

文章编号: 1000-7598 (2013) 12-3425-06

考虑温度效应的井壁竖向附加力反演分析

何朋立^{1,2}, 王在泉³

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 洛阳理工学院 土木工程系, 河南 洛阳 471023;

3. 青岛理工大学 理学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 为了分析考虑温度应力后作用于深厚表土层立井井壁竖向附加力, 建立了由于立井内、外壁温度差产生的温度自应力和径向膨胀受阻产生的温度应力解析式。基于井壁是由于竖向应力超过钢筋混凝土井壁极限抗压强度而发生破裂的事实, 对作用于井壁上的温度荷载、自重、水平侧压力和竖向附加力在井壁内产生的竖向应力分量进行了分析, 结果表明, 竖向附加力是导致井壁破裂的最主要因素, 温度应力也是诱发井壁破裂的重要因素。同时在考虑井壁温度应力和井壁破裂特征的基础上, 利用井壁结构设计理论通过反演分析得到了地层疏水沉降时井壁承受的最大竖向附加力的数值, 为新建井壁设计和已建成投产井壁的安全性评估提供重要参考依据。

关键词: 深厚表土层; 破裂; 温度应力; 竖向附加力; 反演分析

中图分类号: TU 352

文献标识码: A

Inverse analysis for vertical additional force of shaft wall considering temperature effect

HE Peng-li^{1,2}, WANG Zai-quan³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Department of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China;

3. College of Science, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China)

Abstract: In order to analyze the role of vertical additional force on the shaft wall under deep alluvium when considering temperature effect, the temperature stress analytical formula of shaft wall is established, included the temperature self stress produced by temperature difference between inside and outside wall and the temperature stress produced by radial expansion hindered. Based on the fact that the rupture of shaft wall in the deep alluvium is due to the vertical stress of the shaft wall exceeding the limit of the reinforced concrete strength, the vertical stress components in the shaft wall are analyzed, which are produced by the temperature load, dead weight, horizontal lateral pressure and vertical additional force. The results show that the vertical additional force is the most important factor to lead to shaft wall fracture and the temperature stress is also an important factor of shaft wall fracture. Considering the rupture characteristics of shaft wall, the maximum value of vertical additional force which is caused by the settlement of the strata drainage is gotten through inverse analysis based on shaft lining structure design theory. And the reference is provided for the design and safety assessment of shaft walls in future.

Key words: deep alluvium; rupture; temperature stress; vertical additional force; inverse analysis

1 引言

我国黄淮地区大规模发生的深厚表土层煤矿井壁破裂事故世所罕见, 这一新型地质灾害严重影响煤矿安全生产, 给国家煤炭经济和人民生命财产造成重大损失^[1-3]。现场调研表明, 井壁破坏大多发生在表土层与基岩交界面附近, 破裂部位混凝土呈环带状剥落, 钢筋外露且向井内弯曲, 井内的罐道和管路受压变形。深厚表土层井壁的破裂特征和

理论分析表明, 井壁破裂是由于纵向荷载作用超过井壁混凝土抗压强度所致^[2]。

经过大量研究, 由中国矿业大学提出的“井壁附加应力说”^[1-2]已得到学界和工程技术人员认可, 该理论认为, 由于表土层失水造成井壁周围土体固结沉降, 对井壁施加向下的竖向附加力是造成井壁破裂的重要原因。该力是一种以前没有认识到, 在井壁设计时更不可能考虑到的荷载。在立井刚建成投产时, 表土层底部含水层尚未失水沉降, 竖向

收稿日期: 2012-08-22

第一作者简介: 何朋立, 男, 1976年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: hpl7609@126.com

附加力很小或者不存在,随着采矿活动持续进行,底部含水层不断疏水沉降,作用在井壁外表面的竖向附加力不断累积,在基岩与表土层交界处附近形成最大值,最终与其他荷载共同作用超过井壁抗压强度导致井壁破裂。可见,竖向附加力的确定是分析井壁破裂,改进井壁设计理论的关键。

