

矿井提升系统中活塞风速模型研究及应用

王从陆¹, 吴超², 王卫军¹, 伍爱友¹

(1. 湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南湘潭 411201; 2. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083)

[摘要] 为了对通风系统的稳定性进行全面的定量分析, 对影响矿井通风系统稳定性的各个因素进行分析, 其中矿井提升系统产生的活塞风速是主要因素之一。通过在井筒中取不同的过流断面, 应用非恒定流贝努利方程和连续性方程, 建立矿井提升系统中活塞风速的非恒定流计算公式。定量计算罐笼(箕斗)在井筒中快速运动时所产生的活塞风速的大小, 为进行矿井提升系统对矿井通风系统稳定性的定量分析提供基础数据, 从而进一步分析矿井通风系统的稳定性, 确保矿井通风系统满足生产的需要, 利于安全生产。

[关键词] 非恒定流; 贝努利方程; 提升系统; 活塞风速; 矿井通风稳定性

[中图分类号] TH212, V211.1 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)11-0182-05

矿井通风系统可靠、稳定的工作对于确保矿山安全生产有极为重要的作用, 而影响矿井通风系统稳定性的因素很多, 其中矿山提升设备对矿井通风系统的稳定性有较大的影响^[1~4]。要定量研究提升设备对矿井通风系统的稳定性的影响, 则要研究罐笼(箕斗)在井筒中运动诱发的空气动力学问题, 因此有必要对活塞风速加以研究^[5]。罐笼(箕斗)在井筒内快速运行时, 罐笼(箕斗)所排开的空气有部分被罐笼(箕斗)推向井筒之外, 有部分绕流到罐笼(箕斗)后方, 促使罐笼(箕斗)后方的空气尾随罐笼(箕斗)在井筒内沿罐笼(箕斗)前进方向向前流动, 即为罐笼(箕斗)的活塞风速。由于井筒的深度不大, 加上与很多运输大巷相连, 罐笼(箕斗)的活塞风速问题实际上是一个随时间变化的非恒定流问题^[6]。本文通过建立矿井提升系统中活塞风速的非恒定流计算公式, 定量计算罐笼(箕斗)在井筒中运动时所产生的活塞风速的大小, 为进行矿井通风系统稳定性分析提供基础数据, 从而定量分析矿井通风系统的稳定性, 确保矿井通风系统满足生产的需要, 利于安全生产。

1 模型假设

在计算罐笼(箕斗)在提升井中运动时产生的活

塞风速过程中, 为了简化问题, 使问题不致过于复杂, 抓住主要矛盾, 作如下的假设:

1) 气流不可压缩。由于活塞风速与当地音速之比远小于 0.3, 则根据等熵过程状态方程可得活塞风速由 $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 变为 0 时, 密度变化只不过增大 1.1%, 所以可认为, 当活塞风速小于 $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 气流为不可压缩流。事实上国内竖井提升的最大速度约为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 国外的竖井提升的最大速度约为 $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 因而其产生的活塞风速比较小, 故在建立模型时, 视井筒中的气流为不可压缩流。

2) 建立贝努利方程时, 用过流断面上的平均流速来表示平均动能。巷道通风模型试验及现场观测表明, 巷道中每一点的速度分布是对称的, 风流流动的状态是紊流。在巷道壁处有一个很薄的层流边界层, 这个区域风流的流动速度很低。层流边界层以外, 就是较高速度的紊流, 流动速度从壁面到巷道轴线方向逐渐增大, 如图 1 所示。

假定巷道中任一点的速度为 v_i , 巷道的平均速度 v 可以表示为

$$v = \frac{\int v_i ds}{s} \quad (1)$$

式中: v_i 表示巷道中任一点的速度(m/s); ds 巷道断

[收稿日期] 2006-03-17; 修回日期 2007-09-20

[基金项目] 湖南省教育厅资助科研项目(06C312)

[作者简介] 王从陆(1972-)男, 江西万年县人, 湖南科技大学能源与安全工程学院博士生, 主要从事矿山安全、环保研究

面中的一个面积微元(m^2); s 巷道断面面积(m^2)。

平均速度 v 与最大速度 v_{max} 之比随巷道的粗糙度的变化而变化。巷道的粗糙度越高,这个比值越大,反之亦然。因此,可以用巷道的平均速度来表示巷道风流的运动状态。

