water separation; hydrocyclone; design; test

大多数油田进入开采中后期时,为了提高原油产量,普遍采用注水强驱技术,这导致了油井含水量逐年增加,开采成本越来越高,如何减少高含水油井的产水量的同时提高采油量,达到节能、高效、环保的目的已成为油田采油今后面临的重大课题,在这种大背景下,井下油水分离技术应运而生<sup>[1-5]</sup>。井下油水分离技术实现了在同一井眼内进行油和水的分离、低含水原油举升以及分离水回注<sup>[6-7]</sup>。国内该技术仍处于装置研发与试验推广阶段,国外已试验成功的电潜泵和有杆泵井下油水分离系统,在一定程度上解决了油井产水过多的问题。但对于电潜泵井

下油水分离系统,旁通管、电机保护器、双电潜泵及动密封使得系统比较复杂,而且受陆地油井井眼尺寸限制,不易于井下实施<sup>[8-10]</sup>。对于有杆泵井下油水分离系统,双液流泵结构复杂,具有较大的横向截面尺寸,亦不易于井下实施。这些问题成为制约该技术推广应用的重要原因之一。笔者将地面驱动螺杆泵与井下油水分离系统相结合,设计一种新型井下油水分离系统。

## 1 结构组成及工作原理

该螺杆泵井下油水分离系统由地面部分和井下

部分构成。地面部分主要是井口装置;井下部分(图1)主要包括双流道单螺杆泵、双级串联式水力旋流器和一体化坐封工艺管柱。系统的设计方案是:双流道单螺杆泵作为增压泵,泵后联接双级串联式水力旋流器,采用双封隔器加内外插管形式的井下一体化坐封工艺管柱结构,可实现采上注下。

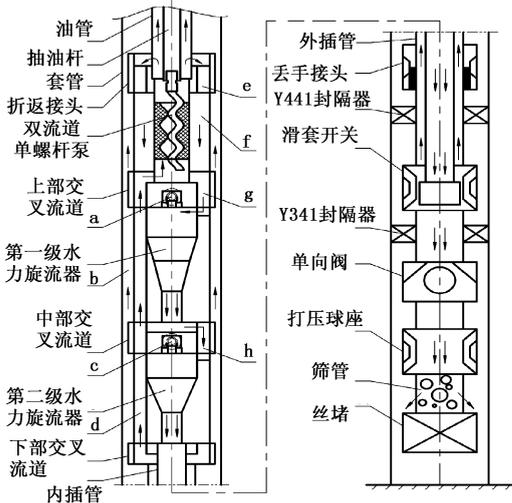


图1 地面驱动螺杆泵井下水分离系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of downhole oil-water separation with surface driving single screw pump

生产层的高含水油经滑套开关,内、外插管的环形空间,再穿过下部交叉流道,进入流道d,穿过中部交叉流道,进入流道b,通过上部交叉流道进入双流道单螺杆泵的内部增压流道。经泵增压后的液体进入油管直达井口,在井口被密封住,当达到注水压力时,高压液体由折返接头返回,进入泵的外部流道f,再经过流道g进入第一级水力旋流器的入口,分离后的高含油液体经第一级溢流流道a(其方向垂直于纸面向里)进入油套环空并被举升到地面,分离出的高含水液体经流道h进入第二级水力旋流器进行二次分离。经再次分离后,分离出的高含油液体经第二级溢流流道c(其方向垂直于纸面向里)进入油套环空并被举升到地面,分离出的含少量油液体则经内插管、滑套开关、单向阀、打压球座、筛管注入到注水层。

## 2 关键装置设计

### 2.1 双流道单螺杆泵

双流道单螺杆泵为油和水的分离、油的举升及水的注入提供动力。该泵采用地面驱动方式,由于抽油杆的存在,必须把泵安置在水力旋流器的上方。所以从生产层采出的液体经泵增压后需要一个向下折返的流道,返回水力旋流器进行油水分离。螺杆断面直径、衬套导程和偏心距可按照文献[11]中方

