

# 西部地区深基岩冻结井筒井壁结构设计与优化

姚直书 程 桦 荣传新

(安徽理工大学 土木建筑学院 安徽 淮南 232001)

**摘 要:**针对西部地区深基岩冻结井筒支护结构设计中出现的技术难题,通过室内冻胀试验结果表明:西部地区岩石冻胀性弱,冻结压力小,外壁设计主要应满足厚壁圆筒结构对厚度的要求。根据渗流场理论分析表明:在不进行壁后围岩注浆情况下,如果井壁基本不渗水,井壁将承受全水压;如果井壁出现渗漏水,则井壁承受的水压将大大减小,水压力折减系数主要取决于围岩渗透系数与井壁混凝土渗透系数的比值关系。在进行壁后注浆条件下,注浆效果越好,围岩渗透性越小,在井壁渗透系数相同情况下,井壁承受的水压力将得到大大减小。并提出可采用内、外壁间提前注浆技术、对壁后围岩进行深孔注浆等井壁结构优化途径。

**关键词:**基岩冻结;井筒;井壁结构;设计优化

**中图分类号:**TD265.3 **文献标志码:**A

## Shaft structural design and optimization of deep freezing bedrock shaft in west area

YAO Zhi-shu, CHENG Hua, RONG Chuan-xin

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Aiming at technical problems in the shaft structural design of freezing bedrock shaft in west area, the test result of frost heaving indicates that the frost heave of rock in west area is feeble and freezing pressure is small, the design of outer lining mainly suffices thick require of thick wall cylinder structure. According to the analysis of seepage theory, the shaft wall will endure full water pressure in instance of no surrounding rock grouting behind shaft wall if shaft wall do not seep water. If the shaft lining seep water, the water pressure which the shaft wall endures will greatly decrease, the reduction coefficient of water pressure chiefly lies on ratio relation between surrounding rock permeability coefficient and concrete permeability coefficient of shaft. In the condition of grouting behind shaft wall, the more the effect of grouting is, the smaller the surrounding rock permeability coefficient is, and the water pressure which the shaft wall endures will greatly decrease in the same condition of surrounding rock permeability coefficient. Then the approach of shaft wall structural optimization was put forward, such as advancing grouting technique between inner shaft and outer shaft, deep drilling grouting in the surrounding rock behind shaft.

**Key words:** bedrock freezing; shaft; shaft lining structure; design optimization

近年来,随着国家西部大开发战略的实施,西部煤炭开发正在大规模进行。与中东部地区新井建设相比,他们具有井筒直径大、冲积层浅、软弱基岩深、含水层多等特性。特别是基岩多为白垩系、侏罗系岩层,他们成岩晚、胶结程度差、强度低,属于软弱不稳

定岩层,遇水软化,强度急剧下降,有的水解成为软泥、砂和砾石;且含水层多为孔隙裂隙含水层,浆液扩散难,预注浆效果差,当基岩含水层涌水量大时,不得不采用冻结法凿井。

在西部煤炭大开发之前,我国煤矿还少有深井并

筒全基岩冻结工程实例。在中东部地区,虽对立井冲积层下部风化基岩及毗邻的基岩含水层采用冻结封水,但对其冻结特性和井壁结构缺乏深入研究。

在冻结井壁设计计算方面,现行设计规范和采矿工程设计手册中有关参数主要是根据中、东部地区深厚冲积层冻结井壁受力机理和大量现场实测数据整理分析得到的<sup>[1]</sup>,由于地层冻结特性和水文地质条件的差异,采用他们来设计西部全基岩冻结井筒的井壁结构未必合适。目前,已有采用冻结法施工的西部个别矿井井壁结构参数主要参考中、东部地区设计,由于冻结基岩深,造成内、外层井壁都很厚,有的井筒在采用C70高强混凝土情况下,内壁厚度仍然达到2.0 m,不但建井成本高,也给井壁施工质量带来难题。因此,有必要深入研究西部岩层的冻胀特性和水压特性,合理设计井壁结构<sup>[2]</sup>。

## 1 井壁结构形式

在我国冻结法凿井穿过含水冲积层时,主要采用双层钢筋混凝土塑料夹层复合井壁,外层井壁自上而下采用短段掘砌施工,内层井壁自下而上一次浇筑而成,中间铺设塑料板夹层<sup>[3]</sup>。

随着中、东部地区井筒穿越的冲积层越来越厚,在增加井壁厚度的同时,主要采用C60~C80高性能混凝土。而在冲积层下部风化基岩及毗邻的基岩含水层冻结段,大都沿用上部井壁结构。只有在个别井筒冻结基岩段先后采用了单层钢筋混凝土井壁和外层钢筋网喷射混凝土加内层钢筋混凝土井壁结构形式。对于冻结基岩段单层井壁结构,当冻结壁解冻后,井筒涌水主要通过壁后注浆来解决。

