

施工期钻井井壁钢筋应力实测研究

杨志江^{1,2}, 聂庆科³, 王华明³, 王德亮³

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221008;
3. 河北建设勘察研究院有限公司, 河北 石家庄 050031)

摘要:介绍了温家庄铁矿副井钻井井壁施工期间钢筋应力的实测方案, 分析了钻井井壁钢筋应力的变化规律, 结果表明: 施工期钻井井壁钢筋以受压为主, 环向钢筋压应力大于竖向钢筋, 钢筋应力变化阶段与施工工序相对应。漂浮下沉阶段钢筋应力呈现“双线性”特点, 实测与理论计算应力相吻合; 增加配重水阶段环向钢筋压应力减小而竖向钢筋压应力增加; 首次注浆阶段钢筋压应力显著减小, 个别钢筋出现拉应力; 后3次注浆阶段钢筋压应力先增加后部分恢复, 环向钢筋应力变化大于竖向钢筋; 抽排配重水阶段环向钢筋压应力显著增加, 竖向钢筋应力变化不大; 二次补注浆阶段钢筋压应力先增加后恢复, 但恢复幅度较前述注浆有所减小。施工完成后钢筋最大应力达到屈服应力的41%。

关键词: 钻井; 井壁; 钢筋应力; 实测

中图分类号: TD352 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)05-0874-05

作者简介: 杨志江(1978-), 男, 江苏江阴人, 硕士, 讲师, 主要从事岩土特殊施工技术方面的科研与教学工作。E-mail: yyscholar@126.com。

In-situ measurement of stress of rebars in shaft lining during drilling sinking

YANG Zhi-jiang^{1,2}, NIE Qing-ke³, WANG Hua-ming³, WANG De-liang³

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China; 3. Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: The stress-measuring scheme of rebars in the shaft lining of auxiliary shaft of Wenjiazhuan Iron Ore Mine during drilling sinking is introduced, and the variation of the measured stresses is discussed. The results show that the rebars bear compressive stress during drilling sinking, the compressive stress of the tangent-directional rebars is greater than that of the vertical one, and the variation phases of the stresses correspond to the sinking phases. During the floating and dropping phase, the stress curves present “bilinear” feature. During the water-adding phase, the compressive stress of the tangent-directional rebars decreases and that of the vertical one increases. During the first grouting phase, the compressive stress decreases significantly, and some rebars even bear tensile stress. During the sequent three grouting phases, the compressive stress increases first, then partially recovers. During the drainage phase, the compressive stress of the tangent-directional rebars increases and that of the vertical one changes little. During the additional grouting phase, the compressive stress increases first, then partially recovers a less part as compared to the preceding grouting. When the sinking is completed, the maximum compressive stress of the rebars reaches the yield stress of 41%. This installation stress should be considered when designing the shaft lining.

Key words: drilling sinking; shaft lining; stress of rebar; in-situ measurement

0 引言

钻井法是以刀具破碎岩石, 用泥浆或其它介质进行护壁、洗井和排渣, 在井筒钻至设计直径和深度后再进行永久支护的一种机械化特殊凿井方法^[1]。目前, 钻井法是中国通过150 m或更深表土层的可靠方法之

—^[2]。中国钻井井壁通常采用钢筋混凝土结构或钢板混凝土组合结构, 井壁安装多采用漂浮下沉法, 即在井壁和配重水自重作用下克服井内泥浆浮力, 使井壁分段下沉至设计深度, 再进行壁后充填固井^[1]。由于

钻井法特殊的施工工艺, 使得钻井井壁不仅要承受成井后的永久荷载(如围岩压力), 而且要承受施工期的临时荷载(如泥浆压力, 配重水压力等)^[2-3]。因此, 掌握施工期间钻井井壁的受力变形规律不仅能为井壁施工的安全性评估提供依据, 而且可以为井壁结构的设计和优化提供依据。

1 工程概况

河北省遵化市温家庄铁矿副井表土段地层以卵砾石层为主, 采用钻井法施工, 井筒设计净直径6.2 m, 钻深284.5 m, 成孔直径8.3 m。井壁共57节, 井壁底为双钢板混凝土组合结构, 节高4.5 m, 壁厚600 mm, 钢板厚度为16 mm。其余井壁为钢筋混凝土结构, 节高5 m。井壁法兰厚度为20 mm, 井壁厚度变化时保持外直径不变。地层情况见表1, 井壁结构参数见表2。

