

# 裂隙岩体渗透性影响因素的研究

孙玉杰<sup>1</sup>, 徐栋栋<sup>2</sup>, 樊栋<sup>3</sup>, 武涛<sup>4</sup>

(1. 胜利油田胜利勘察设计研究院有限责任公司, 山东 东营 257026; 2. 长江科学院/水利部岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430010; 3. 湖北省电力勘测设计院, 湖北 武汉 430010; 4. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**采用 UDEC 离散单元法中关于裂隙岩体开挖模拟及水力全耦合分析模型, 分析裂隙岩体洞室开挖后, 因围岩应力与水力耦合作用导致裂隙隙宽变化及渗流变化的过程。为了更直观地了解耦合作用对裂隙岩体渗透特性的影响, 以隧洞开挖为例, 用开挖后隧洞内总涌水量来表征岩体的渗透特性。利用数值试验的方法, 研究了块体边界大小、初始应力比、裂隙隙宽和裂隙夹角对开挖后隧洞内涌水量变化的影响, 进而可以看出它们对裂隙岩体渗透性的影响。并得出如下结论: 随着块体尺寸和初始应力比的增大, 隧洞内总涌水量减少; 随初始隙宽的增大涌水量增加并当达到某一固定值时保持不变; 隧洞涌水量在  $\theta_2/\theta_1 = 3.5$ , 其中  $\theta_1 = 30^\circ$ , 即两组节理的夹角为  $75^\circ$  处达到最大。

**关键词:** 应力; 地下洞室; 渗流; 裂隙岩体

中图分类号: TV554; U451 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2011)03-0076-05

**Study on the Factors Affecting the Permeability of Fractured Rocks/SUN Yu-jie<sup>1</sup>, XU Dong-dong<sup>2</sup>, FAN Dong<sup>3</sup>, WU Tao<sup>4</sup>** (1. Shengli Engineering Consulting Co. Ltd of the Shengli Oil Field, Dongying Shandong 257026, China; 2. Changjiang Scientific Research Institute/Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources Division of Geotechnical Engineering, Wuhan Hubei 430010, China; 3. Hubei Electric Power Survey & Design Institute, Wuhan Hubei 430010, China; 4. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** The excavation simulation and fully-coupled model of the fractured rock in the discrete element method are used to analyze the changes in fracture aperture and in the seepage flow process after excavation. The flowing discharge after tunnel excavation is used to represent the permeability of the fractured rock mass in the article, in order to investigate the coupling effect on the permeability characteristics of the fractured rock mass. The effect on flowing discharge in the excavated cavity or tunnel by block boundary size, initial in-situ stress ratio, the fracture aperture and the included angle were studied based on the numerical test. It is found that with the increase of block size and the in-situ stress ratio, the flowing discharge in the excavated tunnel becomes decreasing; and with the increase of initial hydraulic aperture, the flowing discharge increases coincidentally and keeps invariant with a fixed amount. The flowing discharge reaches the maximum value when the included angle between the two joint sets is  $75^\circ$ .

**Key words:** in-situ stress; underground cavity; seepage; fractured rock mass

## 1 概述

近年来,随着国家基本建设规模的不断扩大,越来越多的岩土体问题凸显出来,而裂隙岩体的渗流问题就是其中比较突出的一个。诸如大型水利水电工程的地下水问题,核废料深部储存,垃圾填埋污水下渗,输油管道渗漏造成的地下水污染问题等都与息息相关。影响裂隙岩体的渗透性的因素有很多,对于裂隙岩体渗流的敏感性分析,国内外许多学者都做了相应的研究。许建聪,王余富<sup>[1]</sup>在分析裂隙介质水力特性的基础上,采用层次分析法,结合工程实践经验,分析了影响水下隧道裂隙围岩渗流控制的主要因素,证实每延米洞长洞室围岩断层等破碎带的平均宽度权重最大,是影响裂隙围岩渗透控