法确定。对于地面驱动螺杆泵井下油水分离系统,若把注水层注水压力作为设计时的已知条件,一般来说,泵提供的压力满足注水压力的同时,也能满足举升压力。因此,可按下述方法确定衬套工作部分的长度。

泵的压头

$$H = p_{zs} + \Delta h_{dl} + \Delta p_{gx} - p_{jy} \quad (1)$$

式中, $H$ 为双流道单螺杆泵的压头,Pa; $p_{zs}$ 为注水层注水压力,Pa; $\Delta h_{dl}$ 为两级水力旋流器的底流压力损失之和,Pa; $\Delta p_{gx}$ 为第二级水力旋流器末端到注水层的管线压力损失,Pa; $p_{jy}$ 为第一级水力旋流器到注水层的静压力,Pa。

$\Delta h_{dl}$ 可由经验公式<sup>[12]</sup>确定

$$\Delta p_{i-u} = k_2 (FQ_i)^{\alpha_2} \quad (2)$$

式中, $\Delta p_{i-u}$ 为单级水力旋流器溢流压力损失,Pa; $Q_i$ 为单级水力旋流器的入口流量, $m^3/h$ ; $F$ 为单级水力旋流器的分流比(溢流流量与入口流量之比); $k_2$ 、 $\alpha_2$ 为与水力旋流器结构有关的常数,由试验确定。

可求得 $p_{jy}$ 为

$$p_{jy} = \rho' g (L_{zs} - L_{xg}) \quad (3)$$

式中, $\rho'$ 为液体密度, $kg/m^3$ ; $g$ 为重力加速度, $m/s^2$ ; $L_{zs}$ 为平均注水深度,m; $L_{xg}$ 为下泵深度,m。

由于分离后注入液的黏度接近于水,处于水力光滑区,所以可求得 $\Delta p_{gx}$ <sup>[12]</sup>为

$$\Delta p_{gx} = \frac{\lambda l \rho v^2}{2d} \quad (4)$$

其中

$$v = \frac{4Q(1-M)}{\pi d_0^2} \quad (4)$$

式中, $\lambda$ 为阻力系数; $l$ 为第二级水力旋流器末端到注水层的管线长度,m; $v$ 为液流流速, $m/s$ ; $\rho$ 为液体密度, $kg/m^3$ ; $d$ 为内插管内径,m; $Q$ 为两级水力旋流器入口流量, $m^3/s$ ; $M$ 为两级水力旋流器的分流比,即两级水力旋流器溢流口流量之和与入口流量的比值; $d_0$ 为第二级水力旋流器的底流管内径,m。

以区块的平均注水和注水层中深为依据,可求得 $p_{zs}$ 为

$$p_{zs} = p_{jk} + p_{pj} - \Delta p \quad (5)$$

式中, $p_{jk}$ 为井口到注水层的静水柱压力,Pa; $p_{pj}$ 为地面平均注水压力,Pa; $\Delta p$ 为整个流道的压力损失(可由式(4)求得,此时 $l=L_{zs}$ ),Pa; $d$ 为油管内径; $v$ 为水流速度。

衬套工作部分的长度 $L$ 为

$$L = \frac{HT}{\Delta p'} \quad (6)$$

式中,  $T$  为衬套导程, mm;  $\Delta p'$  为衬套单个导程的压力增压值, Pa, 对于高压单螺杆泵(排出压力在 3~7 MPa),  $\Delta p'$  为 0.5~0.7 MPa。

