

# 破碎硐室粉尘质量浓度分布规律的实验研究

陈举师, 蒋仲安, 张义坤

(北京科技大学 教育部金属矿山高效开采与安全重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 为了解决破碎硐室粉尘质量浓度超标的问题, 获取通风除尘设计的合理参数, 根据相似原理, 结合气固两相流的运动方程, 导出了模拟破碎硐室粉尘运动的相似准则数, 以西石门铁矿 27<sup>#</sup> 破碎硐室为原型, 建立了破碎硐室相似模型, 并对粉尘质量浓度分布规律进行了实验研究. 研究表明: 粉尘质量浓度在破碎机下料口附近区域内达到最大值, 并以该区域为中心径向逐步降低. 入口风速越大, 矿石含水率越高, 粉尘质量浓度越低, 且当矿石含水率达到 3.02% 后, 粉尘质量浓度基本不再降低; 安装抽风除尘系统后, 粉尘质量浓度基本保持在 2 mg/m<sup>3</sup> 以内, 平均除尘率高达 90% 以上.

**关 键 词:** 破碎硐室; 粉尘; 相似准则; 气固两相流; 浓度分布

中图分类号: TD 714.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)07-1051-05

## Experimental Study on Dust Concentration Distribution in Crushing Chamber

CHEN Ju-shi, JIANG Zhong-an, ZHANG Yi-kun

(The Key Laboratory of Ministry of Education for High Efficiency Exploitation and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Corresponding author: JIANG Zhong-an E-mail: jza1963@263.net)

**Abstract:** In order to avoid the over-limit of dust concentration in crushing chamber and to obtain the rational parameters for the design of dust removal by ventilation, according to the similarity theory and the gas-solid two-phase flow motion equation, taking 27<sup>#</sup> crushing chamber in Xishimen Iron Mine as the background, the similarity index was deduced and a similarity model device was designed for the specific situation in the crushing chamber. Meanwhile, the dust concentration distribution was studied. The results indicated that dust concentration reached the maximum value near the mouth region in the crusher, while it gradually reduced along the radial direction in this region. The higher wind velocity and ore moisture are, the lower the dust concentration is. In addition, when ore moisture reached the value of 3.02%, the dust concentration no longer reduced. After the installation of exhaust dedusting system, the dust concentration was below 2 mg/m<sup>3</sup>, and the average removal rate reached 90%.

**Key words:** crushing chamber; dust; similarity criterion; gas-solid two-phase flow; concentration distribution

金属矿山井下破碎硐室在生产过程中, 大块矿石能被破碎机提供的外部能量冲击成小的碎块, 同时伴随着粉尘的产生, 严重威胁到井下工人的身体健康.

对此国内外的专家学者进行了大量的研

究<sup>[1-5]</sup>. 国外主要采用了通风排尘、密闭抽风除尘、喷雾洒水除尘、高压静电除尘及超声雾化抑尘等措施来实现除尘目标. 国内主要采用密闭抽风除尘结合湿式除尘的综合防尘手段. 虽然上述除尘手段及措施能够在一定程度上降低粉尘质量浓

收稿日期: 2013-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274024); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-14-039A1); 中国博士后科学基金资助项目(2014M560891).

作者简介: 陈举师(1987-), 男, 贵州毕节人, 北京科技大学讲师, 博士; 蒋仲安(1963-), 男, 浙江诸暨人, 北京科技大学教授, 博士生导师.

度,但其应用效果远远达不到国家卫生标准的要求,需要在理论上和实践上进行更加深入的研究<sup>[6-10]</sup>.

因此,降低破碎硐室的粉尘质量浓度,对于我国铁矿企业来说已是迫在眉睫的问题.研究破碎硐室粉尘质量浓度分布规律,确定出影响粉尘质量浓度分布的主要因素,对于探索适用于破碎硐室的粉尘控制新工艺、新技术、新设备、新方法具有十分重大的意义.

## 1 相似准则数的导出及简化

### 1.1 相似准则数的导出

根据气固两相流的运动方程,其中有量纲的物理量有  $\rho_g, \rho_p, U_g, U_p, \mu_g, d_p, g, l, t, p$  等 10 个,分别表示气体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),粉尘颗粒密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),气体速度( $\text{m}/\text{s}$ ),粉尘颗粒速度( $\text{m}/\text{s}$ ),气体动力黏度( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ),粉尘颗粒直径( $\text{m}$ ),重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ ),长度( $\text{m}$ ),时间( $\text{s}$ )及气压( $\text{Pa}$ ).