由于竖向附加力受到井壁、周围土体、底含疏水和开采活动等多种因素影响,其分布规律、数值大小需要进行深入研究。文献[2]通过室内模拟试验得到了降水作用在不同种类土质井壁上的竖向附加力大小;杨维好^[3]利用双地层半空间弹性理论推导了竖向附加力的计算公式;杨俊杰^[4-5]根据井壁破裂特征利用井壁设计理论反演得到了作用于井壁外侧竖向附加力值。

但以上这些研究均未考虑温度荷载对井壁破裂的影响,而工程实测表明,温度对井壁破裂的影响很大,不可忽视。为此,笔者根据深厚表土层井壁实际所处工作环境,对井壁上的各种荷载作用进行分析。在考虑温度应力对井壁影响的基础上,根据井壁结构设计理论反演分析作用于井壁上的最大竖向附加力,为井壁结构设计和安全性评价提供理论依据。

2 井壁结构的荷载类型分析

深厚表土层井壁处于温度和地下水位变化的复杂工作环境中,同时受到温度荷载、自重、水平侧压力、竖向附加力等多种荷载的耦合作用,使井壁的受力状态处于动态变化之中。下面对这些荷载进行逐一分析。

2.1 温度应力的理论分析

黄淮地区的井壁破裂事故集中在每年4~10月,特别是7、8月,由此可以看出,温度作用对井壁破裂的影响也不可忽视,现场实测井壁应力、应变也呈现出年度周期性变化趋势^[6-8]。

在井筒建成投产的运营期间,深厚表土层中的立井井壁的外表面长时间接触温度变化不大的第四纪冲积层,而内表面与温度随季节变化的空气接触,故内、外壁之间的温差始终存在。由于这种温度差导致在井壁内产生温度应力。另外,当井壁温度随气温升高时,井壁会产生径向位移。在此过程中,由于周围土体的限制,井壁不可避免地受到轴对称径向约束作用,从而产生温度应力。运行中煤矿立井井壁温度应力主要包括井筒内、外壁温差产生的温度应力和井筒径向膨胀受阻产生的温度应力两部分。在只考虑温度影响,不考虑井壁受到水平地压

作用时,可将井壁受到的温差产生径向外压简化为均匀分布模式。这样,深厚表土层井壁的温度应力计算就是考虑井壁内、外温差和温度导致径向约束作用下的应力,可通过弹性力学理论得到其解析解。

为了分析深厚表土层井壁的温度应力,将井筒看作一个无限长空心圆柱体,在不考虑井壁水平地压作用的条件下,每一断面的温度应力可以按照平面应变分析,如图1所示。井壁的内半径为 a ,外半径为 b ,内侧温度为 T_a ,外侧温度为 T_b 。由于温度升高导致土体对井壁外侧产生的径向约束荷载为 p_t 。