表1 地层情况

Table 1 Soil strata at shaft site

底深/m	层厚/m	岩性	底深/m	层厚/m	岩性
12.00	12.00	细砂、粗砂	108.90	17.00	卵砾石含细砂
60.00	48.00	卵砾石	219.50	110.60	卵砾石含黏土
62.00	2.00	砾石含黏土	227.20	7.70	漂卵石含粗砂
72.84	10.84	卵砾石	257.70	30.50	漂石含黏土
74.85	2.01	卵石含黏土	258.30	0.60	黏土含砾石
84.83	9.98	卵石含细砂	262.32	4.02	全风化片麻岩
85.83	1.00	黏土质砂	264.48	2.16	弱风化片麻岩
90.50	4.67	砾石含细砂	286.55	22.07	片麻岩
91.90	1.40	卵石含黏土			

2 测试方案

考虑到钻井井壁监测时井筒内配重水水压较大, 传统电测方案接头密封困难较大, 因此选用光纤光栅监测系统。传感器选用北京基康科技有限公司生产的光线光栅式传感器, 钢筋计型号为BGK-FBG-4911, 温度计型号为BGK-FBG-4700S。二次仪表选用美国

Micron Optics Inc.(MOI)公司生产的SM125光纤光栅解调仪。

表2 钻井井壁结构参数

Table 2 Structural parameters of shaft lining

深度/m	节号	砼等级	壁厚/m	环筋	竖筋 (内排/外排)
0.0~80.0	42~57	C30	0.45	20@250	20@291/20@264
80.0~105.0	37~41	C40	0.45	22@250	20@291/20@264
105.0~130.0	32~36	C50	0.45	25@250	20@291/20@264
130.0~150.0	28~31	C60	0.45	25@250	20@291/20@264
150.0~190.0	20~27	C40	0.60	22@250	22@291/22@252
190.0~240.0	10~19	C50	0.60	25@250	22@291/22@252
240.0~280.0	2~9	C60	0.60	25@200	22@291/22@252

注: HRB335钢筋, 钢筋参数为直径@间距(mm)。

沿井壁深度方向共设置3个监测层位, 分别位于第4, 第10和第28节井壁中部(见表3)。每个层位设4个测点, 分别记作A~D, 测点沿环向均布。每个测点设环向和竖向钢筋计各一支, 每个测点设温度计一支, 用于钢筋计温度补偿。考虑到井壁以水平受压为主, 井壁内侧应力最大, 因此测点均布置在内排钢筋上。

表3 钢筋应力监测层位

Table 3 Monitoring layers of stress of rebars

层号	节号	深度/m	岩性	砼等级	壁厚/m	环筋	竖筋
1	4	267.5	片麻岩	C60	0.60	Φ25	Φ22
2	10	237.5	漂石含黏土	C50	0.60	Φ25	Φ22
3	28	147.5	卵石含黏土	C60	0.45	Φ25	Φ20

3 实测数据及分析

3.1 实测数据

实测所得钢筋应力变化曲线见图1, 2。图中 σ_θ 和 σ_z 分别表示环向和竖向钢筋应力, t 表示监测层位所在井壁段下沉后所经历的时间, 即实测曲线时间起点为监测层位段井壁开始下沉。实测曲线终点为井壁底破除完成。图3以第2监测层位A点环向钢筋应力为例, 给出了钢筋应力实测曲线与施工工序的对应关系。表4给出了各工序施工前后各监测层位4个测点钢筋应力的平均值。

