

文章编号:1000-582X(2008)12-1441-05

## 煤矿区矸石山塑性极限可靠度分析

李东升<sup>1,2</sup>, 刘东升<sup>2</sup>, 王渝昆<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆市地质矿产勘察开发局, 重庆 400039;  
3. 重庆市环卫集团, 重庆 401121)

**摘要:**从塑性极限分析上限定理出发, 结合可靠性分析方法(JC法), 建立矸石山塑性极限分析可靠度极限状态函数, 给出基于塑性极限分析条分法的矸石山滑坡可靠度指标的计算方法, 并对矸石山滑坡稳定性进行了分析。结果表明, 在进行矸石山稳定性计算时, 如不考虑矸石散体参数的变异性, 采用极限平衡理论计算得出的安全系数则存在一定的风险。在参数变异性较大时, 采用可靠度方法进行矸石山的稳定性评价更能体现工程实际。

**关键词:**矸石山; 塑性极限分析; 条分法; 安全系数; 可靠性分析

**中图分类号:**TD824.7

**文献标志码:**A

## Plastic upper bound theory reliability analysis of coal gangue hills

LI Dong-sheng<sup>1,2</sup>, LIU Dong-sheng<sup>2</sup>, WANG Yu-kun<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;  
2. Chongqing Bureau of Geology and Mineral Exploration, Chongqing 400039, P. R. China;  
3. Chongqing Environment and Sanitation Group, Chongqing 401121, P. R. China)

**Abstract:** We established the plasticity limit analysis reliability limit state equation and the reliability calculating formula for gangue hills using the JC method. This work was based on the plasticity mechanics limit analysis upper bound theory and traditional slice methods. A reliability index of gangue hill stability was derived using this equation. It was found that the safety coefficient of gangue hills derived by the limit state equation risks failure if the variability of cohesion and internal friction angle are not considered. When the variability of the strength parameters rises, the reliability theory more consistently projects practicality than the limit state equation for gangue hill stability assessment.

**Key words:** gangue hill; plastic limit analysis; slice methods; safety factor; reliability analysis

重庆是中国地质灾害多发区, 全市地质灾害易发程度按4级进行划分: 地质灾害不易发区(I)、地质灾害低易发区(II)、地质灾害中易发区(III)、地质灾害高易发区(IV)。I面积约735.42 km<sup>2</sup>, 占全市面积的0.89%。II区面积约1.90×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>, 占全市面积的23.07%。III区面积约5.74×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>, 占全市面积的69.60%。IV发区面积为5301.13 km<sup>2</sup>, 占全市面积的6.43%。复杂的地理环境、多山地貌,

使得矿山地质灾害成为重庆市突出的地质环境问题。2004年6月5日, 重庆万盛矿区东林煤矿就发生了造成21人死亡的矸石山恶性地质灾害。因此, 如何准确地对矸石山的稳定性进行判别, 就成为必须关注的问题。

对于煤矿区矸石山来说, 由于煤矸石颗粒不均, 矸石体自矸石山坡顶排弃后, 在自身重力作用下自然分级, 沿矸石山某一剖面取样, 可以看出细颗粒主

收稿日期: 2008-08-11

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(CSFC, 2006BBDF171); 重庆大学“985工程”基金资助项目(0903005104957)

作者简介: 李东升(1979-), 男, 重庆大学博士后, 主要从事地质灾害防治方向的研究, (E-mail) Lids@cqu.edu.cn.