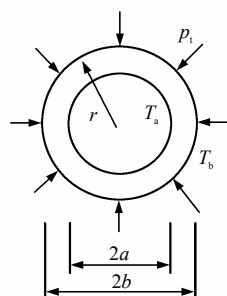


图1 井壁温度应力计算模型

Fig.1 Temperature stress calculation model of shaft wall

利用热力学和弹性理论^[9]可得井壁内、外壁在 $(T_a - T_b)$ 的温差和由温度差产生的径向约束 P_t 共同作用下的应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\alpha_f E (T_b - T_a)}{2(1-\mu) \ln \frac{b}{a}} \left[-\ln \frac{r}{a} + \frac{b^2 \ln \frac{b}{a}}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \right] + \\ &\quad \frac{b^2 (a^2 - r^2)}{r^2 (b^2 - a^2)} P_t \\ \sigma_\theta &= \frac{\alpha_f E (T_b - T_a)}{2(1-\mu) \ln \frac{b}{a}} \left[-1 - \ln \frac{r}{a} + \frac{b^2 \ln \frac{b}{a}}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \right] + \\ &\quad \frac{b^2 (a^2 + r^2)}{r^2 (b^2 - a^2)} P_t \\ \sigma_z &= \frac{\alpha_f E (T_b - T_a)}{2(1-\mu) \ln \frac{b}{a}} \left(-\mu - 2\mu \ln \frac{r}{a} + \frac{2b^2 \mu \ln \frac{b}{a}}{b^2 - a^2} \right) - \\ &\quad \alpha_f E T_a - \frac{2\mu b^2}{b^2 - a^2} P_t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据文献[10], p_t 的计算式为

$$p_t = \frac{E \alpha_f \Delta T}{(b^2 + a^2) / (b^2 - a^2) - \mu} \quad (2)$$

式中: σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 分别为井壁径向应力、切向应力和竖向应力; r 为井壁中一点到井筒中心的距离; μ 为井壁的泊松比; α_f 为井壁混凝土的热膨胀系数 ($\alpha_f = 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); E 为混凝土的弹性模量 (MPa); ΔT 为井壁的平均温度变化 ($^\circ\text{C}$), 根据文献[7], ΔT 为

$$\Delta T = \frac{(T_a - T_b)}{2 \ln \frac{b}{a}} \left(1 - \frac{2a^2}{b^2 - a^2} \ln \frac{b}{a} \right) + T_b \quad (3)$$

由此可以得到竖井内壁 $r = a$ 处的应力分量为

$$\sigma_{z1} = \frac{\alpha_f E (T_b - T_a)}{2(1-\mu) \ln \frac{b}{a}} \left(-\mu + \frac{2b^2 \mu \ln \frac{b}{a}}{b^2 - a^2} \right) - \alpha_f E T_a - \frac{2\mu b^2}{b^2 - a^2} P_t \quad (4)$$

2.2 井壁自重应力

井壁自重应力可根据公式 $\sigma_{z2} = \gamma_G H$, 其中 γ_G 为钢筋混凝土井壁的重度 (kN/m^3); H 为计算断面的埋深 (m)。

2.3 水平侧压力

表土段井壁受到的水平侧压力一般根据重液公式进行计算, $P_z = 0.013H$, P_z 为井壁受到的土体侧压力 (MPa)。井壁水平侧压力确定后, 埋深一定的断面可按照平面应变分析, 由弹性力学拉梅解答^[9]得井壁内径向应力分量 σ_{r3} 与环向应力分量 $\sigma_{\theta3}$ 为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r3} &= -\frac{b^2 r^2 - a^2 b^2}{b^2 r^2 - a^2 r^2} P_z \\ \sigma_{\theta3} &= -\frac{b^2 r^2 + a^2 b^2}{b^2 r^2 - a^2 r^2} P_z \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由式 (5) 和广义虎克定律即可得井壁内由该荷载产生的竖向应力分量 σ_{z3} 为

$$\sigma_{z3} = -\frac{2\mu b^2}{b^2 - a^2} P_z \quad (6)$$

3 竖向附加力的反演

竖向附加力是非常复杂的荷载, 与立井所处地质条件、深度、疏水时间和水压降等多种因素密切相关, 其分布形式尚无定论, 为简化起见, 按照均匀分布考虑。由于疏水沉降形成井壁和周围土体沉降的差异性而产生的井壁竖向附加力的合力自上而下随深度累加, 至表土层与基岩的交界部位达到最大值, 因此, 该深度处井壁最先破裂, 这与实际情况完全吻合。