通过量纲分析,可导出包括斯托克斯准则数( $Stk = \frac{d_p^2 \rho_p |U_g - U_p|}{\mu_g}$ ),均时性准则数( $Ho = \frac{U_g t}{l}$ ),弗劳德准则数( $Fr = \frac{U_g}{\sqrt{gl}}$ ),雷诺准则数

( $Re = \frac{\rho_g U_g}{\mu_g}$ ),密度准则数( $\frac{\rho_p}{\rho_g}$ ),运动准则数( $\frac{U_p}{U_g}$ )

及欧拉准则数( $Eu = \frac{p}{\rho_g U_g^2}$ )等 7 个相似准则数.

其中,欧拉准则数  $Eu$  是非定型相似准则数,予以排除.

根据流动的单值条件,包括几何条件、物理条件( $\rho_g, \mu_g, g$ )、气流进出口速度分布等,可导出几何相似准则数( $\delta_1 = \frac{D}{l}$ ),颗粒雷诺准则数( $Re_p =$

$\frac{d_p \rho_g |U_g - U_p|}{\mu_g}$ )和界面的相对粗糙度( $\frac{\Delta}{D}$ ).其中,

$D, \Delta$  分别表示水力直径( $\text{m}$ )及界面粗糙度.

因此,本次实验中可导出的独立相似准则数

共有 9 个: $Stk, Ho, Fr, Re, \frac{\rho_p}{\rho_g}, \frac{U_p}{U_g}, \delta_1, Re_p$  和  $\frac{\Delta}{D}$ .

### 1.2 相似准则数的简化

在进行相似模型实验设计时,由于受到比例尺制约关系的限制,要想使实验模型与原型之间各个相似准则数均相等是比较困难的,但在保证足够准确度的情况下,运用近似模型法来进行相似模型实验设计,以保持局部相似或近似是完全可以实现的.根据破碎硐室粉尘运动的实际特点,

可将 9 个相似准则数简化为  $Stk, \delta_1, Re_p$  和  $\frac{\Delta}{D}$  等 4 个进行相似模型设计.

## 2 破碎硐室相似模型的建立

遵循相似原理,根据推导并简化后的相似准则数,以西石门铁矿 27#破碎硐室为原型,并对作者所在学院楼地下一层 D09 破碎实验室进行相应的改造,将其作为本次实验所需的相似模型.由于西石门铁矿 27#破碎硐室的长约 21 m,宽约 14 m,高约 8 m,而 D09 破碎实验室的长度约为 10 m,宽约 7 m,高约 4 m,则基本可以确定破碎硐室几何相似比  $C = l:l' = 2:1$ .

D09 破碎实验室共有两道门,分别位于实验室左右两侧.破碎机位于实验室左前方,其外形尺寸为  $1.24 \text{ m} \times 0.65 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$ ,破碎机下料口中心距前方壁面及左侧壁面分别为 1.7 m 及 2.4 m;在破碎机的右后方安装有袋式除尘器,用来除去破碎过程中产生的粉尘,除尘器外形尺寸为  $1.5 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ .破碎硐室相似实验模型装置如图 1 所示.

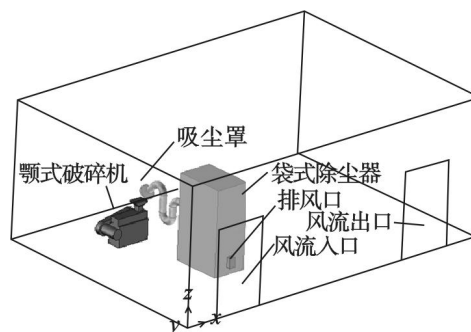


图 1 破碎硐室相似实验模型装置示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of similarity model in crushing chamber

## 3 粉尘质量浓度测定方法及测点布置

### 3.1 测定方法

本次破碎实验中所使用的矿石均取自西石门铁矿,品位为 29.97% 左右,矿石原始含水率为 1.97%.粉尘质量浓度的测定采用 LD-5C 型微电脑激光粉尘仪,通过使用以激光为光源的光散射式快速测尘仪进行测定,可连续监测空气中颗粒物的质量浓度.