## 2.2 双级串联式水力旋流器

双级串联式水力旋流器主要由第一级水力旋流器、第二级水力旋流器、上部交叉流道、中部交叉流道和下部交叉流道构成。其中, 第一级水力旋流器采用双锥结构, 实现油水的粗分离; 第二级水力旋流器采用单锥结构, 实现油水的精分离。不同工况的油井, 经过匹配计算, 两级水力旋流器可以配置不同内径的溢流嘴和底流嘴<sup>[6]</sup>, 溢流嘴装在第一级和第二级水力旋流器的溢流口上, 底流嘴装在第二级水力旋流器的底流口上。交叉流道的设计保证了分离、注入、举升 3 个过程同时进行、互不干扰。水力旋流器的主要结构参数为主直径  $D$ 、锥角  $\beta$ 、溢流嘴内径  $D_o$ , 其他结构尺寸可根据主直径  $D$ 、锥角  $\beta$  来确定。第一级水力旋流器: 圆柱段内径  $D_1 = 2D$ ; 圆柱段长度  $L_{c1} = D_1$ ; 底流管内径  $D_{u1} = 0.5D$ ; 底流管长度  $L_{u1} = 40D_{u1}$ ; 大锥段长度  $L_d = D/[2\tan(\beta_1/2)]$ ; 小锥段长度  $L_x = (D - D_{u1})/[2\tan(\beta_1/2)]$ ; 当量入口直径  $D_{i1} = 1000\sqrt{4Q/[24 \times 3600 \times \pi v]}$ ; 入口长宽比  $k_1 = 3.43$ ; 入口宽度  $D_{ik1} = D_{i1}\sqrt{\pi/k_1}/2$ ; 入口长度  $D_{ic1} = D_{i1}\sqrt{\pi k_1}/2$ ; 入口含油质量分数  $C_1 \leq 1, 1 < C_1 < 5, 5 < C_1 < 10, C_1 \geq 10$  时, 其对应的溢流嘴内径  $D_{o1}$  分别为 2.5、3.0、4.0、5.0 mm。

第二级水力旋流器: 圆柱段内径  $D_2 = D_1$ ; 圆柱段长度  $L_{c2} = D_2$ ; 底流管内径  $D_{u2} = 0.33D_2$ ; 底流管长度  $D_{u2} = 0.33D_2$ ; 锥段长度  $L_x = (D_2 - D_{u2})/[2\tan(\beta_2/2)]$ ; 当量入口直径  $D_{i2} = 0.25D_{u2}$ ; 入口长宽比  $k_2 = 3.43$ ; 入口宽度  $D_{ik2} = D_{i2}\sqrt{\pi/k_2}/2$ ; 入口长度  $D_{ic2} = D_{i2}\sqrt{\pi k_2}/2$ ; 溢流嘴内径  $D_{o2} = D_{o1}/2$ 。

## 3 地面试验

根据一般地面驱动螺杆泵油井的产量(10~60 m<sup>3</sup>/d)及目前国外井下有水分离系统注入水含油质量分数达到的水平(不超过  $200 \times 10^{-6}$ ), 设计第一级水力旋流器的结构参数为: 圆柱段内径、长度均为 32 mm, 大锥角  $\beta_1 = 20^\circ$ <sup>[15]</sup>, 小锥角  $\beta_1' = 2^\circ$ <sup>[15]</sup>, 大锥段长度为 41.2 mm, 小锥段长度为 229.2 mm, 底流管内径为 8 mm, 底流管长度为 320 mm, 当量入口直径为 4.96 mm, 入口长度为 8.1 mm, 入口宽度为 2.4 mm, 溢流嘴内径取 3 mm; 第二级水力旋流器的结构参数为: 圆柱段内径、长度均为 32 mm, 锥角  $\beta_2 = 6^\circ$ , 锥段长度为 204.5 mm, 底流管内径为 10.6 mm, 底流管长

度为 424 mm, 当量入口直径为 2.65 mm, 入口长度为 4.3 mm, 入口宽度为 1.3 mm, 溢流嘴内径为 1.5 mm。

为确保该双级串联式水力旋流器在井下有良好的分离效果, 选取某区块 X 井, 进行地面实际介质分离性能试验, 确定入口流量  $Q$  和分流比  $M$  的最佳范围, 以达到底流(注入水)含油质量分数低于  $200 \times 10^{-6}$  的要求。X 井生产层位 XS2 77~XS2 92, 生产井段 2 104.0~2 193.6 m, 下泵深度 1 296 m, 日产液量为 151.1 m<sup>3</sup>, 含水率为 98.2%, 地面脱气原油黏度为 31 mPa·s, 地面脱气原油密度为 911 kg/m<sup>3</sup>。