能够在井壁内产生竖向荷载应力分量的荷载有温度荷载、自重、水平侧压力和竖向附加力 4 种。因此, 井壁的破裂是在温度应力产生的竖向应力分量 σ_{z1} 、自重应力 σ_{z2} 、水平侧压力产生的竖向应力分量 σ_{z3} 和竖向附加力产生的应力分量 σ_v 共同作用下发生剪切破坏, 且认为井壁在临近破裂前受到的竖向附加力最大。这样在井壁破裂时由竖向附加力在井壁内产生的竖向应力分量 σ_v 为

$$\sigma_v = f_{cc,k} - \sigma_{z1} - \sigma_{z2} - \sigma_{z3} \quad (7)$$

式中: $f_{cc,k}$ 为井壁混凝土双轴受压混凝土强度标准值, $f_{cc,k} = 1.2f_{c,k}$, $f_{c,k}$ 为单轴抗压时混凝土的标准值。

因此, 可以根据内壁混凝土的双轴强度条件确定出井壁外表面上单位面积竖向附加力 P_v 为

$$P_v = \frac{\sigma_v}{2Hb} (b^2 - a^2) \quad (8)$$

式中: a 、 b 为立井的内半径和外半径; H 为井壁破坏位置的埋深。根据以上公式就可以利用井壁设计方法反演出作用于破裂井壁上的竖向附加力。

4 破裂井壁实例分析

下面根据文献[11]中已破裂井壁相关资料, 对竖向附加力进行反演分析, 钢筋混凝土井壁重度 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, 温度应力按照如下条件计算: 井壁内表面温度 $T_a = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$, 外表面温度 $T_b = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$, 热膨胀系数 $\alpha_f = 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 混凝土的泊松比 $\mu = 0.20$, 弹性模量根据文献[12]插值计算。

计算过程如下, 首先根据式 (3) 求得井壁的平均变化温度值 ΔT , 然后将其代入式 (2), 可以得到井壁因内、外温度差异受到的径向约束荷载 P_t , 结合式 (4) 可得到井壁内缘处温度应力的竖向分量 σ_{z1} 。同时自重应力 σ_{z2} 、水平侧压力产生竖向应力分量 σ_{z3} 也不难得到。最后由式 (7)、(8) 即可得到作用于井壁外表面单位面积上的竖向附加力, 计算结果分别见表 1、2。

从表 1、2 可以看出, 在反演分析的破裂井壁实例中, 竖向附加力所占比重最大, 达到 37.85%~55.83%, 这是导致井壁破裂的最主要因素; 而温度应力的影响也不可忽视, 在破裂井壁中占到 20.09%~29.36%, 可见温度应力也是诱发井壁破裂的一个重要因素。对于一个具体的井筒而言, 在某一深度断面上, 由井壁自重产生的竖向应力分量 σ_{z2} 和水平地压力生的竖向应力分量 σ_{z3} 都是确定的, 而由温度产生的竖向应力分量 σ_{z1} 和竖

向附加力 σ_v 则随井壁所处环境的变化而变化。外界温度变化和底部含水层疏水引发井壁产生温度应力与竖向附加力,二者与自重应力和由水平土压力产生的竖向应力叠加,最终造成井壁破裂。

从表 3 中可以看到,文献[11]反演得到的井壁单位面积上竖向附加力范围在 64.32~126.30 kPa,而本文得到的附加力范围为 36.22~73.64 kPa。规范建议^[12]按照试验数据或者经验选取,同时规范说明中给出中国矿业大学提出的安徽宿县祁南矿井井筒外缘竖向附加力的标准值为 50 kPa。煤科院建井所建议淮北矿区为 61.5 kPa,大屯、徐州矿区为 56.4 kPa,其他地区为 62.1 kPa。这些建议值是根据室内模拟试验结果提出的,没有考虑井壁温度效应。不难看出,本文的结果与规范取值比较接近,而文献[11]的结果与规范相差较大,主要原因在于文献[11]