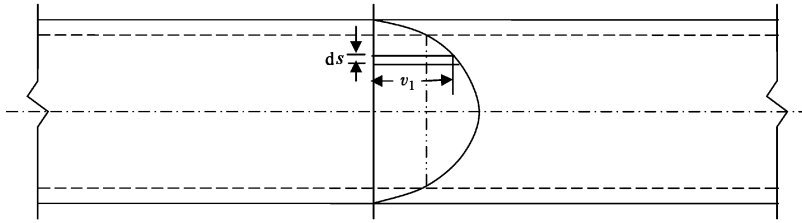


图1 隧道横断面上各点气流的流速分布

Fig.1 Airflow velocity distribution of different point at tunnel cross section

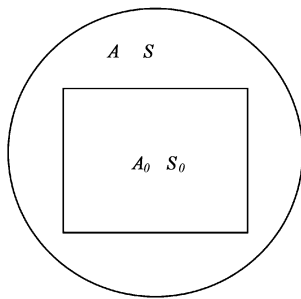


图2 单罐笼(箕斗)提升系统断面简化

Fig.2 Cross-section simplification of single cage(skip) hoisting system

罐笼(箕斗)与井筒间的环状空间的水力直径为

$$d_0 = 4A'/\chi = 4(A - A_0)/(S + S_0) \quad (2)$$

式中: d_0 为环状空间的水力直径(m^2); A 为井筒断面面积(m^2); A_0 为罐笼(箕斗)断面面积(m^2); S 为井筒周长(m); S_0 为罐笼(箕斗)周长(m)。

4)气流的运动是无旋的。因为无旋所消耗的能量比有旋所消耗的能量少,从工程上来说,这是偏安全的。

5)罐笼(箕斗)在井筒中作匀速运动,不考虑加、减速的过程,以简化模型。根据以上假设,在一维条件下,对于不可压缩气流(密度为常数),非定常无旋流动时,纳维-斯托克斯方程可简化为非恒定流贝努利方程^[7~9]:

$$\begin{aligned} u_1^2/2 + p_1/\rho + gz_1 = \\ u_2^2/2 + p_2/\rho + gz_2 + h'_l + ldu/dt \end{aligned} \quad (3)$$

式中, u_1, u_2 为各过流断面上的平均流速(m/s); $u^2/2, p/\rho, gz$ 各项分别为单位质量流体所具有的动

3)井筒和罐笼(箕斗)断面简化。对于不同提升系统,有不同简化方法。井筒的断面一般为圆形,罐笼(箕斗)的形状一般为矩形。以单罐笼(箕斗)提升系统为例,井筒和罐笼(箕斗)断面简化如图2。

能、压力能和位能(m^2/s^2); h'_l 为压头损失(m^2/s^2); ldu/dt 为惯性水头(m^2/s^2)。

2 数学模型建立

2.1 简化物理模型

罐笼(箕斗)在提升井筒中运动时的简化模型如图3所示。

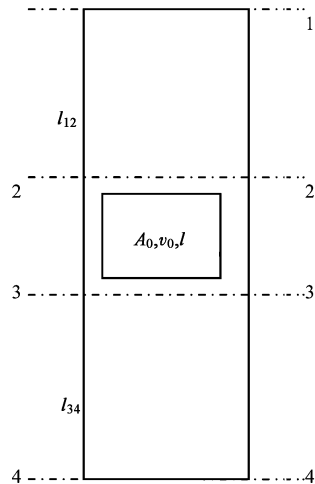


图3 罐笼(箕斗)在提升井中运动的简化模型

Fig.3 Simplification model of cage (or skip) move in hoisting shaft

2.2 数学模型推导

设罐笼(箕斗)的速度为 v_0 , 罐笼(箕斗)的横断面积为 A_0 , 井筒横断面积为 A , 活塞风速为 v , 罐笼(箕斗)与井筒壁之间的环状空间中气流的绝对速度(即相对于井筒壁的速度)为 w 。在 dt 时间内, 罐笼