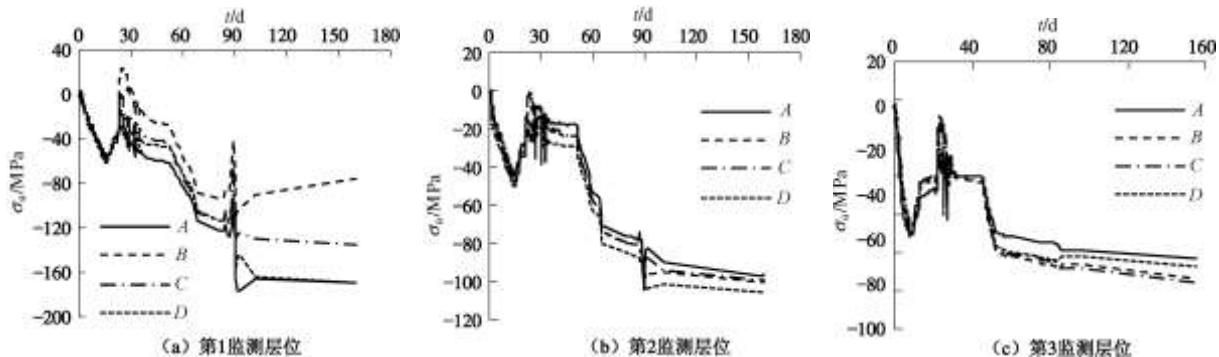


图1 环向钢筋应力实测曲线

Fig. 1 Curves of measured stress of tangent-directional rebars

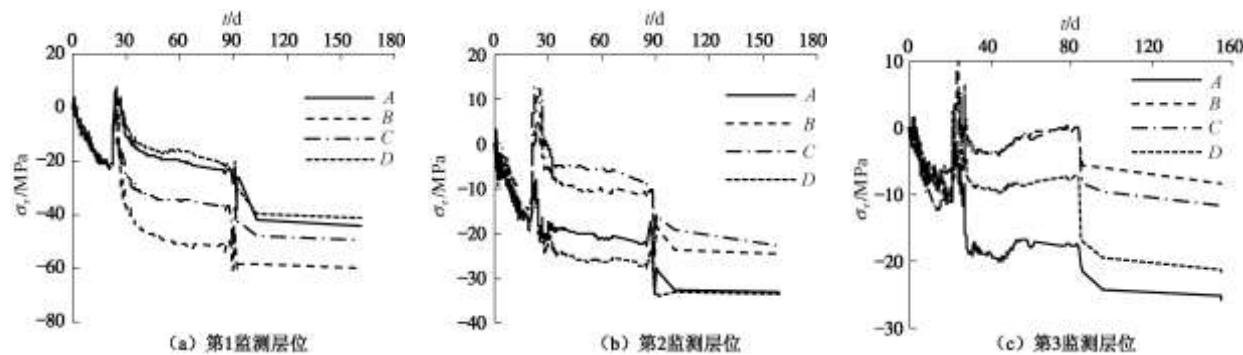


图 2 坚向钢筋应力实测曲线

Fig. 2 Curves of measured stress of vertical rebars

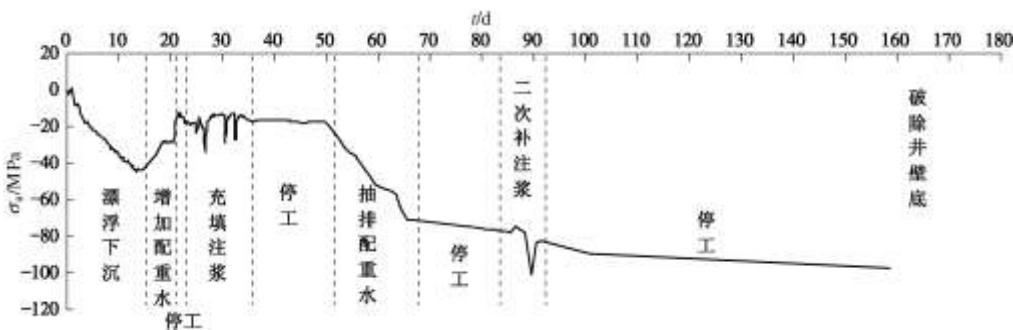


图 3 钢筋应力实测曲线与施工工序对应关系

Fig. 3 Variation of measured stress and sinking phases

表 4 各工序施工前后钢筋应力变化对比

Table 4 Comparison between measured stresses before and after sinking phases

工序	时间点	环向钢筋应力/MPa			竖向钢筋应力/MPa		
		层位 1	层位 2	层位 3	层位 1	层位 2	层位 3
漂浮下沉	下沉到底	-56.7	-46.2	-55.9	-19.9	-15.2	-8.2
增加配重水	增加后	-40.8	-30.5	-36.6	-21.5	-16.2	-9.2
充 填 注 浆	第 1 次 注浆前	-39.6	-30.0	-35.9	-21.1	-16.6	-8.6
	注浆后	-16.7	-17.9	-34.8	-8.5	-9.3	-8.5
抽 排 配 重 水	第 2 次 注浆前	-19.4	-15.3	-33.3	-14.7	-8.0	-9.4
	注浆后	-24.5	-18.2	-30.5	-16.1	-9.1	-3.0
二次补注浆	第 3 次 注浆前	-26.6	-12.9	-19.8	-21.8	-12.2	-2.2
	注浆后	-29.5	-16.5	-21.4	-23.1	-11.9	-3.6
破除井壁底	第 4 次 注浆前	-30.7	-15.0	-38.2	-24.6	-13.1	-5.3
	注浆后	-32.6	-19.3	-28.7	-24.9	-13.5	-4.9
抽排配重水	抽排前	-44.5	-23.1	-32.7	-29.7	-15.3	-9.5
	抽排后	-110.4	-79.2	-66.9	-32.6	-16.9	-6.4
破除井壁底	注浆前	-107.8	-82.0	-68.3	-31.4	-18.1	-6.4
	注浆后	-137.0	-94.5	-69.0	-46.4	-27.2	-14.8