20世纪50年代,加拿大在萨斯喀彻温钾盐矿区凿井需要穿过条件非常恶劣岩层时,均根据不同层位含水特性,采用了局部冻结施工方案。在冻结段,井壁采用铸铁丘宾筒井壁,壁后充填混凝土,并对该段进行壁后注浆,以充填可能存在的全部空隙;在非冻结段,均采用整体浇注混凝土井壁,并对细孔隙和细裂隙的高压含水层注化学浆液封水。

因此,在我国目前还缺少西部地层基岩冻结井壁受力现场实测资料基础上,没有很好解决单层井壁接碴漏水时,采用双层钢筋混凝土井壁是可行的。

## 2 外层井壁设计参数

在冻结法凿井中,冻结压力是外层井壁设计的主要荷载。在我国过去中、东部地区冻结法凿井中,主要是冻结第四系和第三系冲积层,黏土层冻胀量大,冻结压力设计值主要取决于深部黏土层,并进行了大

量的工程实测<sup>[4-6]</sup>。

而我国过去冻结基岩含水层较少,特别是像西部地区这种白垩系和侏罗系软弱地层,缺乏工程实测冻结压力资料,这将给外壁结构设计带来难题。

通过近年来的室内冻结实验研究表明,冻结压力的大小在一定程度上取决于岩土层的冻胀量。冻胀量大,外壁承受的冻结压力就大;反之冻胀量小,冻结压力就小。因此,通过岩土层冻胀量实验值对比,可推算得冻结压力的取值范围。表1为内蒙古泊江海子煤矿和安徽丁集煤矿的冻结岩土层冻胀率对比。

表1 冻结岩土冻胀率试验结果对比(-10℃)

Table 1 Experiment results comparison of frost-heaving rate

煤矿名称	岩土	取样深度/m	冻胀率/%
内蒙古泊江海子煤矿	粗砂岩	525.00~526.93	-0.28
	细砂岩	531.50~532.20	-1.20
	泥岩	533.00~533.40	-0.21
	细砂岩	533.80~536.10	0.90
安徽淮南丁集煤矿	含钙黏土	274~302	5.70
	砂质黏土	350~358	3.08
	含钙黏土	420~436	4.48
	含钙黏土	509~513	4.00

由表1的试验结果可见,内蒙古地区冻结软弱岩层的冻胀率远小于两淮矿区丁集煤矿第四系冲积层的冻胀率,特别是内蒙古地区侏罗系岩层样本出现了冻缩,即岩石冻胀率出现负值,说明他们在冻结过程中不是胀,而是缩。因此,像西部地区这种白垩系和侏罗系岩层冻结,由于冻胀率低,考虑到围岩自身具有一定的强度和稳定性,井筒掘砌后围岩位移量小,冻结压力相应也就很小。所以,在外壁设计时控制条件为稳定性要求。

根据井壁结构设计理论,为满足稳定性要求,外层井壁设计厚度必须符合厚壁圆筒条件<sup>[7]</sup>,即

$$t_w \geq d/10 \quad (1)$$

式中, $t_w$ 为外壁厚度; $d$ 为内壁外半径。

按式(1)设计的外层井壁,具有一定的承载能力,通常可满足强度要求。

## 3 内层井壁设计参数

在我国冻结法凿井双层钢筋混凝土井壁结构中,采矿工程设计手册关于内壁厚度估算公式为

$$t_n \geq a [\sqrt{f_z / (f_z - 2kp)} - 1] \quad (2)$$

$$p = 0.01\beta H \quad (3)$$

式中, $t_n$ 为内壁厚度; $a$ 为井筒内半径; $f_z$ 为井壁材料

强度设计值;  $k$  为荷载分项系数;  $p$  为内壁承受水压力;  $\beta$  为水压折减系数,按井壁设计规范,一般取 0.81~1.00;  $H$  为地下水头高度。

式(2)、(3)是考虑在承压水作用下,根据弹性理论厚壁圆筒解答推导出来的,并得到中、东部地区深厚冲积层冻结井壁大量实测数据的验证。

在西部地区,当冻结深度不大时,采用式(2)、(3)设计内层井壁是可行的。当冻结壁解冻时,通过壁间注浆,井壁封水性好,井筒安全可靠。

由于西部地区冻结法凿井主要属于全基岩地层冻结,通常冻结深度较大,此时如果仍然采用式(2)、(3)设计,内壁将很厚(表2),如有的冻结井筒内壁厚度已达到 2.00 m,这不但掘砌效率低下,而且井壁混凝土浇筑时水化热大、施工质量难以确保,是否存在优化空间值得研究。

表2 内蒙古地区部分冻结基岩井筒内壁设计参数

Table 2 Inner lining's design parameters of shaft in frozen rock of Inner Mongolia area