(箕斗)在井筒中移动所排开的空气体积为 $A_0 v_0$;而在罐笼(箕斗)前方,则有部分空气被推移出井筒出口之外,其体积为 $Avdt$,另一部分空气通过罐笼(箕斗)与井筒壁之间的环状空间由罐笼(箕斗)前方向罐笼(箕斗)后方,其体积为 $(A - A_0)wdt$,根据气体流动的连续性方程可得

$$A_0 v_0 dt = Avdt + (A - A_0)wdt \quad (4)$$

于是有

$$w = (A_0 v_0 - Av)/(A - A_0) \quad (5)$$

环状空间中的气流相对于罐笼(箕斗)的速度为

$$v_s = w + v_0 = (v_0 - v)/[1 - (A_0/A)] = (v_0 - v)/(1 - \alpha) \quad (6)$$

式中, α 为罐笼(箕斗)对井筒的堵塞比, $\alpha = A_0/A$; v_s 为环状空间中的气流相对于罐笼(箕斗)的速度 (m/s)。

首先建立断面 3-3 与断面 2-2 之间气流相对于罐笼(箕斗)运动的非恒定流贝努利方程。根据式(3)可得

$$p_3/\rho - p_2/\rho + g(z_3 - z_2) = h_t + l_0 dv_s/dt \quad (7)$$

根据式(6)可得

$$dv_s/dt = -(1 - \alpha)^{-1} dv/dt \quad (8)$$

式中, v 为随时间而变化的罐笼(箕斗)活塞风速。

环状空间的压头损失由摩擦阻力和局部阻力两部分构成,可以表述如下:

$$h_t = (\xi_1 + \lambda_0 l_0/d_0 + \xi_2) \rho \frac{v_s^2}{2} = \frac{(\xi_1 + \lambda_0 l_0/d_0 + \xi_2)}{(1 - \alpha)^2} \frac{\rho(v_0 - v)^2}{2} = \frac{\rho K(v_0 - v)^2}{2} \quad (9)$$

式中, λ_0 为环状空间气流的沿程阻力系数; ξ_1 为气流由罐笼(箕斗)前方的井筒段进入环状空间的进口局部阻力系数; ξ_2 为气流由环状空间进入罐笼(箕斗)后方的出口局部阻力系数; l_0 为罐笼(箕斗)的高度,即环状空间的长度(m); d_0 为环状空间的水力直径(m); K 为活塞作用系数。

$$K = \frac{(\xi_1 + \lambda_0 l_0/d_0 + \xi_2)}{(1 - \alpha)^2} \quad (10)$$

根据式(7)和式(9)可得

$$p_3 - p_2 + \rho g(z_3 - z_2) = \frac{\rho K(v_0 - v)^2}{2} - \frac{\rho l_0}{(1 - \alpha)} \frac{dv}{dt} \quad (11)$$

同理可以建立断面 3-3 与断面 4-4 之间和断

面 1-1 与断面 2-2 之间的非恒定流贝努利方程,可得

$$p_3/\rho + v^2/2 + g(z_3 - z_1) = p_1/\rho + (\lambda_{l_{31}}/d + 1)v^2/2 + l_{31}dv/dt \quad (12)$$

$$p_1/\rho + g(z_1 - z_2) = p_2/\rho + (\xi + \lambda_{l_{12}}/d)v^2/2 + l_{12}dv/dt \quad (13)$$

式中: λ 为井筒沿程阻力系数; p_a 为井筒口的大气压强(Pa); l_{31} , l_{12} 分别为罐笼(箕斗)前方及罐笼(箕斗)后方的井筒段长度(m); d 为井筒的水力直径(m); ξ 为井筒的局部阻力系数。

把式(12)与式(13)相加,整理得:

$$p_3 - p_2 + \rho g(l - l_0) = \left[\xi + \lambda \frac{l - l_0}{d} + 1 \right] \cdot \frac{\rho v^2}{2} + \rho(l - l_0) \frac{dv}{dt} = \xi_1 \frac{\rho v^2}{2} + \rho(l - l_0) \frac{dv}{dt} \quad (14)$$