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

要集中在矸石山上部,中间部位各种粒径参差不等,以中等粒径居多,矸石山底部则主要为大块矸石,细颗粒含量较少。如果矸石山堆放高度较低,这种分界趋势就不明显,随堆放高度的增加,这种分选趋势愈加明显。同时矸石散体由内到外、由低到高层层堆积,随着堆积时间、堆放高度的增加,堆积体外层受到风化影响,也逐渐发生物理化学变化,与此对应,矸石散体物理力学性质也发生不同改变。此外,矸石体堆积后的固结也直接影响到堆积体的物理力学性质。矸石散体的固结与饱和土或非饱和土的固结过程不同,常规饱和土或非饱和土的固结过程是土体中孔隙水压力的消散、土体孔隙体积逐渐减小及有效应力相应增长的过程。而矸石散体的固结是在自重和外部荷载作用下,发生挤压和颗粒的重新定位及细颗粒向粗颗粒孔隙的侵入等散体颗粒重新排列的过程。因此,不同堆积时间、不同层位的矸石体固结程度不同,相应力学性质也有着较大区别。因此,矸石山散体材料与其它岩土体材料相比具有较独特的物理力学特性,物理力学性质也较为复杂<sup>[1-3]</sup>,这也造成煤矿矸石山物理力学参数存在较大的变异性。

## 1 塑性极限分析条分法

塑性极限分析方法是把物体本构关系简化为理

想刚塑性应力-应变关系,从而利用刚塑性体处于极限状态的普遍原理-上限原理求解极限荷载的 1 种方法,塑性极限分析方法要求塑性区中的应力分布满足平衡方程、屈服条件和应力边界条件;速度分布需要满足几何方程、按流动法则确定的速度基本方程及必要的速度边界条件。

采用极限分析上限法进行稳定分析时,选择满足机动许可速度场的破坏机构十分重要。滑坡是 1 种复杂的地质灾害过程,不同破坏模式会有不同的滑动面形式,滑动面形式的内涵是不稳定体的形态特征和变形机理。当矸石山偏离临界状态,产生连续性剪切破坏时,滑动面位置与形状与由各个极限区域内合并成的塑性带的位置和形状是一致的,由于这个带的厚度是变化的,因此,滑动面位置可能有各种不同的变化,由能量最低原理,滑动面(潜在滑动面)应当接近于此带内的最平滑曲线,且该曲线无论按总的抗剪强度或滑坡体的最小变形条件,对开始位移来说应当阻力最小。滑动面如在移动方向上曲率保持固定,则该面满足滑体最小变形条件,在平面条件下,此面为圆弧面<sup>[4]</sup>。

根据相邻条块的几何关系与矢量闭合关系(如图 1 所示),可导滑动面速度  $V_i$ 、 $V_{i-1}$  与相邻条块速度间断面的相对速度  $V_{i,i-1}$  三矢量的速度递推公式<sup>[5-7]</sup>。

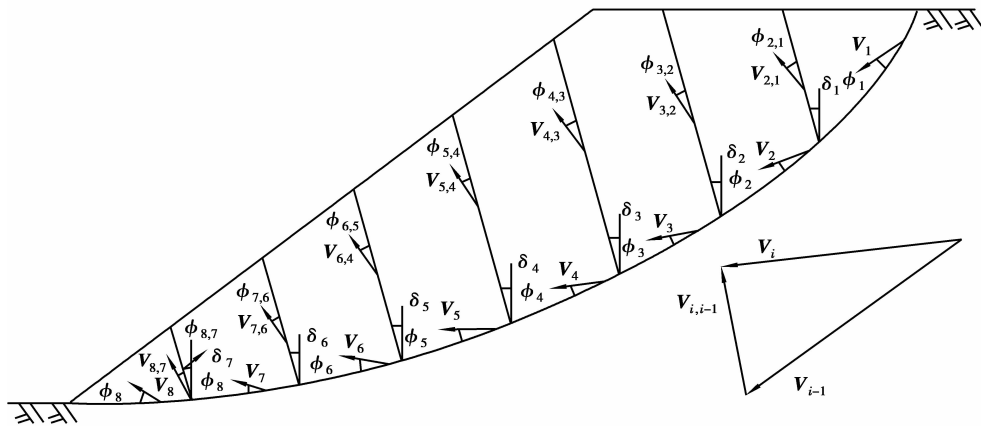


图 1 矸石山滑坡破坏机构及速度矢量图

$$V_i = V_{i-1} \frac{\cos(\alpha_{i-1} - \varphi_{i-1} - \varphi_{i,i-1} - \delta_{i-1})}{\cos(\varphi_i + \varphi_{i,i-1} + \delta_{i-1} - \alpha_i)}, \quad (1)$$

$$V_{i,i-1} = V_i \frac{\sin(\varphi_i - \varphi_{i-1} - \alpha_i + \alpha_{i-1})}{\cos(\alpha_{i-1} - \varphi_{i-1} - \varphi_{i,i-1} - \delta_{i-1})}, \quad (2)$$

