

复杂荷载作用下冻结凿井井壁损伤应力分析^{*}

吴月秀¹ 刘 滨¹ 远 洋² 黄瑞泉³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所; 2 中钢集团
马鞍山矿山研究院有限公司; 3 凌钢股份北票保国铁矿有限公司)

摘 要 以冻结凿井井壁为研究对象, 根据其在施工和运营各个阶段的受力特点, 优选出适合各个阶段的损伤模型, 建立了适合冻结凿井井壁应力分析的含初始损伤的各向异性损伤模型。修正的模型中考虑了温度、施工条件、混凝土的断裂能和骨料等情况对井壁质量的影响。用 FEPG有限元自动生成程序软件编写了三维弹性损伤程序, 利用 FEPG进行了梁宝寺矿主井井壁结构的弹性损伤模拟计算, 得到在永久地压、井壁重力以及随时间不断增大的竖直附加力的共同作用下, 井壁结构内部的损伤变化过程, 探讨了结构破裂的力学机理以及裂缝出现的位置和扩展过程。

关键词 初始损伤 损伤模型 破裂机理 复杂荷载 应力分析

Stress Analysis on Freezing Sidewall's Damaging under Complicated Load

Wu Yuexiu Liu Bin Yuan Yang Huang Ruiquan

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences

2 Sinosteel Maanshan Institute of Mining Research Co., Ltd; 3 Lingsteel Beipiao Baoguo Iron Mine Co., Ltd)

Abstract Taking the freezing sidewall as study target and based on the stress states at stages of conduction and running, the damage model that is suitable to corresponding stress state is selected and the anisotropic damage model including initial damage which suit to make stress analysis for freezing sidewall is set up. A three dimensional elastic damage program is compiled using FEPG software, which takes the following factors into consideration: temperature, conduction condition, concrete failure energy and aggregates, so on. The FEPG software is adopted to simulate and calculate the elastic failures of the sidewall structure of Liangboshi mine. And the sidewall's damage evolutionary process under complicated stresses such as permanence field stress, sidewall's gravity and vertical additional stress changed with time is obtained. Lastly, the paper discussed the failure's position and its development process, and the mechanical mechanics of the sidewall's structure failure.

Key words Initial damage; Damage model; Failure mechanism; Complicated load; Stress analysis

目前, 新建矿井穿过的表土层厚度越来越厚, 井筒施工一般都采用冻结法施工, 井筒内的衬砌是特种混凝土结构, 常称为井壁。冻结凿井井壁的受力状态和加载过程都很复杂。在井壁分析时, 传统的弹性理论和弹塑性理论^[1-2] 没有考虑在低温和恶劣的环境下混凝土的最终强度达不到设计强度, 以及在应力达到屈服强度以后混凝土强度的变化不能正确地反映混凝土井壁的破坏机理。利用损伤描述混凝土破坏行为时^[3-4], 将混凝土材料视为连续介质场, 将损伤作为一个劣化因子耦合到连续介质场中去, 从宏观的角度, 利用连续介质力学的概念, 把包含各种微裂纹和微缺陷的材料笼统地看成含有损伤场的连续介质, 把损伤的发生、发展看作是损伤演变过程, 引入适当的损伤变量来描述这种连续损伤介

质的物理力学性质。本研究建立了损伤变量的演化方程, 得到损伤场随时间的变化历史, 进而根据材料的损伤断裂判据确定结构的承载能力和寿命。

1 应力分析模型的建立

井壁所受的外荷载可分为 2 个主要方向: ①水平方向的冻结压力 (冻融以后表现为水土压力), 它作用于井壁的外表面; ②竖直方向主要包括井壁、装备、井口构筑物的自重荷载和土层对井壁作用的负摩擦力, 负摩擦力表现为冻结土层解冻产生的融沉荷载和表土层疏水沉降产生的荷载。此外井壁还受

^{*} 国家自然科学基金重大项目 (编号: 40638040 90510019), 国家自然科学基金面上项目 (编号: 40872187)。

吴月秀 (1983—), 女, 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 博士研究生, 430070 湖北省武汉市。