制的最主要因素。此研究成果为海底隧道及地下水封储油岩洞库等水下隧道的渗流控制及灾害防治提供了科学的依据。王亚军等<sup>[2]</sup>在三维各向异性非均质稳定随机渗流场的随机有限元分析的基础上研究了长江荆南干堤渗流场中随机参数和随机边界条件对随机渗流场模拟结果的影响和随机参数与随机边界条件的随机敏感性分析。分别研究了上下游水头随机边界条件的敏感性、垂直防渗边界条件的敏感性、垂直防渗边界条件的敏感性、垂直防渗边界条件的敏感性、垂直防渗边界条件的敏感性,并通过统计经验结合实测工程数据对照证明这些分析都是可靠的。戴强等<sup>[3]</sup>在前期研究基础上引入应力敏感模数到不同外边界条件下的均质和裂缝性气藏渗流模型,应用摄动技术和拉普拉斯变换得到压力解析

收稿日期: 2010-10-15

作者简介: 孙玉杰(1982-),男(汉族),山东费县人,胜利油田胜利勘察设计研究院有限责任公司,岩土工程专业,硕士,山东省东营市济南路49号, sdustysj@163.com。

解,并据此绘制出相应的压降试井曲线,分析了在不同渗流阶段应力敏感对井底压力动态的影响。该研究对于存在应力敏感的气井测试具有指导意义。张延忠等<sup>[4]</sup>进行了渗流边界条件对渗流场及渗流特征参数敏感性分析,主要针对沙湾水电站闸坝基础渗流计算模型的入渗边界  $\eta_1$ 、出渗边界  $\eta_2$  及相对不透水层边界  $\eta_D$  等渗流区边界处于不同位置时,分析其对计算结果的影响,及对渗流参数的敏感程度。结果表明,上下游渗流边界及相对不透水层对渗流场、渗流量及渗透坡降均存在敏感区间。贾彩虹等<sup>[5]</sup>以新安江 3 号坝段为例,采用三维渗流有限元的数值试验方法,通过改变帷幕渗透系数,分析帷幕渗透系数  $K$  对灌浆廊道渗流量  $Q$  的影响,建立了相关关系式  $Q-K$ ;研究了帷幕工作形态变化对坝基渗流场变化的敏感性。国外学者 Indraratna 等也做了许多研究<sup>[7-10]</sup>。

裂隙岩体处于应力场和渗流场互相耦合的环境中,为了更为直观地了解耦合作用对裂隙岩体渗透特性的影响,本文以隧洞开挖为例,用开挖后隧洞内总涌水量来表征岩体的渗透特性。利用数值试验的方法,研究了块体边界大小,初始应力比,裂隙隙宽和裂隙夹角对开挖后隧洞内涌水量变化的影响,进而可以看出它们对裂隙岩体渗透性的影响。

## 2 基于 UDEC 的渗流分析算法<sup>[11]</sup>

### 2.1 基本模型

利用 UDEC (Universal Distinct Element Code, ITASCA, 1996) 水力全耦合模型来模拟裂隙中水的流动。UDEC 是 ITASCA 公司开发的针对非连续介质的平面离散元程序,在数学求解方式上采用了与 FLAC 一致的有限差分法。对于水力全耦合的渗流分析,当水流主要是由裂隙网络控制时 UDEC 程序是非常合适的。因此本文假设岩石基质是不透水的,水流主要是通过水力连通的裂隙网络涌入隧洞内。UDEC 中被裂隙所包围的岩块可以被模拟为刚体或者可变形体,通过域分析流体在裂隙中的流动。图 1 中将域顺序标号为①~⑤,假定域内充满各向等压流体,域和域之间通过接触与临域发生作用。接触顺序标号为 A~F。域①、③、④表示节理,域②表示两个节理的交点,域⑤为空洞。

不计重力时,假设流体压力在流动域中的分布是均匀的。考虑重力时,流体压力则按线性分布的静水压力计算。流体的流动是由相邻流体域的压力差决定的,其中流动域中流体压力的大小由流动域