破除井壁底	破除前	-137.5	-100.2	-74.2	-48.2	-28.5	-16.6
	破除后	-137.3	-99.9	-74.2	-48.2	-28.7	-16.9

3.2 钢筋应力的变化规律

由实测数据可知, 各监测层位环向、竖向钢筋应力实测曲线变化规律比较一致, 与井壁施工工序相对应, 钢筋应力变化分为以下 5 个阶段。

(1) 井壁漂浮下沉阶段

环向和竖向钢筋应力主要表现为压应力, 且压应力随井壁下沉深度增加而增加。该阶段钢筋应力(环向与竖向)实测曲线呈“双线性”特征。以第 3 监测层位

环向钢筋应力实测曲线为例(图4), 曲线以 $t=4.6$ d 为分界, 该时间点配重水位加至该监测层位。在配重水位加至该监测层位之前, 监测层位断面外侧承受泥浆水平压力 q_n , 坚向承受上部井壁自重应力 q_z , 测值曲线表现为一线性关系; 配重水位超过监测层位之后, 监测层位断面内侧承受配重水压力 q_w , 测值曲线表现为另一线性关系。

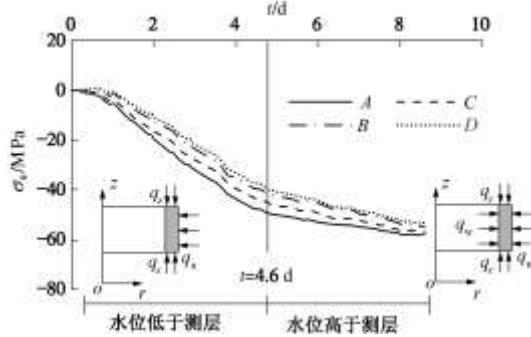


图4 漂浮下沉阶段钢筋应力实测曲线

Fig. 4 Curves of measured stress during floating and dropping phase

假定井壁混凝土和钢筋变形协调, 混凝土的切向和坚向应变分别为环向和坚向钢筋的应变, 由此应变可求得钢筋应力:

$$\sigma = E_b \varepsilon \quad , \quad (1)$$

式中, σ 为钢筋应力 (MPa), ε 为钢筋应变, E_b 为钢筋弹性模量 (MPa)。

此阶段井壁任意水平截面圆环应力解为承受内外压厚壁圆筒平面应力的应力解与坚向应力的叠加, 由应力结合广义胡克定律可求得井壁任意截面混凝土应变, 即

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_\theta &= \frac{-[(1+\mu)b^2 + (1-\mu)a^2]q_w + 2b^2q_n + \mu(a^2 - b^2)q_z}{E_c(a^2 - b^2)}, \\ \varepsilon_z &= \frac{2\mu a^2 q_w - 2\mu b^2 q_n + (a^2 - b^2)q_z}{E_c(a^2 - b^2)} . \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 ε_θ , ε_z 分别为井壁切向和坚向应变; E_c 为井壁混凝土弹性模量 (MPa); μ 为井壁混凝土泊松比; a , b , r 分别为井壁计算截面内外半径和计算点半径 (m)。