在施工期间由于温度变化产生的内部应力。利用损伤模型来分析井壁,要根据井壁不同时期的受力状态对复杂荷载进行有效简化,在对所预测结果影响不大的前提下,使得分析简单明了。

1.1 井壁施工期间损伤模型的选取

在井壁凝固阶段,混凝土井壁与冻结壁的相互作用反映为冻结壁限制混凝土井壁的变形。此时段砌筑的井壁高度不大,因而此阶段的受力状态可简化为平面应力状态。冻结压力、施工因素及温度的影响综合反映在井壁的初始损伤中。

此阶段的损伤模型采用王振波^[9]的温度损伤模型。因温度损伤模型基于混凝土的细观,运用断裂力学理论和混凝土损伤基本理论推导所得。它能反映混凝土材料的损伤,与混凝土的最终抗拉强度、弹性模量、断裂能、骨料和水泥砂浆的性质密切相关,并随温差和温变的变化而变化(温差越大,损伤越大;同温差条件下,降温比升温损伤值大得多)。此模型是建立在混凝土浇注期基础上的。损伤随温度变化的基本方程如下。

(1)升温。

$$D = 1 - \frac{1}{1 + \frac{0.00125 G_f E}{3 f^2} (1 + B \Delta T)^2} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{0.00125 l_h (1 + B \Delta T)^2}{3}} \quad (1)$$

(2)降温。

$$D = 1 - \frac{1}{1 + \frac{0.00125 G_f E}{3 f^2} (1 + A \Delta T)^2} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{0.00125 l_h (1 + A \Delta T)^2}{3}} \quad (2)$$

其中,

$$B = \frac{E_a}{30} g \frac{1}{E(\tau)(1 - \mu_a) + E_a(1 + \mu_c)}$$

$$A = \frac{E_a}{30} g \frac{0.05}{E(\tau)(1 - \mu_a) + E_a(1 + \mu_c)}$$

G_f 为混凝土材料的断裂能; f 为混凝土抗拉强度; l_h 为特征长度,描述混凝土的脆性, l_h 越小越脆; E_a 、 μ_a 分别为骨料弹性模量和泊松比; $E(\tau)$ 、 μ_c 分别为水泥砂浆的弹性模量和泊松比, τ 为浇注时间。

1.2 冻融阶段及冻融以后损伤模型的选取

冻融阶段井壁主要承受永久地压、井壁自重和

冻融引起的竖向附加力;冻融以后井壁主要承受永久地压,井壁自重和由含水表层土疏水沉降引起的负摩擦力。

对经典的损伤模型比较,选择正交各向异性损伤模型。洛兰德 (Loland) 损伤模型、马扎斯 (Mazars) 损伤模型、分段线性损伤模型、分段曲线损伤模型、双线性损伤模型、指数损伤模型^[6]等是基于应变等效假定的,它们只能解决各向同性损伤问题。只有 Sidoroff 模型和正交各向异性模型是根据能量等效假定的,可以考虑损伤的各项异性。正交各向异性模型还考虑了温度对损伤的影响,更能反映实际情况。

考虑到井壁受力的实际情况,只考虑拉破坏对井壁的影响,本构方程为

$$\{\sigma\} = D_{ed} \{\epsilon\}, \quad (3)$$

式中, D_{ed} 是弹性损伤矩阵,

$$D_{ed} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix};$$

$$a_{11} = (\lambda + 2G) d_1^2; \quad a_{12} = \lambda d_1 d_2; \quad a_{13} = \lambda d_1 d_3;$$

$$a_{22} = (\lambda + 2G) d_2^2; \quad a_{23} = \lambda d_2 d_3; \quad a_{33} = (\lambda + 2G) d_3^2;$$

$$a_{44} = d_4 d_4; \quad a_{55} = d_5 d_5; \quad a_{66} = d_6 d_6;$$

$$d_1 = 1 - D_1; \quad d_2 = 1 - D_2; \quad d_3 = 1 - D_3;$$

$$D_i = \frac{1}{2N_i + 1} \left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_j} \right)^{N_i}; \quad N_i = \frac{\sqrt{E_c}}{2 \left(\sqrt{E_0} - \sqrt{E} \right)}$$