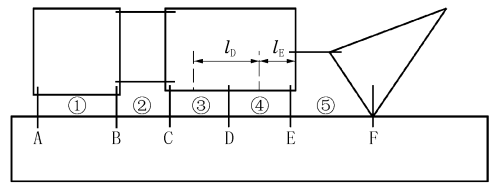


图 1 通过域模拟流体在节理裂隙中的流动模型

中中心压力的大小决定。

### 2.2 渗透流速计算

按块体接触条件的不同,裂隙岩体中流体的速率有两种计算方法。

#### 2.2.1 点接触

点接触分为角-边接触和角-角接触,设流动域①的流体压力为  $p_1$ ,流动域②的流体压力为  $p_2$ ,则由流动域①到流动域②流体的流速为:

$$v = -k_c \Delta p \quad (1)$$

式中: $k_c$ ——接触处的渗透系数; $\Delta p$ ——压力差。

$$\Delta p = p_2 - p_1 + \rho_w g (y_2 - y_1) \quad (2)$$

式中: $\rho_w$ ——流体密度; $g$ ——重力加速度; $y_1$ 、 $y_2$ ——分别为两个流动域的中心坐标。

#### 2.2.2 边-边接触

首先定义接触长度,图 1 中  $l_D$  和  $l_E$  分别为接触 D 和 E 的接触长度,然后利用平行板裂隙中的立方定律计算流动速度,即

$$q = -k_j a^3 \Delta p / l \quad (3)$$

式中: $k_j$ ——裂隙的渗透系数,理论值为  $1/(12\mu)$ ; $\mu$ ——流体的动力粘滞系数; $l$ ——两流体域之间的接触长度; $a$ ——接触的水力开度。

水力开度  $a$  由裂隙在无法向应力时的开度  $a_0$  及在某法向应力条件下法向开度增量  $u_n$  组成,即: $a = a_0 + u_n$ 。假定法向开度增量  $u_n$  张开为正,压缩为负,水力开度的最小值为  $a_{res}$ ,最大值为  $a_{max}$ 。裂隙宽度随节理法向应力的变化如图 2 所示。

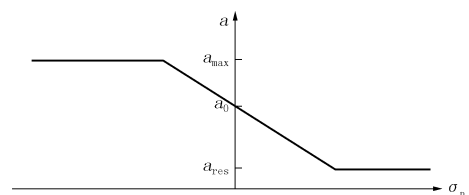


图 2 水力开度  $a$  与法向应力  $\sigma_n$  之间的关系

### 2.3 裂隙水压力计算

计算过程中,每计算一个时步,重新生成系统的几何形状,而后计算出所有接触的裂隙宽度以及所有域的体积(对二维条件,取单位厚度),之后利用上面的公式计算出各接触处的流量。最后,迭加各

接触点流入裂隙域的流体流量,并考虑由于周围块体的位移增量而产生的域体积的变化,按下式计算出域内的裂隙水压力:

$$p = p_0 + k_w Q \Delta t / v - k_w \Delta v / v_m \quad (4)$$

式中: $p_0$ ——前一时步的孔隙压力; $Q$ ——通过孔隙周围的所有接触点流入该孔隙的流量之和; $k_w$ ——流体的体积模量; $\Delta v = v - v_0$ ;  $v_m = (v + v_0) / 2$ ;  $v$ 、 $v_0$ ——分别为现在时步和前一时步孔隙的体积; $\Delta t$ ——计算时步。

计算出域内裂隙水压力后,可以计算流体作用在其周围岩块的力。将该力与诸如接触点力和外力荷载等力迭加,施加在块体的节点上。这样得到不透水岩块的总应力以及节理的有效法向应力。