### 3.1 试验流程

试验流程如图 2 所示。

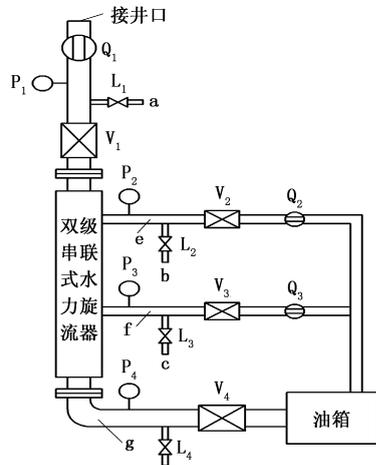


图 2 试验流程图

Fig. 2 Flow diagram of test

井口产出液进入试验装置的入口管线, 然后进入第一级水力旋流器入口, 经第一级分离后, 高含油液体由一级溢流管线流回油箱; 高含水液体进入第二级水力旋流器, 经二级分离后, 高含油液体从二级溢流管线流回油箱; 含少量油的液体经底流管线流回油箱。通过改变截止阀  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$  控制处理流量和分流比, 从而模拟不同入口流量和不同分流比的工况。入口流量  $Q$  为 12~54 m<sup>3</sup>/d, 分流比  $M$  为 0.1~0.7。

### 3.2 结果分析

图 3 为分流比及入口流量对底流含油质量分数的影响。由图 3 可以看出, 在一定的范围内, 分流比越大底流含油质量分数越小, 但为了尽量减少水的举升, 分流比最好不超过 0.7。在一定的范围内, 底流含油质量分数随入口流量的增大先减小后增大。综合来看, 当分流比小于 0.3 或入口流量小于 24 m<sup>3</sup>/d 或大于 42 m<sup>3</sup>/d 以上时, 底流含油质量分数迅速上升, 大于  $200 \times 10^{-6}$ ; 当分流比大于 0.3, 同时入口流量在 24~42 m<sup>3</sup>/d 时分离效果较好, 底流含油

质量分数小于  $200 \times 10^{-6}$ , 能够满足井下油水分离系统的注水要求。

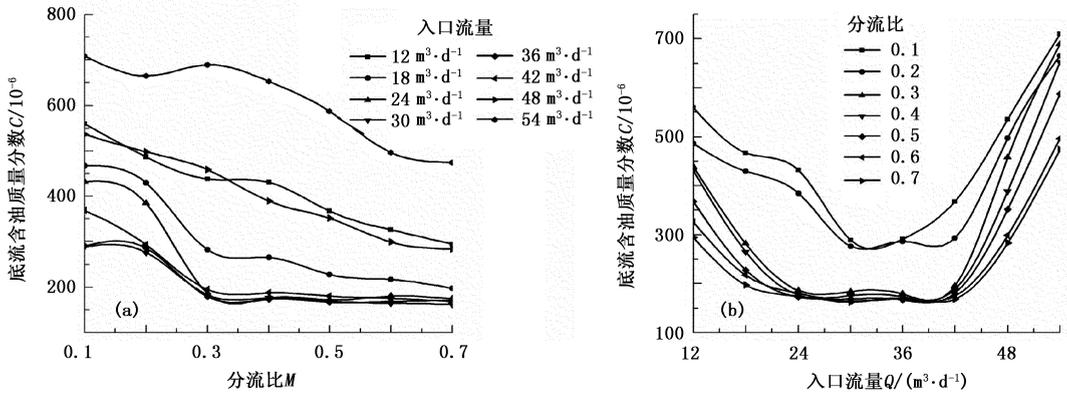


图3 分流比及入口流量对底流含油质量分数的影响

Fig. 3 Effect of different split ratio and inlet flow rate on oil mass fraction of underflow