式中: $V_{i,i-1}$ 为相邻条块速度间断面的相对速度; $\varphi_{i,i-1}$ 相邻条块速度间断面的内摩擦角; $\alpha_i$ 、 $\alpha_{i-1}$ 为第  $i$  个和第  $i-1$  个条块滑面位置的倾角; $\varphi_i$ 、 $\varphi_{i-1}$ 为第  $i$

个和第  $i-1$  个条块滑面位置的内摩擦角; $V_i$ 、 $V_{i-1}$ 为第  $i$  个和第  $i-1$  个条块滑面位置的速度。 $\delta_{i-1}$ 为相邻条块速度间断面与垂直方向的夹角。

对于条块分界面,可随机划分,相对与整体安全度最小的分界面即为验算土条划分模式,但为计算简便,这里采用垂直条划分。则  $V_i$ 、 $V_{i,i-1}$  可以简

化为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{V}_i &= \mathbf{V}_{i-1} \frac{\cos(\alpha_{i-1} - 2\varphi)}{\cos(2\varphi - \alpha_i)}, \\ \mathbf{V}_{i,i-1} &= \mathbf{V}_i \frac{\sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)}{\cos(\alpha_{i-1} - 2\varphi)}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

斜坡处于极限破坏状态时,根据作用于坡体上的外荷载和散体自重所做功率与塑性变形区的内部能量损耗率相等的条件( $D_{内} = W_{外}$ ),建立起虚功率方程,得到安全系数计算公式

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n l_i c_{di} \mathbf{V}_i \cos \varphi_{di} + \sum_{i=2}^n h_{i,i-1} c_{d(i,i-1)} \mathbf{V}_{i,i-1} \cos \varphi_{d(i,i-1)}}{\sum_{i=1}^n W_i \mathbf{V}_i \sin(\alpha_i - \varphi_{di})}, \quad (4)$$

其中: $\varphi_{di} = \tan^{-1}(\frac{\tan \varphi_{di}}{F})$ 。

安全系数计算公式中分子、分母均含速度矢量  $\mathbf{V}_i, \mathbf{V}_{i-1}$  和  $\mathbf{V}_{i,i-1}$ , 在实际计算中,可根据速度矢量  $\mathbf{V}_i, \mathbf{V}_{i-1}$  和  $\mathbf{V}_{i,i-1}$  之间的递推关系,将  $\mathbf{V}_i, \mathbf{V}_{i-1}$  和  $\mathbf{V}_{i,i-1}$  分别表示为第一个条块的关系式,进而可以消掉安全系数计算公式中的所有速度项。由于安全系数计算式两端均含有  $F$  项,因此计算时需要进行迭代。