### 3 数值模型

本文中所用模型示意图如图 3 所示。该模型考虑在地面下 100 m 处开挖半径为 10 m 的隧洞,假定地下水位在地面以下 10 m 处。模型中考虑了两组不同组合倾角的连续节理。倾角以水平向右为起点,逆时针方向为正。节理和块体分别采用节理面接触模型和线弹性、各向同性模型。其中  $c = 2b$ 。节理参数见表 1、2。

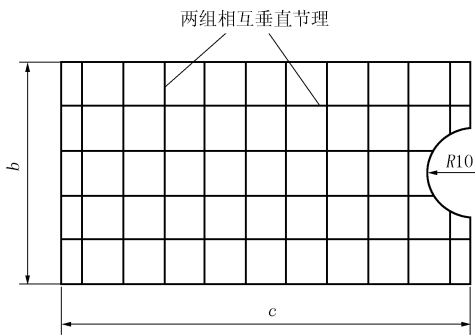


图 3 含有两组节理的节理模型

表 1 模型中生成节理参数

变 量	节理倾角/(°)	节理间距/m	间隙长度/m	节理迹长/m
第 1 组节理	90	10	0	200
第 2 组节理	0	10	0	200

表 2 节理参数

节理变量	法向刚度 /(GPa· m <sup>-1</sup> )	剪切刚度 /(GPa· m <sup>-1</sup> )	初始水 力隙宽 /m	残余水 力隙宽 /m	节理渗透系 数/(MPa <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> )
数值大小	10	10	10 <sup>-3</sup>	5 × 10 <sup>-4</sup>	5 × 10 <sup>8</sup>

岩石的密度是 2700 kg/m<sup>3</sup>, 体积模量为 20 GPa, 剪切模量为 15 GPa。地下水密度为 1000 kg/m<sup>3</sup>, 体积模量为 0.2 GPa。

### 4 模型边界条件

模型的边界条件如图 4 所示。流体的压力  $P_{yy} = \gamma_w y$  (其中  $\gamma_w$  是水的重度,  $y$  是距离开挖隧洞中心的垂直距离)。

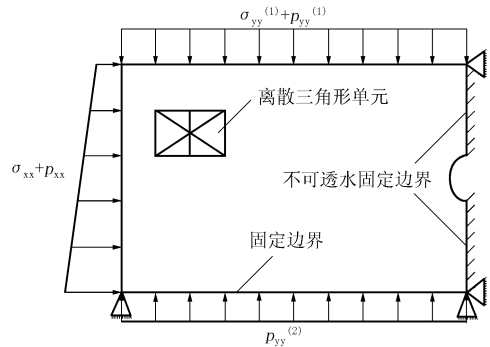


图 4 UDEC 模拟中所用边界条件

$$\sigma_{yy} = \rho g y$$

$$\sigma_{xx} = \alpha_1 \sigma_{yy}$$

$$\sigma_{zz} = \alpha_2 \sigma_{yy}$$

式中: $\sigma_{xx}$ 、 $\sigma_{yy}$ 、 $\sigma_{zz}$ ——分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的初始应力; $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ ——初始应力比例因子,并假定在分析中为常量。

下边界设位移边界,即将它设为固定边界。由于在建模时考虑到对称性,因此将右边界设为不透水的固定边界。

### 5 数值模拟结果分析

这里采用 UDEC 中关于裂隙岩体开挖模拟及水力全耦合分析模型来模拟裂隙岩体洞室开挖后因围岩应力与水力耦合作用导致裂隙隙宽变化及渗流变化的过程。传统的平行板试验中将层流节理隙宽假定为恒定常量。当前的分析采用离散元法能够模拟出开挖引起围岩的变形对隙宽的影响,反过来,隙宽的变化又影响渗流和应力的重分布。在下一步的迭代过程中将当前的应力用于耦合的渗流-变形分析。

本文中采用 UDEC 中的稳态分析 (set flow steady)。水力耦合分析分两个步骤进行:第一步是施加上述边界条件生成初始应力场和渗流场;第二步假设隧洞开挖瞬时完成,在水力耦合作用下达到新的平衡状态。