式中: l 为井筒长度(m); ξ_1 为除环状空间外的井筒段的阻力系数, $\xi_1 = \xi + \lambda(l - l_0)/d + 1$ 。

对式(14)进一步简化得

$$K(v_0 - v)^2 + 2g(l - 2l_0) - \xi_1 v^2 = 2[l + \alpha l_0/(1 - \alpha)]dv/dt \quad (15)$$

令 $A = [Kv_0^2 + 2g(l - 2l_0)]/[2l + 2\alpha l_0/(1 - \alpha)]$,

$$B = Kv_0/[l + \alpha l_0/(1 - \alpha)],$$

$$C = (K - \xi_1)/[2l + 2\alpha l_0/(1 - \alpha)],$$

则式(15)可整理成

$$dv/dt = A + Bv + Cv^2 \quad (16)$$

假定提升过程是匀速的,即假定初值条件为 $v|_{t=0} = v_1$,采用分离变量法,解微分方程可得

1)当 $K > \xi_1$ 时, $C > 0$,活塞风速为

$$v = \frac{-Cv_1(B - \sqrt{B^2 - 4AC}) - 2AC +}{C(2Cv_1 + B + \sqrt{B^2 - 4AC}) -} \rightarrow \left[\frac{Cv_1(B + \sqrt{B^2 - 4AC}) + 2AC}{C(2Cv_1 + B - \sqrt{B^2 - 4AC})} e^{t\sqrt{B^2 - 4AC}} \right] e^{-t\sqrt{B^2 - 4AC}} \quad (17)$$

2)当 $K < \xi_1$ 时,令 $C = (\xi_1 - K)/(2l + 2\alpha l_0/(1 - \alpha))$,有 $C > 0$,活塞风速为

$$v = \frac{Cv_1(B - \sqrt{B^2 + 4AC}) + 2AC -}{C(2Cv_1 - B - \sqrt{B^2 + 4AC}) -} \left[\frac{Cv_1(B + \sqrt{B^2 + 4AC}) + 2AC}{C(2Cv_1 - B + \sqrt{B^2 + 4AC})} e^{t\sqrt{B^2 + 4AC}} \right] e^{-t\sqrt{B^2 + 4AC}} \quad (18)$$

3 模型应用及结果分析

以某一金属矿矿井提升系统中的副井为例,在一定的参数取值下,根据公式(17)和(18)可以计算出罐笼(箕斗)运动产生的最大活塞风速。计算参数如表 1。

根据表 1 中的参数进行计算,当箕斗以 10 m/s 的速度在井筒中运行的时候,其产生的最大活塞风速为 3.1 m/s。

通过修改表 1 中的有关参数,可以得到不同状态下最大活塞风速的值。分析研究表明,最大活塞

风速与堵塞比和箕斗运行的速度有很强的正相关性。

基于矿井通风系统的基础知识,可以分析得出,箕斗运动作用诱导的风量为 $65.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。这个风量对整个矿井通风系统而言,不是一个可以忽略的。与此同时,矿井通风系统是一个受多因素影响的开放系统。如果矿井活塞风效应和自然风压的效应联合作用,共同给矿井通风系统施加一个反向的作用,势必会导致矿井总风量或风机工况点的变化,严重影响矿井通风系统的稳定性。

表 1 单箕斗配平衡锤的主井提升方式下的活塞风速计算参数

Table 1 Piston wind calculation parameter of single skip equip counterweight main shaft hoisting

| 名称 | 值 | 名称 | 值 |
|--------------------------|----------|-------------------------|-----------|
| 井筒长度 l/m | 292 | 箕斗面积 A_0/m^2 | 12 |
| 井筒直径 d/m | 5.2 | 箕斗周长 S_0/m | 14 |
| 井筒面积 A/m^2 | 21.237 | 箕斗高度 l_0/m | 2.2 |
| 井筒周长 S/m | 16.328 | 环状空间出口局部阻力系数 ξ_1 | 0.769 8 |
| 井筒阻力系数 λ | 0.000 28 | 环状空间进口局部阻力系数 ξ_2 | 0.188 8 |
| 井筒的局部阻力系数 ξ | 0.1 | 活塞作用系数 K | 5.079 3 |
| 堵塞比 α | 0.565 | 除环状空间外的井筒段的阻力系数 ξ_1 | 1.126 |
| 环状空间的水力直径 d_0/m | 1.218 | 系数 A | 3.445 258 |
| 系数 B | 0.344 52 | 系数 C | 0.006 704 |