### 3.2 测点布置

根据破碎硐室相似模型布置情况,在空间内布置粉尘质量浓度测点,每个测点均进行至少 3 次的测定,并取平均值进行比较分析,以消除

误差的影响,使测量值尽量接近真实。

根据模型空间的大小及风流流场的大致分布,以及对粉尘运移规律的基本认识,对硐室模型实验需测定的粉尘质量浓度布置测点如图2所示。图2中,以破碎机下料口尘源处为中心往四周发散性布置测点,共布置了3条测点线,其中各测点线负方向按照0.5 m的间距布置测点,正方向按照1 m的间距布置测点。

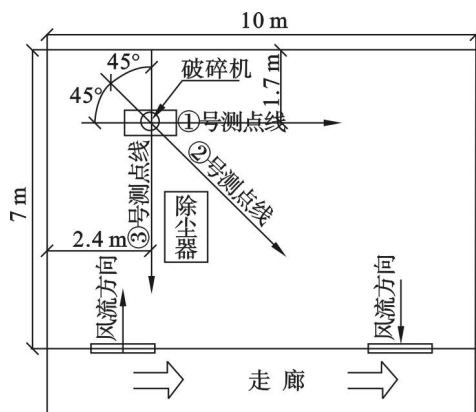


图2 粉尘质量浓度测点布置示意图

Fig. 2 Specification of dust concentration measurement points

## 4 实验结果及分析

### 4.1 粉尘质量浓度空间分布

为了研究硐室模型空间内粉尘质量浓度分布规律,根据粉尘质量浓度测点布置图,分别对①号、②号及③号测点线上距地面高度为1,2,3 m平面内粉尘质量浓度进行测定,得粉尘质量浓度空间分布如图3所示,图中坐标原点为破碎机下料口中心位置,坐标轴正方向为测点布置图中带箭头的方向。从图中可以看出:

1) 在①号测点线上,粉尘质量浓度沿程先逐步升高,达到最大值后缓慢降低。距地高度越高,粉尘质量浓度达到最大值的位置距破碎机越远。在距地高度为1,2及3 m时,粉尘质量浓度分别在距下料口中心约1,3及5 m处达到最大值60.5,44及7.5  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

2) 在②号测点线上,粉尘质量浓度沿程出现了两个峰值,峰值分别位于下料口中心及其后方约5 m处。在距地高度1 m平面内,两个峰值依次为41,31  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;而距地高度2及3 m平面内,第一个峰值并不明显,第二个峰值分别为25及2.5  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。由于硐室内涡流的存在,粉尘颗粒运动至该区域的概率较小,导致该区域粉尘质量浓度较低,在距下料口中心约1~4 m的范围内,粉

尘质量浓度出现了一个覆盖范围较大的谷值区域。谷值区域内粉尘质量浓度基本保持在7  $\text{mg}/\text{m}^3$ 以内。

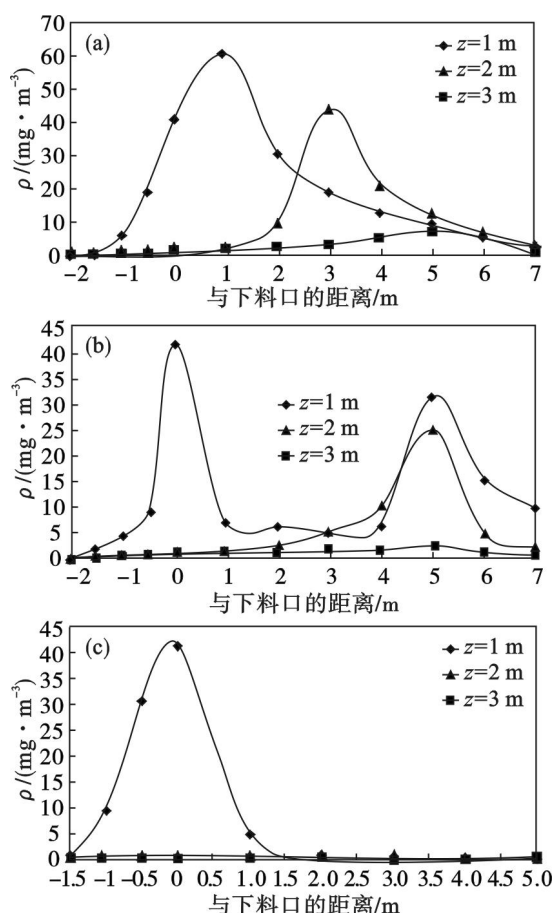


图3 各测点线不同高度粉尘质量浓度分布

Fig. 3 Dust concentration distribution at different height planes along the point line