开挖后水流方向如图 5 所示。

由图 5 可以看出,开挖后水流流向隧洞,隧洞总涌水量等于与隧洞相交的 4 条节理内流量之和。

本文就下列因素对开挖后隧洞的涌水量进行了分析:(1)块体尺寸;(2)初始应力比;(3)初始隙宽;(4)两组节理的倾角比。

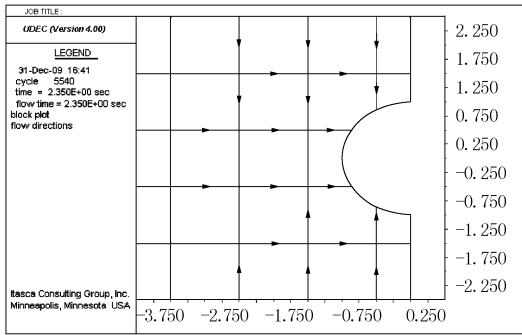


图 5 开挖后水流方向

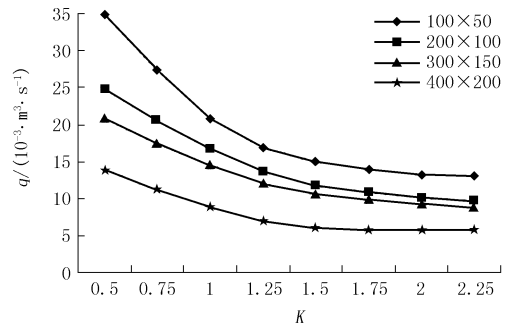


图 7 初始应力比对渗流量的影响

### 5.1 块体边界尺寸的影响

隧洞内总涌水量与块体尺寸的关系如图 6。该图表明随着块体尺寸增大,隧洞内的总涌水量在减小,并在块体尺寸达到 250 m × 125 m 以后急剧地减小。一方面来说对于与隧洞相交的节理,随着块体尺寸的增加,会有更多的机会与没有切割隧洞的节理相交,生成更大面积的连通裂隙网络,这样渗透到与裂隙相交的节理中的流量就会增大,以此推断隧洞的总涌水量应该增加;另一方面,随着块体尺寸的增加,从边界到达隧洞的水头损失也会加大。因此综合考虑两种因素,跟数值试验结果比对,发现后者起到决定性的作用。这个结果与 Indraratna 等人所做结论相一致<sup>[7]</sup>。

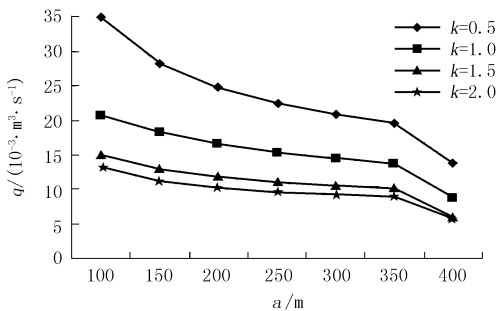


图 6 不同初始应力比下块体边界大小对渗流量的影响

### 5.2 初始应力比

隧洞内总涌水量与初始应力比  $K = \sigma_h / \sigma_v$  之间的关系如图 7 所示。

由模拟结果可以看出,随着应力比的增大隧洞内总的涌水量在减小。随着初始应力比从 0.5 到 2.25 的变化,隧洞内总的涌水量降低值达到 60% 左右。这个结果与 Indraratna 和 Wang (1996)<sup>[8]</sup> 所做的降低 70% 是很接近的。同样与孙玉杰等<sup>[6]</sup> 做出的 40% ~ 80% 的结果也是一致的。Liao 和 Hencher (1997)<sup>[9]</sup> 利用 UDEC 对初始水平应力比、边界条件以及块体体积对裂隙岩体的渗透特征进行过模拟,