4 结论和展望

运用流体力学的基本方程,推导得出了在非恒定流状态下,罐笼(箕斗)在井筒中快速运动时所产生的活塞风速的理论计算公式。根据本文的分析,可以得出如下的研究结论:

1)罐笼(箕斗)在井筒中快速运动是一个复杂的空气动力学过程。

2)影响最大活塞风速的因素很多,包括罐笼(箕斗)尺寸、井筒尺寸、罐笼(箕斗)运行速度、井筒深度以及各种阻力系数等。

3)当罐笼(箕斗)以 10 m/s 的速度在井筒中运行的时,产生的最大活塞风速为 3.1 m/s。因此提升系统中的活塞风对矿井通风系统的影响不可忽视。

4)未来研究的重点应放在分析活塞风对矿井通风系统稳定的影响,比如矿井活塞风和自然风压的联合作用对整个矿井通风系统稳定性的影响,从系统、多因素的角度考察矿井通风系统的稳定性问题。研究工作对于提高矿井通风系统的稳定性有积极的意义,同时有利于提高矿井通风安全的管理水平,减

少井下事故发生和事态扩大。

参考文献

- [1] 王英敏. 矿井通风与防尘[M]. 北京:冶金工业出版社,1993
- [2] 程 磊,杨运良,熊亚选. 矿井通风系统评价指标体系的研究[J]. 中国安全科学学报,2005,15(3):91~94
- [3] 王从陆,吴 超,李树清. 复杂矿井通风系统分支阻力可调性数值研究[J]. 中国安全科学学报,2004,14(5):21~23
- [4] 蔡 峰,刘泽功. 复杂矿井通风系统角联风路自动识别方法的研究[J]. 中国安全科学学报,2005,15(7):43~47
- [5] 顾红生,赵谊山. 磁悬浮列车在隧道内影响活塞风速的因素[J]. 同济大学学报,2003,31(3):324~328
- [6] 吴望一. 流体力学[M]. 北京:北京大学出版社,1998
- [7] Vogel M, Rast H P. Transit-safety in construction as a challenge: health and safety aspects in very deep tunnel construction[J]. Tunneling and Underground Space Technology,2000,15(4):481~484
- [8] Ian Leong Y K, Chi Kwan Wong, Joanne Yin King T S E. Tunnel ventilation system-SIL determination and software safety analysis[A]. In: Wang Yajun, Huang Ping, Li Shengcai, eds. Progress in Safety Science and Technology[M]. Beijing/New York: Science Press,2004. 1098~1108
- [9] 沈 翔,吴喜平,董志周. 地铁活塞风特性的测试研究[J]. 暖通空调,2005,35(3):103~106

Research and Applications of Piston Wind Velocity Model for Mine Hoisting System

Wang Conglu¹, Wu Chao², Wang Weijun¹, Wu Aiyu¹

(1. School of Energy and Safety, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

[Abstract] It is necessary to analyze each factor that affects the stability of mine ventilation system in order to comprehensively and quantitatively analysis the stability of mine ventilation system. Piston wind velocity engendered by hoisting system is one of the primary factors. Using Bernoulli equation and continuity equation of non-steady flow, the paper presents the calculation formula of piston wind velocity in mine hoisting systems by assuming different passing section. According to the formula, piston wind velocity can be quantitatively calculate, which will be used as basic data for the stability analysis of mine ventilation system. In this way, the stability of mine ventilation system can be further analyzed, which will benefit the safety of production.

[Key words] non-invariableness flow; Bernoulli equation; hoisting system; piston wind velocity; mine ventilation stability

(上接第 174 页)

high voltage electric cable of industrial enterprises has been studied in this paper. Selecting method for temperature sensors, composition of temperature monitoring system and its operating have been illustrated as well. The information processing software and trouble shooting expert system software, basic information network of power facility, and on-site bus line technology used in power system are introduced. The online trouble shooting and diagnosis for high voltage electric cable and cable joints with non stop of power supply have been achieved.

[Key words] 10 kV high voltage electric cable; terminal; temperature sensor; monitoring system