式(6)中

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial c} &= \left[ \sum_{i=1}^n l_i \frac{1}{\cos(2\varphi - \alpha_i)} + \sum_{i=2}^n [h]_{i-1} \frac{\sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)}{\cos(2\varphi - \alpha_i) \cos(\alpha_{i-1} - 2\varphi)} \right] \cos \varphi, \\ \frac{\partial g}{\partial \varphi} &= \left[ \sum_{i=1}^n c_i \frac{2 \cos \varphi \sin(2\varphi - \alpha_i) - \sin \varphi \cos(2\varphi - \alpha_i)}{\cos^2(2\varphi - \alpha_i)} + \right. \\ &\quad \left. \sum_{i=2}^n c [h]_{i-1} \frac{\sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin \varphi \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \cos(\alpha_{i-1} - 2\varphi) + 2 \cos \varphi \sin(4\varphi - \alpha_i - \alpha_{i-1})}{\cos^2(2\varphi - \alpha_i) \cos^2(\alpha_{i-1} - 2\varphi)} - \right. \\ &\quad \left. \sum_{i=1}^n S_i \gamma \frac{\cos \varphi (\alpha_i - \varphi) \cos(2\varphi - \alpha_i) + 2 \sin(\alpha_i - \varphi) \sin(2\varphi - \alpha_i)}{\cos^2(2\varphi - \alpha_i)}, \right. \\ \frac{\partial g}{\partial \gamma} &= \left. \sum_{i=1}^n S_i \frac{\sin(\varphi - \alpha_i)}{\cos(2\varphi - \alpha_i)} \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

由标准正态化后验算点  $P^*$  的坐标计算公式

$$x_i^* = u_{xi} - \alpha_i \beta \sigma_{xi}. \quad (8)$$

其中

$$\alpha_i = \frac{\frac{\partial g}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \sigma_{x_j}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x^*} \sigma_{x_i} \right]^2}}$$

可分别求出

$$\left. \begin{aligned} x_1^* &= u_{x1} - \alpha_1 \beta \sigma_{x1} \\ x_2^* &= u_{x2} - \alpha_2 \beta \sigma_{x2} \\ x_3^* &= u_{x3} - \alpha_3 \beta \sigma_{x3} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

因为验算点在极限状态曲面上,故有  $g(x_1^*, x_2^*, x_3^*) = 0$ , 对其进行迭代计算,即可求出可靠度指标  $\beta$ 。

## 2 基于 JC 法的可靠度指标计算

如要采用 JC 进行可靠度指标的求解,首先要建立极限状态方程  $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 这里以塑性极限分析条分法为基础,通过  $\mathbf{V}_i, \mathbf{V}_{i,i-1}$  速度递推关系式消除式(4)的速度项<sup>[8-12]</sup>,可得到

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = c \cos \varphi \left[ \sum_{i=1}^n l_i \frac{1}{\cos(2\varphi - \alpha_i)} + \sum_{i=2}^n [h]_{i-1} \frac{\sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)}{\cos(2\varphi - \alpha_i) \cos(\alpha_{i-1} - 2\varphi)} \right] - \gamma \sum_{i=1}^n S_i \frac{\sin(\alpha_i - \varphi)}{\cos(2\varphi - \alpha_i)}. \quad (5)$$

如果  $Z > 0$ , 则边坡保持其稳定状态;如果  $Z < 0$ , 边坡处于不稳定滑动状态;如果  $Z = 0$ , 边坡处于极限状态。

则可靠度指标为

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (u_{xi} - x_i^*) \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x^*} \sigma_{x_i} \right]^2}}, \quad (6)$$

## 3 算例分析

南桐煤矿矸石山堆积区地处四川盆地与黔北高原接壤地带,矸石山占地面积约 0.21 km<sup>2</sup>,总方量约 880 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,坡角 38°~42°,目前已形成一、二、三级矸石山平台,其中一级矸石山边坡高 53 m,二级矸石山边坡高 70 m,三级矸石山边坡高 74 m。

南桐煤矿矸石山主要由石灰岩、白云质灰岩、泥质灰岩及泥岩风化物组成,由于自重的作用,矸石体下部稍密,上部松散。矸石山底面为一斜坡,自然坡角 20°~30°,地形起伏不平,呈锯齿状,为飞仙关组、长兴组和龙潭组地层,岩性以灰岩为主。矸石体底

部还不连续分布有一层 0~9.20 m 的硬塑状粘性土,出露石牙较多,基岩面力学性质良好,但由于矸石体堆填较厚,存在矸石山内部滑移的可能。



图1 南桐煤矿矸石山全貌

对于矸石山内部滑移可靠度计算所需危险破坏面的确定,采用基本状态变量均值确定的最小安全系数的破坏面作为可靠性分析的破坏面完全可以满足工程精度的要求<sup>[13-15]</sup>,如图2所示。