得出的结论是总的渗透系数随着初始水平应力与垂直应力的比值增加在减小。本文分析结果与其一致,不同之处在于本文采用的模型以及利用涌水量代替了渗透系数。

### 5.3 初始隙宽的影响

由图 8 可知,当初始隙宽达到  $20 \times 10^{-4}$  m 时,最大和最小水力隙宽相等,已经验证其他块体尺寸与其变化趋势相同,此处不一一列出。由此规律可知,当初始隙宽  $> 20 \times 10^{-4}$  m 时,水力隙宽保持不变。

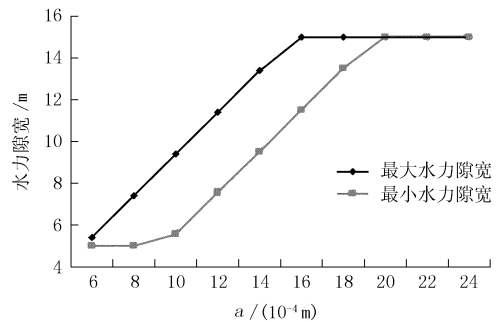


图 8 块体边界为 300 m × 150 m 的最大和最小水力隙宽

初始隙宽对于隧洞内总涌水量的影响如图 9 所示。由图 9 可知,随着初始隙宽的增加,总涌水量也在增加;当初始隙宽达到  $20 \times 10^{-4}$  m 以后,总涌水量保持不变。由图 8 可知当初始隙宽  $> 20 \times 10^{-4}$  m 以后,水力隙宽保持不变。可见水力隙宽变化和总涌水量的变化是一致的。

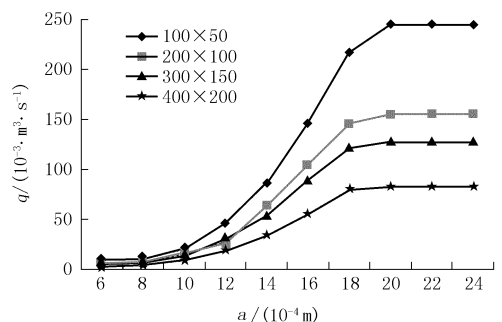


图 9 初始隙宽对渗流量的影响

### 5.4 两组节理倾角比的影响

两组节理的倾角比对隧洞内总涌水量的影响如图10。倾角比对涌水量的影响大体趋势是随着倾角比的增加,总涌水量先增大到某一最大值,然后减小。最大值发生在 $\theta_2/\theta_1 = 3.5$ ,其中 $\theta_1 = 30^\circ$ ,即两组节理的夹角为 $75^\circ$ 处。这个结果与 Indraratna 等<sup>[6]</sup>做出的 $60^\circ$ 的结果基本相吻合,Indraratna 所做的倾角比取值点为6个,而本文取值11个,结果要更为精确。同样与 Zhang et al. (1996)<sup>[10]</sup>所做结果基本一致。

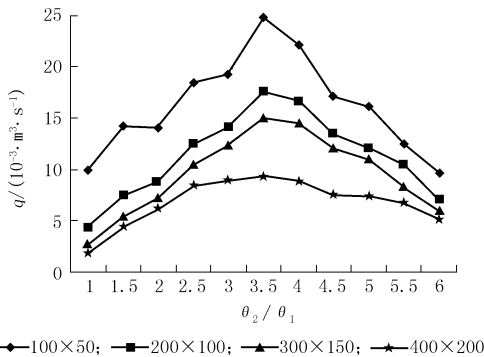


图10 节理2与节理1倾角比对隧洞内总涌水量的影响

## 6 结论

本文以裂隙岩体开挖为例,采用数值试验的方法对影响隧洞内总涌水量的因素进行了研究,结果表明:随着初始水平应力和垂直应力的比值的增大,隧洞内的涌水量在减小;随着块体边界的增大,隧洞内的总涌水量也在减小;隧洞涌水量在 $\theta_2/\theta_1 = 3.5$ ,其中 $\theta_1 = 30^\circ$ ,即两组节理的夹角为 $75^\circ$ 处达到最大,这些都与国内外学者的研究规律是相吻合的。同时隧洞内总涌水量也随着初始隙宽的增大而增