E_c 为受拉峰值应力点的割线弹性模量; λ , G 为拉梅系数; D 为损伤值。

1.3 含初始损伤的各向异性损伤模型的建立

对于建井后混凝土井壁的损伤情况,正交各向异性模型比较适用。考虑建井时混凝土浇注时温度、断裂能、骨料和水泥砂浆的性质对混凝土未成熟期的损伤影响,温度损伤模型适合这个阶段。用温度损伤模型计算混凝土井壁的初始损伤,用这个初始损伤修正正交各项异性模型。具体的方法是在外力的作用下,损伤未达到初始损伤值的用初始损伤值计算,达到以后按实际损伤值计算。

2 含初始损伤的各向异性有限元分析

2.1 计算假定

从工程应用角度出发,为简化分析,在已有的成

果基础上^[7], 假定:

- (1) 在三向受拉状态下, 采用弹性损伤模型。
- (2) 在三向受压状态下, 按弹性问题处理, 不计受压损伤。
- (3) 在拉拉压、拉压压状态, 材料以拉为主的拉压状态, 记入受拉损伤, 受压状态的损伤不计。

2.2 计算时的损伤判据

设初始损伤为 D_0 , 计算时损伤判据为:

(1) $\sqrt{D_1 + D_2 + D_3} < D_0$, 取 $D_1 = D_0 / \sqrt{3}$, 只考虑材料初始损伤。

(2) $D_0 < \sqrt{D_1 + D_2 + D_3} < 0.9$ 材料处于线弹性损伤状态, 尚未出现宏观裂缝。

(3) $D_1 > 0.9$ 宏观裂缝扩展, 材料破坏。

2.3 计算步骤

(1) 选择荷载增量 $\{\Delta R_i\}$ 逐级加载。

(2) 求解本级荷载增量 $\{\Delta R_i\}$ 作用下的参数: 位移增量 $\{\Delta \delta_i\}$, 应变增量 $\{\Delta \epsilon_i\}$, 应力增量 $\{\Delta \sigma_i\}$, 计算当前的总应变 $\{\epsilon_i\}$ 及总应力 $\{\sigma_i\}$ 。

(3) 由总应变求 1 点的主应变, 求出损伤量。

$\sqrt{D_1 + D_2 + D_3} < D_0$, 取 $D_1 = D_0 / \sqrt{3}$, $D_0 < \sqrt{D_1 + D_2 + D_3} < 0.9$ 调整物理矩阵, 由当前的总应变计算损伤释放应力, 转至 (4); $D_1 > 0.9$ 取 $D_1 = 1$, 转至 (4)。

(4) 释放应力转化为等效结点力, 修改荷载向量。结构破坏的条件: 结构位移值急剧增加, 求解不收敛。

3 井壁破裂机理分析

依照上述理论, 以梁宝寺矿为工程实例进行数值模拟, 研究井壁结构破裂的力学机理以及裂缝出现的位置和扩展过程。

3.1 梁宝寺矿主井所承受荷载的确定

(1) 井壁承受水平土压力的计算。

$$P = 0.013 H$$

(2) 井壁自重的确定。取各种标号混凝土的密度为 2500 kg/m^3 , 模型中的重力加速度取值为 10 m/s^2 。计算中不考虑地面的施工荷载。

(3) 井壁所承受竖向摩擦荷载的确定。设定梁宝寺矿的降压速率 V 为 0.114 MPa/a (每年 11.4 m) 时, 根据冻融附加荷载和由于疏水沉降引起的负摩擦荷载的分布规律^[8], 将梁宝寺表土层分成 11 层, 各层厚度及运营 1 年后所承受的竖向荷载见表 1 (注: 求冻融附加力的取值时, 本研究取 320 d 时的

融沉附加力值; 各土层由疏水沉降产生的负摩擦力取相应段表达式的平均值)。

表 1 完工后 1 年内各段井壁上所受的竖向摩擦荷载

层号	岩层属性	厚度 /m	累计深度 /m	年井壁上竖向摩擦荷载 /Pa
1	地表土	5	5	7 825+290 145 6 t
2	粘土层	43.4	48.4	18 471+755 826 t
3	砂层	23.9	72.3	15 357 243 7 t
4	砂质粘土	25.3	97.6	22 516.08+4 306 482 t
5	砂层	10.8	108.4	16 227 686 3 t
6	粘土质砂	31.1	139.5	10 039 671 2 t
7	砂质粘土	32.3	171.8	26 652.63+5 498 392 1 t
8	粘土	57.4	229.2	19 475+2 994 899 9 t
9	砂质粘土	64.3	293.5	4 5241.23+6 765 578 5 t
10	粘土	62.5	356	8 593.5+4 068 972 8 t
11	砂质粘土	14.9	370.9	8 433.87+7 336 384 5 t