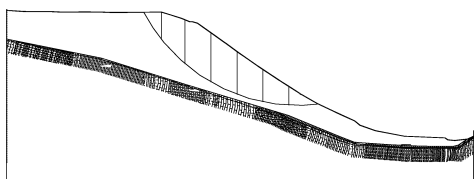


图2 二级矸石山滑面剖面图

计算参数由现场试验取得,试验装置如图3。

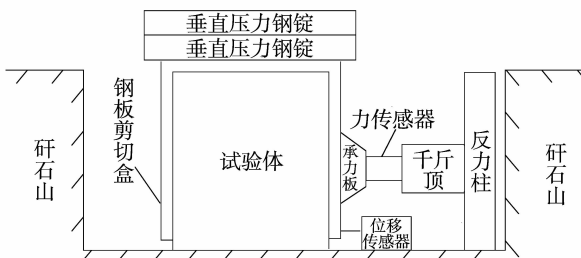


图3 试验装置图

从现场大剪试验结果可知,所获取的矸石山体强度参数存在着一定的离散性,这主要是由于:

1) 矸石体力学性质与矸石颗粒大小形状、分布特征及受颗粒堆积形式相关,且受到堆积年限、固结沉降的影响,造成矸石散体表现较大的参数变异性;

2) 由于煤矸石体颗粒不均,一般在 10~40 mm,甚至部分超过 50~100 mm,在进行现场大剪试验

时,试件在制作时较为困难,很难不对试件本身不产生扰动,因此在试验过程中存在一定人为因素的影响。

在本算例中矸石体强度参数  $C$ 、 $\varphi$  及重度  $\gamma$  作为随机变量,取其均值分别为 11.2 kPa、30.0°、17.2 kN/m<sup>3</sup>,变异系数分别为 0.20、0.15、0.05,这里假定其服从正态分布。

这里把矸石山内部滑移区垂直条划分分为 7 条条块,为了便于比较,分别采用不平衡推力法、塑性极限分析上限法及可靠度指标进行计算。采用不平衡推力法计算出此时矸石山的安全系数为  $f = 1.172$ 。塑性极限分析上限法安全系数及可靠度指标的计算均采用编程迭代计算,计算出  $f = 1.150$ 、 $\beta = 2.36$ 。

从计算结果可以看出,采用不平衡推力法与塑性极限分析上限法计算出的安全系数较为一致,在 1.150 左右,可以判别此时的矸石山较为稳定;对于可靠度指标的判别,由于矿山地质灾害中对可靠度指标没有明确的判别标准,参照《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999)给出的公路路基(路堤)目标可靠度指标分级标准,计算出的可靠度指标属边坡结构安全等级 3 级,边坡破坏的可能性较大。

## 4 结论

矸石山作为人工堆积体,与一般沉积形成的自然土体边坡存在较大的不同,矸石散体抗剪强度参数与其所在区域的颗粒大小形状、分布特征、颗粒堆积形式、固结及风化程度等密切相关,矸石体试验参数常表现出较大的变异性。采用塑性极限理论上限分析法进行安全系数的计算时,其计算结果与不平衡推力法计算结果较为一致,采用基于塑性极限分析的可靠度指标判别时,由于考虑了矸石山参数存在的离散性,最终安全评价结果与安全系数法判别时有所不同。因此,在进行矸石山稳定性计算时,如不考虑矸石散体参数的变异性,计算得出的安全系数则存在一定的风险,特别对于矸石山这种参数变异性较大材料,采用可靠度方法进行稳定性评价更能体现出工程的实际状况。

## 参考文献:

[1] 梁军,刘汉龙,高玉峰. 堆石蠕变机理分析与颗粒破碎特性研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3):479-484.