加,并当水力隙宽保持不变时,达到一个恒定值。但是由于本文中所采用节理均为连通节理,与实际裂隙岩体中的情况还有一些差距,对渗流应力耦合机理研究还是不够明确,有待于进一步的研究。通过本文也证实了 UDEC 进行裂隙岩体耦合渗流分析的有效性。

## 参考文献:

- [1] 许建聪,王余富. 水下隧道裂隙围岩渗流控制因素敏感性层次分析[J]. 岩土力学,2009,30(6):1719-1725.
- [2] 王亚军,张我华,吴昌瑜,等. 三维各向异性随机渗流场参数敏感性分析[J]. 水利学报,2009,7(1):48-52.
- [3] 戴强,焦成,段永刚,等. 应力敏感性对低渗透气藏渗流的影响[J]. 特种油气藏,2008,15(3):65-68.
- [4] 张延忠,廖华胜,刘达,等. 闸坝地基渗流计算中边界条件敏感性分析研究[J]. 水力发电学报,2008,27(1):118-123.
- [5] 贾彩虹,顾冲时. 防渗帷幕对坝基渗流量的敏感性分析——以新安江3号坝段为实际模型[J]. 南京工程学院(自然科学版),2004,(2):23-28.
- [6] 孙玉杰,邹爱清,张宜虎,等. 地应力对采动裂隙岩体渗流特性影响的研究[J]. 长江科学院院报,2009,26(9):1-5.
- [7] B. Indraratna, P. G. Ranjith, W. Gale. Single phase water flow through rock fractures[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1999, 17:211-240.
- [8] Indraratna B., Wang J. C. Effects of Stress Change on Water Inflows to Underground Excavation[J]. Australian Geomechanics, 1996, 29:99-114.
- [9] Liao Q. H., Hencher S. R. Numerical modeling of the hydro-mechanical behaviors of fractured rock masses[J]. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 1997, 34(3-4).
- [10] Zhang X., Sanderson D. J., Harkness R. M., et al. Evaluation of the 2-D permeability tensor for fractured rock mass[J]. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 1996, 33(1):17-37.
- [11] UDEC-Universal Distinct Element Code, Version 3.0, Vol. 1, 2 and 3, User's Manual[Z]. ITASCA Consulting Group, Minneapolis, USA, 1996.

(上接第75页)

此外,本软件还实现了将结果保存为.txt 格式文档,便于厂家存档;根据不同厂家要求设计生产工艺卡并打印出来指导工人生产;胎体 PDC 钻头配料计算程序等功能。这些都使得该软件的功能更加丰富,使用更加方便有效,能够更好的服务于生产。

## 4 结论

作为一种软件开发工具,VB 在各行业的应用非常广泛。在基于 VB 的基础上,结合钻头配料计算的相关公式和原理,就能较容易地制作出计算比较复杂的软件,计算结果快速准确,并且实现了结果的

存档打印。实践证明,该软件能较好地服务于热压钻头生产,实现了钻头生产过程的科学化、管理。

## 参考文献:

- [1] 孙雅琪,齐保谦,宋颖,等. 基于 VB 的家庭管理记账系统设计与实现[J]. 广西轻工业, 2010, (4).
- [2] 龚沛曾,等. Visual Basic 程序设计简明教程(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2003.
- [3] <http://ximu2005.blog.163.com>[DB/OL].
- [4] 段隆臣,潘秉锁,史晓亮. 金刚石工具的设计与制造[M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社, 2003.
- [5] 张绍和,胡郁乐,傅晓明,等. 金刚石与金刚石工具知识问答 1000 例[M]. 湖南长沙:中南大学出版社, 2008.