(a)—①号测点线; (b)—②号测点线; (c)—③号测点线。

3) 在③号测点线上,粉尘质量浓度沿程先急剧上升,在下料口中心处达到最大值后迅速降低,并在距下料口中心1 m以外的区域内保持在一个较低的水平。这是由于该测点线布置方向与左侧门入口风流的方向相反,导致往测点线正方向扩散的粉尘颗粒受到风流的阻力而发生沉降,粉尘质量浓度较低。在距地高度1 m的平面内,粉尘质量浓度除了最大值达到41  $\text{mg}/\text{m}^3$ 外,距尘源1 m以外的区域粉尘质量浓度均保持在10  $\text{mg}/\text{m}^3$ 以内;在距地2及3 m高度平面内,粉尘质量浓度沿程均保持在1  $\text{mg}/\text{m}^3$ 以内。

### 4.2 不同参数条件下粉尘质量浓度分布

#### 4.2.1 不同风速条件下粉尘质量浓度分布

为了研究不同入口风速条件下硐室模型内粉尘质量浓度分布规律,取①号测点线在距地高度为1 m时的粉尘质量浓度作为代表,得入口风速分别为0.2,0.3,0.4及0.5 m/s条件下粉尘质量



浓度分布如图 4 所示. 从图 4 中可以看出:

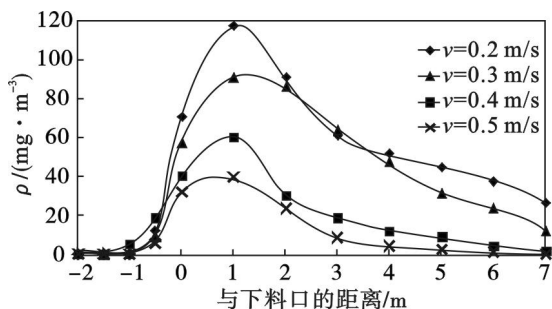


图 4 不同风速条件下粉尘质量浓度分布

Fig. 4 Dust concentration distribution under different wind velocity

1) 随着入口风速的变化,粉尘质量浓度分布规律基本保持一致,均表现为沿程逐步上升至一个最大值,后逐步缓慢降低的趋势,而在数值大小上却有所变化,具体表现为入口风速越高,粉尘质量浓度越低.当入口风速由 0.2 m/s 增至 0.5 m/s,粉尘质量浓度峰值由 117.5 mg/m<sup>3</sup> 降至 40 mg/m<sup>3</sup>.

2) 入口风速越大,进入硐室模型的新鲜风量就越大,风流在模型空间的循环效果越好,对粉尘颗粒的稀释及排出能力越强,粉尘质量浓度整体分布也就越低.

3) 入口风速越大,粉尘质量浓度出现最大值的位置距离下料口中心越近.这是由于风速越大,下料口尘源处粉尘扩散的速度越快,能在距下料口较近的区域内扩散充分并达到最大值.

#### 4.2.2 不同含水率条件下粉尘质量浓度分布

为研究不同含水率条件下粉尘质量浓度分布规律,通过晒干实验用铁矿石及添加定量的水等方式来改变铁矿石的含水率,并取样对铁矿石含水率进行测定,取①号测点线距地高度为 1 m 时的粉尘质量浓度作为代表,得含水率为 1.15%, 1.97%, 2.62%, 3.02% 与 3.96% 时粉尘质量浓度分布如图 5 所示. 从图 5 中可以看出:

1) 随着铁矿石含水率的增大,粉尘质量浓度整体分布呈现出下降的趋势.当含水率从 1.15% 逐渐增大至 3.02% 时,①号测点线上粉尘质量浓度最大值由 99.5 mg/m<sup>3</sup> 下降至 13 mg/m<sup>3</sup>.当含水率超过 3.02% 时,随着含水率的增大,粉尘质量浓度下降的趋势趋于平缓,基本保持不变.