泥浆压力为

$$q_n = \gamma_n H_n \quad , \quad (3)$$

式中, γ_n 为泥浆重度, 实测值为 0.0115 MN/m^3 , H_n 为井壁计算截面与泥浆液面之间的距离 (m)。一般井壁顶面与泥浆液面的距离较小, 因此可将 H_n 作为计算截面的下沉深度。

配重水压为

$$q_w = \gamma_w H_w \quad , \quad (4)$$

式中, γ_w 为配重水重度 (0.01 MN/m^3), H_w 为计算截面与配重水面之间的距离 (m)。当配重水面不高于计算截面时 $H_w=0$ 。

自重应力为

$$q_z = \gamma_c H_c \quad , \quad (5)$$

式中, γ_c 为井壁重度 (0.025 MN/m^3), H_c 为计算截面上井壁的长度 (m)。

利用式 (2) ~ (5) 求出混凝土环向和坚向应变后代入 (1) 即可求出环向和坚向钢筋应力。

以第3监测层位为例, $a=3.25 \text{ m}$, $b=3.70 \text{ m}$, $E_c=3.6 \times 10^4 \text{ MPa}$, $\nu=0.2$, $E_b=2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。计算所得结果与实测对比见图5, 可见实测与理论结果吻合较好。

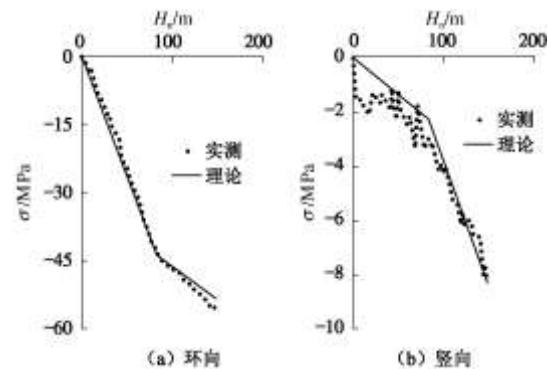


图5 漂浮下沉阶段实测与理论计算应力对比

Fig. 5 Comparison between measured and theoretical stresses

(2) 增加配重水阶段

相对于漂浮下沉阶段, 该阶段环向压应力减小, 坚向压应力略有增加。理论上, 配重水增加, 井壁截面圆环内侧配重水压增加, 而外侧泥浆压力未变, 因此, 环向压应力减小; 由于此阶段井壁已经下沉到底, 底部有了支撑, 因此, 增加配重水相当于增加了井壁自重, 坚向压应力有所增加。

(3) 注浆充填阶段

施工时分4次进行注浆充填, 段高深度分别为 $284.5 \sim 223 \text{ m}$, $223 \sim 140 \text{ m}$, $140 \sim 54 \text{ m}$ 和 $54 \sim 0 \text{ m}$ 。4次注浆在钢筋应力实测曲线上均有所反映, 见图6 (以第2监测层位A点环向钢筋应力实测曲线为例)。

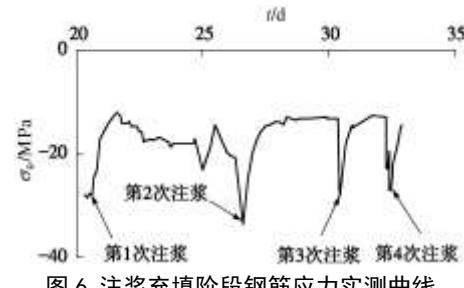


Fig. 6 Curves of measured stress during grouting phase

后 3 次注浆时环向压应力明显增大，后又迅速恢复，这是注浆压力的反映。首次注浆时环向压应力未明显增大，在注浆完成之后压应力反而明显减小，个别钢筋甚至出现较小的拉应力，到达峰值之后压应力又逐渐增大。

原因分析：首次注浆前井壁外表面承受泥浆柱压力，注浆时井壁承受的压力为水泥浆液面以上泥浆柱压力与段高内水泥浆柱压力之和，虽然水泥浆比重（1.66）大于泥浆比重（1.15），但由于注浆段高（61.5 m）有限，对于井壁，注浆时较注浆前压力增加不大，因此，首次注浆时钢筋应力测值曲线变化不明显；注浆后，随着水泥浆逐渐硬化，水泥浆柱的压力逐渐消失，此过程井壁所受外压逐渐减小，因此井壁环向压应力逐渐减小。随着水泥浆形成水泥石和水泥石强度增加，围岩压力逐渐通过水泥石传递给井壁。水泥石弹模越大，通过它传递到井壁上的压力就越接近围岩压力，因此，井壁压应力逐渐增加。首次注浆之后再注浆时，由于首次注浆形成的水泥石与井壁外表面很难紧密结合，水泥浆通过水泥石与井壁外表面的间隙向下渗透，对已注浆段井壁形成压力，因此井壁压应力增加；当一次注浆完成之后，注浆压力消失，井壁压应力又迅速恢复。