### 4 实例设计

已知某油区一口高含水油井,油层中深 955 m,注水层中深 1463 m,地面平均注水压力 9.6 MPa,其油水分离系统的下泵深度为 860 m,日产液量  $30 \text{ m}^3$ ,油井产出液含水质量分数 98.3%,地面脱气原油黏度  $23 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,地面脱气原油密度  $842 \text{ kg/m}^3$ 。由第一级水力旋流器的压力损失试验得到:  $k_2 = 24\ 602$ 、 $\alpha_2 = 0.917$ ;由第二级水力旋流器的压力损失试验得到:  $k_2 = 21\ 152$ 、 $\alpha_2 = 0.824$ 。系统下入套管(壁厚 6.2 mm)中,采用油管的壁厚为 7.01 mm,期望分流比为 0.5,回注水中的含油质量分数应低于  $200 \times 10^{-6}$ 。

根据上述条件,经过分析计算可得双流道单螺杆泵参数为:螺杆断面圆直径 25 mm,偏心距 7 mm,衬套长度 8.7 m,金属定子外径 89 mm,内径 81 mm,外壳外径 116 mm,内径 100 mm,转速 180 r/min;井下油水分离装置采用上述双级串联式水力旋流器,其结构参数亦同上。从实例设计结果及地面试验效果来看,本文提出的关键装置的设计方法是合理的。

### 5 结论与建议

(1)相对于电潜泵和有杆泵井下油水分离系统,该系统只用一个螺杆泵,不需要保护器、旁通管、高压电缆,降低了井下机组复杂性,易于井下实施,而且螺杆泵流量均匀,有利于井下油水分离。

(2)分流比为 0.1 ~ 0.7 时,分流比越大底流含油质量分数越小;入口流量为  $12 \sim 54 \text{ m}^3/\text{d}$  时,底流含油质量分数随入口流量的增大先减小后增大;当分流比大于 0.3,同时入口流量在  $24 \sim 42 \text{ m}^3/\text{d}$  时,所设计的双级串联式水力旋流器分离效果较好,底流含油质量分数小于  $200 \times 10^{-6}$ ,能够满足井下油水

分离系统的注水要求。

(3)系统的应用条件为:含水率大于 85%,生产层在注水层之上,油井产液量为  $24 \sim 42 \text{ m}^3/\text{d}$  且流量较均匀,注水层渗透性良好且井下注入压力不超过 25 MPa。

### 参考文献:

[1] 颜廷俊,李增亮,王早祥,等.电潜泵井下油水分离系统方案设计[J].石油机械,2000,28(5):5-6.  
YAN Ting-jun, LI Zeng-liang, WANG Han-xiang, et al. The scheme design of down-hole oil-water separation system with electrical submersible pump[J]. China Petroleum Machinery, 2000, 28(5): 5-6.

[2] KHAN M M, ISLAM M R. Downhole separation of petroleum fluids [J]. Petroleum Science and Technology, 2006, 24(7): 789-805.

[3] MORITIS G. Study shows downhole water separation languished [J]. Journal of Oil and Gas, 2004, 20: 44-45.

[4] MATTHEWS C M, CHACHULA R, PEACHEY B R. Application of down-hole oil/water separation systems in the Alliance Field [J]. Foreign Oilfield Engineering, 1996, 7: 9-12.

[5] 曲占庆,张琪,李恒,等.井下油水分离系统设计及地面监测模型研究[J].西安石油大学学报:自然科学版,2006,21(3):34-37.  
QU Zhan-qing, ZHANG Qi, LI Heng, et al. Design of the downhole oil-water separation system for submersible electric pump wells and its ground monitoring model [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2006, 21(3): 34-37.

[6] 李增亮,张瑞霞,董祥伟.井下油水分离系统电泵机组匹配研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(3):94-95.  
LI Zeng-liang, ZHANG Rui-xia, DONG Xiang-wei.