LIANG JUN, LIU HAN-LONG, GAO YU-FENG.

Creep mechanism and breakage behaviour of rockfill[J].

- Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 479-484.
- [2] 黄广龙, 周建, 龚晓南. 矿山排土场散体岩土的强度变形特性[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2000, 34(1): 54-59.
- HUANG GUANG-LONG, ZHOU JIAN, GONG XIAO-NAN. Stress-strain and shear strength properties of rock and soil materials of waste pile in open pit mines [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2000, 34(1): 54-59.
- [3] ELMER F J. Self-organized criticality with complex scaling exponents in the train model [J]. Physical Review E, 1997, 56(6): 6225-6228.
- [4] 董倩. 重庆地区矸石山堆积形态及稳定性分析研究[D]. 重庆: 重庆大学岩土系, 2007.
- [5] 陈祖煜. 土力学经典问题的极限分析上、下限解[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 1-11.
- CHEN ZU-YU. Limit analysis for the the classic problems of soil mechanics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 1-11.
- [6] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 1975.
- [7] BOLTON M D, LAU C K. Vertical bearing capacity factors for circular and strip footings on Mohr-Coulomb soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(4): 1024-1033.
- [8] SARMA S K. Stability analysis of embankments and slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1979, 105(12): 1511-1524.
- [9] DUNCAN J M, BYME P, WONG K S, et al. Strength stress-strain and bulk modulus parameters for FEA of stress and movements in soil masses, UCB/GT/80-01 [R]. California: California University, 1980.
- [10] 马崇武, 慕青松, 苗天德. 滑坡极限分析与塑性耗散功率[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2004, 40(4): 98-100.
- MA CHONG-WU, MU QING-SONG, MIAO TIAN-DE. Limit analysis and plastic dissipation power of landslides[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science Edition, 2004, 40(4): 98-100.
- [11] 王根龙, 门玉明, 陈志新. 土坡稳定性塑性极限分析条分法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(4): 28-30.
- WANG GEN-LONG, MEN YU-MING, CHEN ZHI-XIN. Plasticity limit analysis on soil slope stability by slice techniques [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(4): 28-30.
- [12] 王根龙, 伍法权, 门玉明. 基于土质边坡塑性极限分析条分法的可靠度计算方法研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(6): 835-840.
- WANG GEN-LONG, WU FA-QUAN, MEN YU-MING. Analysis of reliability index calculation on the basis of plasticity limit analysis & slice method of soil slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(6): 835-840.
- [13] 朱合华, 刘学增. 基于遗传算法的混合优化反分析及比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 197-202.
- ZHU HE-HUA, LIU XUE-ZENG. Comparison study of mixed optimal methods based on genetic algorithm in back analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 197-202.
- [14] 冯夏庭, 张治强, 杨成祥. 位移反分析的进化神经网络方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 529-533.
- FENG XIA-TING, ZHANG ZHI-QIANG, YANG CHENG-XIANG. Study on genetic-neural network method of displacement back analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 529-533.
- [15] SMOLA J, SCHOLKOPF B. A tutorial on support vector regression [R]. London: University of London, 1998.

(编辑 赵静)

(上接第 1414 页)

- [11] 张显忠. 三峡库区重庆段泥沙对硅藻生长影响试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [12] WEN C Y, YU Y H. Mechanics of fluidization [J]. Chem Eng Prog Symp Series, 1966, 62(12): 100-111.
- [13] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [14] 王福军. 计算流体力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [15] YANG L, AZZOPARDI B J. Phase split of liquid-liquid two-phase flow at a horizontal T-junction [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33(2): 207-216.
- [16] MATOUSEK V. Pressure drops and flow patterns in sand-mixture pipes [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(6-7): 693-702.
- [17] YANG G, EBADIAN M A. Turbulent forced convection in a helicoidal pipe with substantial pitch [J]. Heat Mass Transfer, 1996, 39(10): 2015-2022.

(编辑 陈移峰)