2) 当铁矿石含水率较低时,破碎过程中小颗粒粉尘不能粘附在大颗粒上而从大颗粒上脱落、分离出来而形成粉尘污染.此外,含水率越低,矿质变脆且易碎、机械性能急剧下降.矿石脆性越大其破碎性越强、机械强度越低,从而产生的粉尘也越多,且更容易产生小颗粒粉尘.

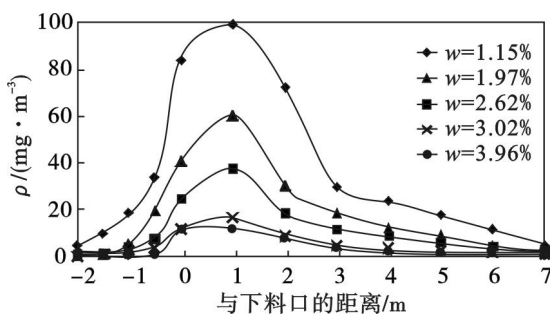


图 5 不同含水率条件下粉尘质量浓度分布

Fig. 5 Dust concentration distribution under different moisture contents

3) 在破碎硐室现场生产过程中,可通过增加矿石含水率来控制粉尘的产生,根据相似实验结果,建议在现场破碎过程中,将用于破碎的矿石含水率控制在 3.02% 左右,以达到防尘的目的.

#### 4.3 安装除尘器后粉尘质量浓度分布

通过在破碎机下料口处安装抽风除尘系统,对硐室入口风速为 0.4 m/s 条件下①号测点线距地高度 1 m 平面内粉尘质量浓度进行测定,并与除尘前相同条件下粉尘质量浓度分布进行对比,得安装除尘器前后粉尘质量浓度分布如图 6 所示. 从图 6 中可以看出:

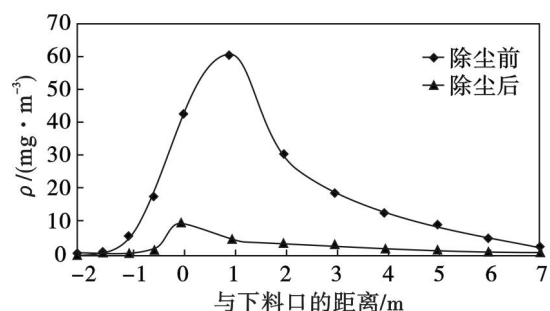


图 6 除尘前后粉尘质量浓度分布

Fig. 6 Dust concentration distribution before and after dust removal

安装抽风除尘系统后,①号测点线上粉尘质量浓度分布规律与除尘前基本保持一致,均为沿程先逐步上升至最大值,后逐步缓慢下降;除尘前后粉尘质量浓度分别在下料口中心后 1 m 处及下料口处达到最大值;整体来看,安装抽风除尘系统后,除了破碎机下料口处粉尘质量浓度达到 10 mg/m<sup>3</sup> 以外,其余测点粉尘质量浓度基本保持在 2 mg/m<sup>3</sup> 以内,平均除尘率高达 90% 以上.

#### 4.4 实验误差分析

在本次实验过程中,测量仪器、实验环境及人员操作等都会给实验结果造成一定的误差.其中,实验环境及人员操作是导致误差的主要原因.本次实验由于依靠走廊形成自然通风,风流流场极

不稳定,对实验数据的测定造成了较大的影响.此外,实验过程中,既要保证破碎机有充足的物料供给破碎,又要保证能及时准确地进行相关数据测定,因此,实验人员难免要在实验室内频繁走动,不可避免地也对实验数据造成影响.

## 5 结 论

1) 根据相似原理,结合气固两相流的运动方程,得出模拟破碎硐室粉尘运动所必须满足的4个相似准则数: $Stk$ ,  $\delta_1$ ,  $Re_p$  和  $\frac{\Delta}{D}$ ,建立了破碎硐室相似模型.

2) 粉尘质量浓度在破碎机下料口附近区域内达到最大值,并以该区域为中心径向逐步降低;由于硐室内涡流的存在,粉尘颗粒运动至该区域的概率较小,导致该区域粉尘质量浓度较低.