仅考虑自重应力而没有考虑温度、水平侧压力产生的竖向应力分量,而本文是考虑了温度应力影响后得到的结果。

竖向附加力与地层工程地质和水文地质条件、井壁结构、施工方法、地层是否疏水以及疏水速率等多种因素有关^[13-16]。鉴于竖向附加力的复杂性,目前尚缺少竖向附加力的实测值。笔者根据已经破裂井壁在考虑温度应力后反演得到的井壁竖向附加力标准值与规范条文说明取值相对比较接近,但既有大于规范建议值的,也有小于规范建议值的,主要原因在于规范依据室内模拟试验资料的有限性。因此,竖向附加力的取值不能仅仅依据规范简单选取,必须结合工程本身条件,具体问题具体分析,才能合理确定井壁竖向附加力的标准值,进而有效进行井壁设计和安全评价。

表 1 破裂井壁内竖向应力分量计算

Table 1 The calculation of vertical stress component in broken shaft wall

序号	立井名称	内径 a / m	外径 b / m	破坏垂深 H / m	水平侧压力 p / MPa	σ_{z1} / MPa	σ_{z2} / MPa	σ_{z3} / MPa	σ_v / MPa
1	临涣副井	3.60	4.90	240	3.12	7.99	6.00	2.71	13.83
2	临涣西风井	3.00	3.55	177	2.30	7.46	4.43	3.22	15.42
3	海孜主井	3.25	4.50	215	2.80	8.10	5.38	2.34	14.71
4	海孜副井	3.60	5.00	235	3.06	8.11	5.88	2.54	14.00
5	海孜中风井	2.25	3.55	230	2.99	8.40	5.75	2.00	14.38
6	海孜西风井	3.00	4.15	232	3.02	8.10	5.80	2.53	14.05
7	童亭主井	2.75	3.20	230	2.99	8.26	5.75	4.57	22.53
8	童亭副井	3.40	4.00	230	2.99	8.28	5.75	4.31	19.20
9	童亭风井	2.50	3.40	230	2.99	8.23	5.75	2.60	20.96
10	张双楼副井	2.75	3.75	240	3.12	7.77	6.00	2.70	10.03
11	张双楼主井	3.25	4.45	225	2.93	7.78	6.00	2.51	10.21
12	孔庄副井	3.00	3.95	145	1.89	6.23	3.63	1.79	12.47
13	孔庄风井	2.00	2.70	151	1.96	6.41	3.78	1.74	12.19

表 2 破裂井壁中竖向应力分量的比例

Table 2 The proportions of vertical stress component in broken shaft wall

序号	立井名称	井壁混凝土强度 f / MPa	σ_{z1} / f / %	σ_{z2} / f / %	σ_{z3} / f / %	σ_v / f / %
1	临涣副井	30.53	26.17	19.65	8.88	45.30
2	临涣西风井	30.53	24.43	14.51	10.55	50.51
3	海孜主井	30.53	26.53	17.62	7.66	48.18
4	海孜副井	30.53	26.56	19.26	8.32	45.86
5	海孜中风井	30.53	27.51	18.83	6.55	47.10
6	海孜西风井	30.53	26.53	19.00	8.29	46.02
7	童亭主井	41.11	20.09	13.99	11.12	54.80
8	童亭副井	37.54	22.06	15.32	11.48	51.11
9	童亭风井	37.54	21.92	15.32	6.93	55.83
10	张双楼副井	26.50	29.32	22.64	10.19	37.85
11	张双楼主井	26.50	29.36	22.64	9.47	38.53
12	孔庄副井	24.12	25.83	15.05	7.42	51.70
13	孔庄风井	24.12	26.58	15.67	7.21	50.54

表 3 破裂井壁竖向附加应力反演
Table 3 The inversion of vertical addition stress on broken shaft wall