矿井井筒名称	净直径/m	冻结深度/m	井壁最大厚度/m	混凝土强度最高等级
虎豹湾矿副井	7.0	591	1.25	C60
母杜柴登矿副井	9.4	696	1.80	C60
红庆河矿副井	10.5	659	2.00	C70
巴彦高勒矿副井	9.0	586	1.70	C60

#### 4 按渗流场原理进行井壁受力分析

关于压力水作用下支护结构的设计一直是高水位山岭隧道的难题之一,过去主要采取“以排为主”的处理原则,后来考虑到环境问题,通过围岩注浆而采取了“以堵为主、限量排放”的防排水设计准则<sup>[8-9]</sup>,允许排放量控制在  $5 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$  左右,对于隧道来说,排水可以通过排水沟直接流掉,但对于立井井筒,排水应通过高扬程水泵抽到地面,需要花费一定的排水费用。因此,将其他行业的排、堵水方法应用于煤矿深井井筒需要进行深入研究。

冻结井筒在冻结壁解冻时,需进行壁间注浆。而对于冻结基岩段井筒,为达到涌水量  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  的验收标准,可进行壁后围岩注浆。井筒在长期使用过程中,在承压水作用下,井壁、围岩及注浆帷幕渗流并趋于稳定。在此情况下,井筒地层渗流分析可按轴对称径向稳态水渗流数学模型进行<sup>[10-11]</sup>。

假设岩层和井壁为各向同性、均质连续材料,含水层厚度不变,可视为无限延伸,水流为稳定流,其运动规律服从达西定律,并在水头下降的瞬间水就释放

出来。设井壁内半径为  $a$ ,外半径为  $b$ ,  $r_0$  为注浆帷幕半径,  $R$  为远场距离。由于井壁厚度相对地下水头高度很小,井壁渗透力可以简化为作用在井壁外表面的表面力,取为该处的水压力。下面根据地下水动力学理论,分析井筒涌水量  $Q$  和井壁及注浆帷幕外表面的水压力关系。通过这一假设,可在含水层位置任取一剖面进行分析,如图1所示。

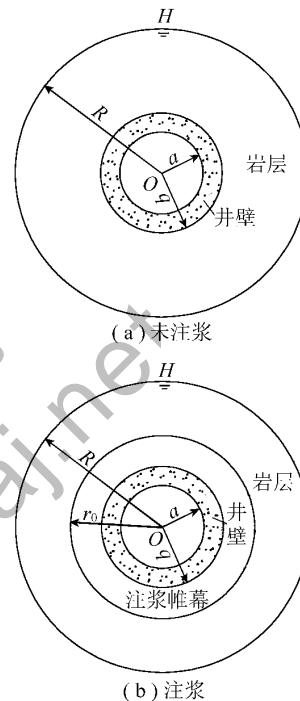


图1 未注浆和注浆情况下渗流分析模型

Fig. 1 The models of seepage analysis without grouting and under grouting

此时径向流的水头分布满足 Laplace 方程,采用柱坐标形式,并考虑水流是水平对称的,在研究  $r$  处水头( $h$ )应有

$$\frac{\partial^2 h}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

对式(4)积分,引入边界条件并根据不同过流断面的流量相等,在不进行壁后围岩注浆情况下,井筒涌水量  $Q$ 、井壁外缘承受的水压力  $p$  和水压力折减系数  $\beta$  为

$$Q = 2\pi k_w H \left/ \left( \frac{k_w}{k_c} \ln \frac{b}{a} + \ln \frac{R}{b} \right) \right. \quad (5)$$

$$p = \rho H \ln \frac{b}{a} \left/ \left( \frac{k_c}{k_w} \ln \frac{R}{b} + \ln \frac{b}{a} \right) = \beta \rho H \quad (6)$$

$$\beta = \ln \frac{b}{a} \left/ \left( \frac{k_c}{k_w} \ln \frac{H}{b} + \ln \frac{b}{a} \right) \right. \quad (7)$$

式中,  $k_c$  为井壁混凝土渗透系数;  $k_w$  为围岩渗透系数;  $\rho$  为水体密度。

在进行壁后围岩注浆、并形成注浆帷幕情况下,可推导得

$$Q = 2\pi H k_w \left/ \left( \ln \frac{R}{r_0} + \frac{k_w}{k_g} \ln \frac{r_0}{b} + \frac{k_w}{k_c} \ln \frac{b}{a} \right) \right. \quad (8)$$

$$p = \rho H \ln \left( \frac{b}{a} \right) \left/ \left( \ln \frac{b}{a} + \frac{k_c}{k_w} \ln \frac{R}{r_0} + \frac{k_c}{k_g} \ln \frac{r_0}{b} \right) \right. \quad (9)$$

$$p_g = \rho H - \rho H \ln \left( \frac{R}{r_0} \right) \left/ \left( \ln \frac{R}{r_0} + \frac{k_w}{k_g} \ln \frac{r_0}{b} + \frac{k_w}{k_c} \ln \frac{b}{a} \right) \right. \quad (10)$$