3.2 表土层混凝土井壁特征及参数取值

表土层混凝土井壁特征见表 2 参数取值见表 3。

表 2 表土层井壁特征

段数	地 段 /m	混凝土标号		外壁厚度 /mm	内壁厚度 /mm
		内 壁	外 壁		
1	0~50	C30	C30	650	700
2	50~210	C40	C40	650	700
3	210~280	C40	C40	800	1 000
4	280~340	C50	C50	800	1 000
5	340~370.9	C55	C55	800	1 000

表 3 井壁混凝土材料参数

混凝土标号	初始弹模 / 10^{10} Pa	泊松比	割线弹性模量 / 10^{10} Pa	极限压应变 / 10^{-3}	极限拉应变 / 10^{-4}	28 d 抗压强度 /MPa	特征长度 /mm
C30	4.17	0.3	3	1.5	0.72	45.3	330
C40	4.17	0.3	3.25	1.64	0.61	53.1	280
C50	4.17	0.3	3.45	1.78	0.77	61.5	250
C55	4.17	0.3	3.55	1.95	0.78	69.3	200

3.3 低温环境下混凝土井壁初始损伤的估算

根据实测的温度资料, 取混凝土从浇注到初凝 24 天的温差平均值, 217 m 测区、295 m 测区、317 m 测区的温差平均值分别为 $22.21.25.25.75 \text{ }^\circ\text{C}$ 。采用温度损伤模型对 217、295、317 m 处初始损伤进行估算。根据表 3 中的参数和公式 (2), 求得 217、295 m 和 317 m 处的初始损伤分别为 $0.109.6.0.098.6$ 和 $0.100.4$ 。根据混凝土从浇注到初凝温差的变化情况范围, 求出 C30 和 C55 段混凝土井壁的损伤范围分别为 $0.116.2\sim 0.127.8$ 和 $0.078\sim 0.082$ 。

考虑到井壁的破裂在较深的地方, 计算时做如下简化: 井深 较小时适当减小初始损伤值, 较大

时适当增加初始损伤值。整个井壁段的初始损伤值取 0.1。

3.4 数值模拟时采用的基本假设

- (1)井壁厚度沿深度方向不变,视为空间轴对称。
- (2)井筒下卧基岩为刚性体。
- (3)将钢筋的强度平均分配到混凝土井壁中去。
- (4)不考虑地面施工荷载。

3.5 数值模拟结果分析

设定计算 100年,计算得出的位移突然增大的年限为 25年。可见随着服务年限的增加井壁损伤量逐渐加大,到 25年,在表土层与基岩交界面附近井壁损伤量达到极限,产生贯通裂缝,井壁破坏。表土层和基岩交界段井壁在第 3 9 20 25年的损伤图像,见图 1。

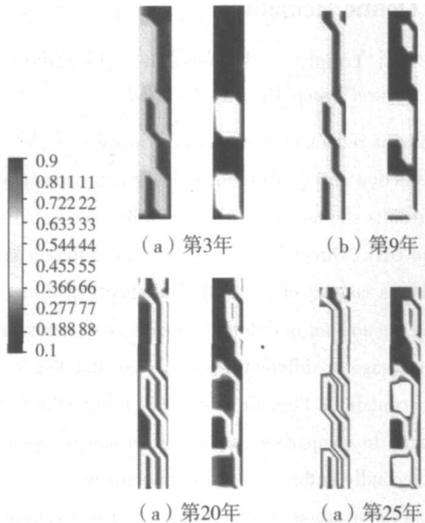


图 1 第 3 9 20 25年表土层和基岩交接段井壁损伤图像

径向位移图像见图 2 由图可知破坏在靠近下卧基岩层段的井壁上,破坏方式为由内壁向外壁呈环状剥落。径向位移最大的点在 365 m处,在从井壁的内侧向外侧逐渐减小。截取此处的圆环面的最小主应力分布图像见图 3 在第 3 9 14 20 23 25年的损伤图像见图 4 由图可以看出在外力的作用下损伤逐渐增大、扩展。在第 25年井壁损伤在较大的范围内不能承受力的作用,在继续增大的外力下产生贯通裂缝,井壁破坏。