3) 入口风速越大,粉尘质量浓度越低,且粉尘质量浓度最大值的位置距下料口中心越近;随着矿石含水率的增大,粉尘质量浓度整体逐步降低,且当矿石含水率达到3.02%后,粉尘质量浓度基本不再降低.

4) 安装抽风除尘系统后,粉尘质量浓度分布规律与安装前基本保持一致,但在数值上却有较大程度的降低,基本保持在 $2\text{ mg/m}^3$ 以内,平均除尘率高达90%以上.

### 参考文献:

- [1] Chekan G J, Colinet J F, Grau R H. Impact of fan type for

reducing respirable dust at an underground limestone crushing facility [C]//North American Mine Ventilation Symposium. Park: Taylor and Francis, 2006: 203 – 210.

- [2] Silvester S A, Lowndes I S, Kingman S W, et al. Improved dust capture methods for crushing plant [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2007, 31(2): 311 – 331.
- [3] Naser J, Alam F, Khan M. Evaluation of a proposed dust ventilation/collection system in an underground mine crushing plant [C]//Proceedings of the 16th Australasian Fluid Mechanics Conference. Brisbane: University of Queensland, 2007: 1411 – 1414.
- [4] 孙岩. 平朔安家岭选煤厂破碎站粉尘逸散机理与控制技术研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012.  
(Sun Yan. Study the mechanism of dust migration and control technology at crusher of Pingshuo Anjialing coal preparation plant [D]. Fuxin: Liaoning Engineering Technology University, 2012.)
- [5] 陈菲. 破碎机下料槽粉尘数值模拟及治理研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012.  
(Chen Fei. Study on numerical simulation and treatment in guide chute of crusher [D]. Fuxin: Liaoning Engineering Technology University, 2012.)
- [6] Soo S L. Multiphase fluid dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [7] Courtney W G, Kost J, Colinet J. Dust deposition in coal mine airways [R]. Pittsburgh: US Bur of Mines, 1982.
- [8] Bhaskar R, Ramani R V. Behavior of dust clouds in mine airways [J]. *SME Transactions*, 1986, 280: 2051 – 2059.
- [9] Bhaskar R, Ramani R V, Jankowski R A. Experimental studies on dust dispersion in mine airways [J]. *Mining Engineering*, 1988, 40(3): 191 – 195.
- [10] Laigna K Y. Solution of diffusion problems in mine aerology [J]. *Soviet Mining Science*, 1979(1): 121 – 129.

(上接第1050页)

### 参考文献:

- [1] Arendt J S. Using quantitative risk assessment in the chemical process industry [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1990, 29(1): 133 – 149.
- [2] Vaidhyanathan R, Venkatasubramanian V. HAZOPExpert: an expert system for automating HAZOP analysis [J]. *Process Safety Progress*, 1996, 15(2): 80 – 88.
- [3] Ferdous R, Khan F, Sadiq R, et al. Handling and updating uncertain information in Bow-Tie analysis [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, 25(1): 8 – 19.
- [4] Cockshott J E. Probability Bow-Ties: a transparent risk management tool [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2005, 83(B4): 307 – 316.
- [5] Norrington L, Quigley J, Russell A. Modelling the reliability of search and rescue operations with Bayesian belief networks [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2008, 93(1):

940 – 949.

- [6] Prem K P. Risk measures constituting a risk metrics which enables improved decision making: value-at-risk [J]. *Journal of Loss Prevention in Process Industries*, 2010, 23: 211 – 219.
- [7] Hallowell M R, Gambatese J A. Construction safety risk mitigation [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2009, 135(12): 1316 – 1323.
- [8] Muller A, Suhner M C, Iung B. Formalisation of a new prognosis model for supporting proactive maintenance implementation on industrial system [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2008, 93(2): 234 – 253.
- [9] 宋文华, 吴衍翠, 谢飞, 等. 危险度评价法语蒙德法在催化裂化装置中的对比及原因研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2012, 8(1): 108 – 113.  
(Song Wen-hua, Wu Yan-cui, Xie Fei, et al. Contract and reason research on risk factor appraisal law and mond process in catalytic cracker [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2012, 8(1): 108 – 113.)