序号	立井名称	水平侧压 p	混凝土等级	混凝土强度 f	σ_c	单位面积竖向附加应力 P_v / kPa	
		/ MPa		/ MPa	/ MPa	本文结果	文献[11]结果
1	临涣副井	3.12	C38	30.53	13.82	64.98	115.20
2	临涣西风井	2.30	C38	30.53	15.42	44.20	65.58
3	海孜主井	2.80	C38	30.53	14.71	73.64	125.90
4	海孜副井	3.06	C38	30.53	14.00	71.72	126.30
5	海孜中风井	2.99	C38	30.53	14.38	66.40	122.50
6	海孜西风井	3.02	C38	30.53	14.05	59.99	105.60
7	童亭主井	2.99	C53	41.11	22.53	40.98	64.32
8	童亭副井	2.99	C48	37.54	19.20	46.33	76.51
9	童亭风井	2.99	C48	37.54	20.96	71.16	98.76
10	张双楼副井	3.12	C33	26.50	10.03	36.22	74.03
11	张双楼主井	2.93	C33	26.50	10.21	47.11	96.30
12	孔庄副井	1.89	C30	24.12	12.47	71.88	107.79
13	孔庄风井	1.96	C30	24.12	12.19	49.18	75.04

需要说明的是，这里根据破裂井壁进行竖向附加力的反演分析采用的井壁混凝土强度为设计强度，理论上使用井壁破裂时的实际强度进行反演分析，其结果应该更接近工程实际。本文中由于缺乏破裂井壁的实际强度而采用设计强度反演，其结果可能与实际工程有一定出入。另外，竖向附加力随着表土层底部含水层疏水不断增加，增加到一定值时，井壁发生破裂，竖向附加力不再增加。可见井壁结构的强度限制了竖向附加力的进一步增加，由井壁破裂强度反演分析得到的竖向附加力对于特定破裂井壁和地层是最大值，因此，对于类似地层中井壁设计和安全评估具有重要参考价值。

5 结 论

(1) 深厚表土层井壁破裂是由于地层沉降产生的竖向附加力、温度应力、自重应力和水平侧压力产生的竖向应力分量超过钢筋混凝土井壁抗压强度而导致井壁破裂。

(2) 由温差产生的温度应力包括内、外壁温度自应力和径向膨胀受阻产生的温度应力。

(3) 在造成井壁破裂的荷载中，竖向附加力是最主要的根源，占混凝土抗压强度的 20.09%~29.36%；温度应力是诱发井壁破裂的重要因素，占混凝土抗压强的 37.85%~55.83%，温度应力对井壁的影响不可忽视。自重应力和水平侧压力对井壁的影响相对较小。

(4) 对部分已经破裂井壁，在考虑温度应力影响后，基于井壁设计理论反演分析得到井壁外表面单位面积竖向附加力的值为 36.22~73.64 kPa，该结论可为井壁安全评价和设计提供重要参考。

参 考 文 献

- [1] 崔广心. 特殊地层条件竖井井壁破坏机理及防治技术[J]. 建井技术, 1998, 19(1): 28—32.
CUI Guang-xin. The failure mechanism of shaft lining under special strata and the technique of preventing the shaft from fracturing[J]. **Well Construction Technology**, 1998, 19(1): 28—32.
- [2] 杨维好, 崔广心, 周国庆, 等. 特殊地层条件下井壁破裂机理与防治技术的研究(之一)[J]. 中国矿业大学学报, 1996, 25(4): 1—5.
YANG Wei-hao, CUI Guang-xin, ZHOU Guo-qing, et al. Fracture mechanism of shaft lining under special strata condition and the technique preventing the shaft from fracturing (part one)[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 1996, 25(4): 1—5.
- [3] 杨维好. 深厚表土层中井壁垂直附加力变化规律的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1993.
- [4] 杨俊杰. 混凝土结构井壁的破坏特征和应力特征[J]. 煤炭学报, 1998, 23(3): 246—251.
YANG Jun-jie. Failure and strength characteristics of the concrete shaft lining[J]. **Journal of China Coal Society**, 1998, 23(3): 246—251.
- [5] 杨俊杰, 刘全林. 由砧强度理论分析井壁的破坏特征和机理[J]. 淮南矿业学院学报, 1995, 15(4): 18—23.
YANG Jun-jie, LIU Quan-lin. Analysis on failure characteristics and mechanism of shaftlining by using concrete strength theory[J]. **Journal of Huainan Mining**