由以上分析可知井壁的破坏机理是:在最小主应力表现为拉应力时,在井壁内侧一定区域产生损伤,对应的其它两个主应力方向也有一定的损伤,损伤的大小和一点受力状态有关,此时损伤表现为各

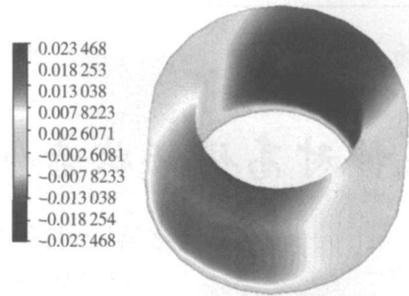


图 2 表土层和基岩交界段井壁径向位移

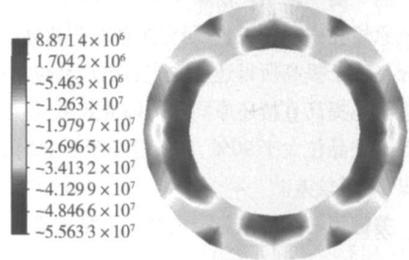


图 3 365 m 处最小主应力

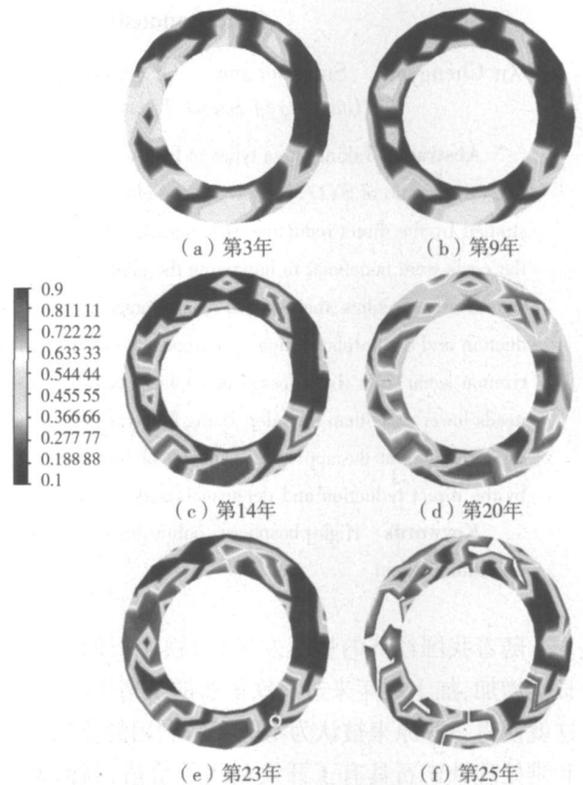


图 4 径向位移最大处的截面在第 3 9 14 20 23 25年的损伤图像

向异性,损伤使应力重新分配。继续增加外载,损伤增大并由内井壁向外井壁扩展,在损伤到达损伤阈值以后不再能承受力的作用,出现裂纹(损伤扩展)。破裂区域达到一定的程度以后,计算不收敛,井壁破坏,需对井壁采取相应的加固措施。

(下转第 78 页)

4 原矿直接氰化浸金试验

固定氧化钙用量为 2 kg/t 矿浆, pH 值为 11, 氰化钠用量为 3 kg/t, 氰化浸出时间为 24 h 考查不同磨矿细度下原矿直接氰化浸出的效果, 结果表明, 当磨矿细度为 -200 目占 71%, 86%, 95% 和 97% 时, 浸出尾渣金品位分别为 1.49, 1.46, 1.33 和 1.32 g/t, 金浸出率分别为 72.20%, 72.76%, 75.19% 和 75.37%。