- Matching research of electric submersible pump unit about down-hole oil-water separation system [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(3): 94-95.
- [7] KOKAL S, Al GHAMDI A, ARAMCO S. Oil/water separation experience from a large oil field [J]. Society of Petroleum Engineers, 2006, 21(3): 365-371.
- [8] 黄中信, 陈李斌. 井下油/水分离(DOWS)技术前景可待[J]. 中国石油和化工, 2007, 8: 41-44.  
HUANG Zhong-xin, CHEN Li-bin. Future of downhole oil/water separation technology [J]. China Petroleum and Chemical Industry, 2007, 8: 41-44.
- [9] STUEBINGER L A, ELPHINSTONE JR G M. Multi-purpose wells: downhole oil/water separation in the future [J]. SPE Production & Facilities, 2000, 15(3): 191-195.
- [10] VEIL J A, LANGHUS B G, BELIEU S. DOWS reduce produced water disposal costs [J]. Oil & Gas Journal, 1999, 97(12): 76-85.
- [11] 万邦烈, 李继志. 石油工程流体机械 [M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 1998: 366-367.
- [12] ALLEN R G. Relating the Hazen-Williams and Darcy-Weisbach friction loss equations for pressurized irrigation [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1996, 12(6): 685-693.
- [13] 姜继海, 宋锦春, 高常识. 液压与气压传动 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 32-34.
- [14] 李增亮, 孙浩玉. 井下水力旋流油水分离器的研制与性能试验 [J]. 石油机械, 2005, 33(11): 44-46.  
LI Zeng-liang, SUN Hao-yu. The study and performance experiment of downhole hydrocyclone oil-water separator [J]. China Petroleum Machinery, 2005, 33(11): 44-46.
- [15] 刘晓敏, 檀润华, 刘银梅, 等. 水力旋流器内分离介质流动分布特征数值模拟 [J]. 石油学报, 2006, 27(2): 129-132.  
LIU Xiao-min, TAN Run-hua, LIU Yin-mei, et al. Numerical simulation on flowing distribution characteristics of separated medium inside the hydrocyclone [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2): 129-132.

(编辑 沈玉英)

(上接第128页)

(3) 虚密度加速收敛的核心在于不同单元设置不同密度, 使得不同单元拥有相同的最大收敛时步, 按照所提出的密度、时步设定方案进行参数设定, 加速收敛效果很明显。

#### 参考文献:

- [1] TONG P. An adaptive dynamic relaxation method for static problems [J]. Computational Mechanics, 1986(1): 127-140.
- [2] OTTER J R H. Computations for prestressed concrete reactor pressure vessels using dynamic relaxation [J]. Nuclear Structural Engineering, 1965, 1(1): 61-75.
- [3] CASSELL A C, KINSEY P J, SEFTON D J. Cylindrical shell analysis by dynamic relaxation [J]. ICE Proceedings, 1968, 39(1): 75-84.
- [4] UNDERWOOD P. Dynamic relaxation [R]. Lockheed Report LMSC-D678265, 1979.
- [5] DAVID R Oakley, NORMAN F Knight Jr. Adaptive dynamic relaxation algorithm for non-linear hyperelastic structures (I): formulation [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1995, 126(1/2): 67-89.
- [6] MICHAEL R Barnes. Form finding and analysis of tension structures by dynamic relaxation [J]. International Journal of Space Structures, 1999, 14(2): 89-104.
- [7] LI Shi-hai, LIU Xiao-yu, LIU Tian-ping, et al. Continuous-based discrete element method and its applications [C]. Beijing: UK-China Summer School/International Symposium on DEM, 2008: 24-30.
- [8] REZAIEE-PAJAND M, ALAMATIAN J. The dynamic relaxation method using new formulation for fictitious mass and damping [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2010, 34(1): 109-133.
- [9] 李士军, 马大为, 朱孙科. 动态松弛方法中 Rayleigh 阻尼参数取值分析 [J]. 计算力学学报, 2010, 27(1): 169-172.  
LI Shi-jun, MA Da-wei, ZHU Sun-ke. Analysis of rayleigh damp parameters in dynamic relaxation method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(1): 169-172.
- [10] 王泳嘉, 邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用 [M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991: 46-47.
- [11] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 11-12.
- [12] 仇伟德. 机械振动 [M]. 东营: 石油大学出版社, 2001: 45-46.
- [13] PAPANAKAKIS M. A method for the automatic evaluation of the dynamic relaxation parameters [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1981, 25(1): 35-48.
- [14] LANRU Jing, SSTEPHANSSON O. Fundamentals of discrete element methods for rock engineering: theory and applications [M]. Amsterdam: Elsevier, 2007.

(编辑 沈玉英)