首次注浆时竖向钢筋应力变化规律与环向相似，后 3 次注浆对竖向钢筋应力的影响明显小于其对环向钢筋的影响。各监测层位钢筋应力变化规律相类似。由于首次注浆段高未超过第 3 监测层位，因此首次注浆对该层位钢筋应力无明显影响，实测曲线仅表现出后 3 次注浆过程。

（4）抽排配重水阶段

环向钢筋压应力明显增大，但竖向钢筋应力变化不明显。随着配重水的排出，井壁所受内压减小，此时环向钢筋压应力增加。由于此时充填注浆已经完成，井壁通过壁后水泥石与围岩形成整体，围岩对井壁的竖向约束增加，因此，此时井壁内压的变化对竖向钢筋应力的影响较小。

（5）二次补注浆阶段

对于第 1 监测层位，钢筋压应力先减小后增大。压应力减小是因为注浆前打开本段井壁检查孔，放出了壁后夹层水或泥浆，使得井壁外表面压力暂时减小；当井壁外表面作用有注浆压力时压应力又增大。

对于第 2、3 监测层位，由于该层位未设检查孔，因此该阶段由于注浆压力作用钢筋压应力增加。

需要注意的是该阶段注浆完成后，钢筋压应力并未完全恢复，这在第 3 监测层位竖向钢筋应力实测曲线（图 2（c））中表现尤为明显。

3.3 施工完成时的钢筋应力

从实测数据可以看出，井壁底破除之后，井壁钢筋内保留有较大的压应力，井壁深部压应力明显大于浅部。第 1~3 监测层位环向钢筋应力平均值分别为 -137.3, -99.9, -74.2 MPa，竖向钢筋应力平均值分别为 -48.2, -28.7, -16.9 MPa，竖向应力与环向应力之比分别为 35%，29% 和 23%。实际工程使用的钢筋为 HRB335，屈服应力 335 MPa，井壁施工完成时实测最大钢筋应力为 -237.3 MPa，达到屈服强度的 41%。

若将施工完成时井壁内的应力作为井壁的安装应力，则安装应力对使用期井壁的安全系数有何影响值得进一步深入研究。

4 结 论

通过对温家庄铁矿副井井壁施工期间钢筋应力的实测分析，可得出以下 3 点结论。

（1）施工期钢筋以受压为主，环向钢筋压应力大于竖向钢筋。

（2）钢筋应力变化阶段与施工工序相对应。漂浮下沉阶段钢筋应力呈现“双线性”特点，实测应力与理论计算应力吻合较好；增加配重水阶段环向钢筋压应力减小而竖向钢筋压应力增加；首次注浆阶段钢筋压应力显著减小，个别钢筋出现拉应力；后 3 次注浆阶段钢筋压应力先增加后部分恢复，环向钢筋应力变化大于竖向钢筋；抽排配重水阶段环向钢筋压应力显著增加，竖向钢筋应力变化不大；二次补注浆阶段钢筋压应力先增加后恢复，但恢复幅度较前述注浆有所减小。

（3）施工完成后钢筋最大应力为 -237.3 MPa，达到屈服应力的 41%，安装应力对使用期井壁安全系数的影响值得进一步深入研究。

参考文献：

- [1] 翁家杰. 井巷特殊施工[M]. 北京：煤炭工业出版社，1991. (WENG Jia-jie. Special construction methods for underground engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1991. (in Chinese))
- [2] 崔广心. 深厚表土中钻井法凿井的井壁外载和结构[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 409~413. (CUI Guang-xin. Loading and structure of shaft lining by shaft drilling in deep alluvium[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(4): 409~413. (in Chinese))
- [3] 崔广心. 深厚表土中竖井井壁的外载[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 294~298. (CUI Guang-xin. Loading of shaft lining for deep alluvium[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 294~298. (in Chinese))