- Institute**, 1995, 15(4): 18—23.
- [6] 经来旺. 冻结法施工中温度变化对井壁强度的影响[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 40—45.
JING Lai-wang. The affection caused by variance of temperature to the strength of shaft wall in shafts constructed by freezing method[J]. **Journal of China Coal Society**, 2000, 25(1): 40—45.
- [7] 经来旺, 高全臣, 徐辉东, 等. 冻结壁融化阶段井壁温度应力研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1358—1362.
JING Lai-wang, GAO Quan-chen, XU Hui-dong, et al. Thermal stress analysis of shaft in melting stage of frozen wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(9): 1358—1362.
- [8] 梁恒昌, 周国庆, 赵光思. 井壁破裂过程的应变实测特征分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 198—202.
LIANG Heng-chang, ZHOU Guo-qing, ZHAO Guang-si. Strain characters of shaft lining crack[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(2): 198—202.
- [9] 徐秉业, 王建学. 弹性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [10] 崔广心, 杨维好, 吕恒林. 深厚表土层中的冻结壁和井壁[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998: 125—129.
- [11] 杨俊杰. 深厚表土地层条件下的立井井壁结构[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 32—34.
- [12] 中国煤炭建设协会. GB50384—2007 煤矿立井井筒及硐室设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007: 114—115.
- [13] 刘金龙, 陈陆望, 王吉利. 立井井壁温度应力特征分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2386—2390.
LIU Jin-long, CHEN Lu-wang, WANG Ji-li. Characteristic analysis of temperature stresses of shaft wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(8): 2386—2390.
- [14] 刘金龙, 陈陆望, 王吉利. 考虑温度应力影响的立井井壁强度设计方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1557—1563.
LIU Jin-long, CHEN Lu-wang, WANG Ji-li. Design method for shaft walls strength of mine considering influence of temperature stress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(8): 1557—1563.
- [15] 吴怀俊. 立井井壁破坏应力研究[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(7): 21—24.
WU Huai-jun. Study on failure stress of shaft wall[J]. **Chinese Safety Science Journal**, 2003, 13(7): 21—24.
- [16] 姚直书. 地层沉陷时井壁承受竖向附加力的有限元分析[J]. 阜新矿业学院学报, 1996, 15(4): 434—438.
YAO Zhi-shu. The finite elements analysis of shaft lining borne vertical additional force under ground subsidence condition[J]. **Journal of Fuxin Mining Institute**, 1996, 15(4): 434—438.
- [12] 杨佑发, 许绍乾. 锚索抗滑桩内力计算的有限差分“K-K”法[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 61—64.
YANG You-fa, XU Shao-qian. Finite difference “K-K” method of calculation of anchor-stabilizing piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(1): 61—64.
- [13] 申永江, 孙红月, 尚岳全, 等. 锚索双排桩与刚架双排桩的对比研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1838—1842.
SHEN Yong-jiang, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan, et al. Comparative study of anchor double-row piles and frame double-row piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1838—1842.
- [14] 舒文超. 水泥搅拌桩-压顶梁支护结构空间变形分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 557—560.
SHU Wen-chao. Analysis of spatial deformation for cement mixing piles-ring beam supporting structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 557—560.
- [15] 何建明, 白世伟. 深基坑排桩-圈梁支护结构协同作用研究[J]. 岩土力学, 1997, 18(3): 41—46.
HE Jian-ming, BAI Shi-wei. Study of cooperative action between row of piles and ring beam for deep foundation pit supporting structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1997, 18(3): 41—46.
- [16] 高印立. 考虑圈梁空间效应支护桩的简化计算[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 76—80.
GAO Yin-li. Simplified analysis of retaining piles considering spatial effect of ring beam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(2): 76—80.

上接第 3409 页