取磨矿细度为 -200 目占 97%, 固定氧化钙用量为 2 kg/t, 矿浆 pH=11, 氰化浸出时间为 24 h 考查不同氰化钠用量下原矿直接氰化浸出的效果, 结果表明, 当氰化钠用量为 2, 3, 4, 5 kg/t 时, 浸出尾渣金品位分别为 1.30, 1.25, 1.10 和 1.05 g/t, 金浸出率分别为 75.75%, 76.68%, 79.48% 和 80.41%。

总之, 原矿直接氰化浸金, 在磨矿细度较高 (-200 目占 97%), 氰化钠消耗较大 (5 kg/t) 的条件下, 方可获得 80% 以上的金浸出率。

5 结 论

(1) 辽宁某金矿石为硫化矿石。矿石中金属矿物主要是黄铁矿和毒砂, 它们也是主要的载金矿物; 脉石矿物主要为石英、各种云母和长石。黄铁矿和

毒砂浸染粒度细, 与脉石矿物解离较为困难; 云母类脉石矿物易泥化, 可浮性好。因此, 该矿石为难选矿石。

(2) 毒砂是金的主要载体矿物之一, 抑制毒砂将影响金的回收。为减少金的损失, 浮选时不宜强化对毒砂的抑制。但矿石中有部分微细粒金因与脉石矿物共生密切而难以用浮选法回收, 造成金浮选回收率较低。这部分金可通过对浮选尾矿进行氰化浸出加以回收。试验结果表明, 采用浮选-氰化浸出联合工艺, 金的总回收率可达到 96.37%。

(3) 对原矿直接氰化浸金进行了考查, 结果表明, 原矿直接氰化浸金难以获得较高的金浸出率。

参 考 文 献

- [1] 《矿产资源综合利用手册》编辑委员会. 矿产资源综合利用手册[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 魏德洲. 固体物料分选学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [3] 周东琴, 代淑娟, 李宏伟, 等. 新疆某原生金矿选矿试验研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2009, 25(4): 26-28.
- [4] 朱建光. 浮选药剂[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.

(收稿日期 2010-06-12)

(上接第 45 页)

4 结 论

(1) 用传统的弹性或弹塑性理论对井壁分析时无法考虑低温和恶劣的环境下混凝土的最终强度达不到设计强度, 以及在应力达到屈服强度以后混凝土强度的变化不能正确地反映混凝土井壁的破坏机理。在井壁应力分析时引入损伤量可以反映混凝土井壁的损伤演化过程, 有效的避免了这些弊端。

(2) 建立了考虑初始损伤的冻结菌井井壁损伤应力分析模型。

(3) 研究了复杂荷载作用下的冻结菌井井壁损伤破裂机理。即在最小主应力表现为拉应力时, 在井壁内侧一定区域产生损伤, 对应的其它两个主应力方向也有一定的损伤, 损伤的大小和一点受力状态有关, 此时损伤表现为各向异性, 损伤使应力重新分配。继续增加外载, 损伤增大并由内井壁向外井壁扩展, 在损伤到达损伤阈值以后不再能承受力的作用, 出现裂纹(损伤扩展)。破裂区域达到一定的程度以后, 井壁破坏, 需对井壁采取相应的加固措

施。

(4) 为确定井壁结构的承载能力和寿命预测提供了新的思路。

参 考 文 献

- [1] 李小琴, 李文平. 深厚表土底含失水变形时与井壁相互作用弹塑性模型[J]. 岩土工程学报, 2005, 27: 329-332.
- [2] 李 军, 陈 勉, 柳贡慧, 等. 套管、水泥环及井壁围岩组合体的弹塑性分析[J]. 石油学报, 2005(6): 99-103.
- [3] 彭向和, 杨春和. 复杂加载史下混凝土的损伤及其描述[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19: 157-164.
- [4] 唐立强, 杨敬源, 等. 井壁稳定性的断裂损伤力学分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 28: 642-646.
- [5] 王振波. 温度损伤研究[D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [6] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [7] 李九红, 杨菊生. 岩体损伤——弹塑性非线性有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 707-711.
- [8] 付厚利. 深厚表土中冻结菌解阶段井壁垂直附加力变化规律的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2000.

(收稿日期 2010-06-12)