式中,  $p_g$  为注浆帷幕圈外表面承受的水压力;  $k_g$  为注浆帷幕渗透系数。

在不进行壁后围岩注浆情况下,由式(6)和(7)可见,如果  $k_w/k_c$  近似为  $\infty$ ,表明井壁基本不渗水,在此情况下  $\beta = 1$ ,井壁将承受全水压;如果井壁出现渗漏水,则井壁承受的水压将大大减小,压力折减系数主要取决于围岩渗透系数与井壁混凝土渗透系数的比值关系。如果井壁渗透系数接近于围岩渗透系数,即  $k_w/k_c$  接近于 1,则井壁几乎不受水压力作用。如某井筒净直径 8.0 m,设计钢筋混凝土井壁厚度 2.0 m,地下水相对水位分别 600、700 和 800 m 时,根据  $k_w/k_c$  可计算出作用于井壁上水压力折减系数,见表 3。

表3 作用于井壁上水压力折减系数  
Table 3 Reduction coefficient of water pressure upon shaft lining

$k_w/k_c$	折减系数		
	$H = 600 \text{ m}$	$H = 700 \text{ m}$	$H = 800 \text{ m}$
$\infty$	1	1	1
500	0.978	0.977	0.976
50 ~ 500	0.815 ~ 0.978	0.810 ~ 0.977	0.806 ~ 0.976
5 ~ 10	0.316 ~ 0.815	0.299 ~ 0.810	0.293 ~ 0.806
1	0.081	0.079	0.077

因此,根据渗流场作用原理可知,减少井壁水压力作用的有效途径是采用壁后围岩注浆技术,这在我国中、东部矿区基岩段井筒支护已得到工程实践证明。在我国中、东部地区,当井筒穿过基岩承压含水层时,主要是通过注浆来封堵水路。在采用地面预注浆、工作面预注浆和壁后注浆后,将含水层裂隙封堵死,井筒通常只采用 500 mm 左右厚的 C30 混凝土井壁支护,并安全可靠。

对于西部白垩系和侏罗系地层,由于属于孔隙、裂隙含水层,竖向裂隙较发育,目前采用地面预注浆效果不好,因此使用冻结法凿井。但当井壁施工好

后,在冻结壁解冻时,进行壁后围岩充填注浆,此时,注浆钻孔与竖向裂隙相交,可明显改善浆液扩散范围。另外,通过注超细水泥浆液和化学浆液,以提高注浆效果,封堵孔隙、裂隙水,可大大减小作用在井壁上的水压力,改善井壁受力状态。

### 5 井壁结构优化途径

对于西部地区深基岩冻结井筒,如采用双层钢筋混凝土井壁结构,由于冻结岩层的冻胀性弱,冻结压力小,外壁要求满足厚壁圆筒结构的最小厚度即可。因此,井壁结构设计优化重点在于内层井壁,而其设计荷载主要取决于水压值。所以,对承压水的认识和处理方法将决定内层井壁结构设计参数。

关于孔隙裂隙岩层水压力问题,在高水位山岭隧道设计中曾有人认为,如果衬砌结构同围岩处处密贴,地下水只能在岩体节理张开宽度的范围内对衬砌结构起作用。由于同隧道衬砌周边相交的所有节理张开宽度总和同衬砌周长相比,在量值上要小得多,由此得出水压力也很小的错误结论<sup>[10]</sup>。事实上,岩层裂隙中的承压水虽然以面力作用于裂隙壁面,只要裂隙构成网络,众多裂隙中水的面力在宏观上仍是渗流体积力,只要裂隙间距与隧道尺寸相比很小,地下水压力将直接作用于衬砌整个外表面<sup>[11]</sup>。

对采用模板浇筑法在井下现浇的混凝土井壁来说,从最不利工况和渗流连续性角度考虑,可以认为二者之间存在结合面,是非连续的,高压水将充满结合面。为此,提出井壁结构优化途径如下:

(1) 按内外壁整体受力承受外载。对于冻结井筒,可通过信息化监测,实时了解内、外壁间夹层温度,当其处于正温情况下进行内、外壁间的夹层注浆,此时冻结壁还未完全解冻,内壁还没有承受水压。此时,内、外壁通过注浆形成整体,共同承担外荷载。如河南赵固一矿由于采用了这种壁间提前注浆技术<sup>[12]</sup>,副井井壁厚度减薄了 12.5%,井筒运行安全可靠。

(2) 壁后围岩注浆。通过对壁后围岩进行注浆,减小围岩的渗透系数,可明显减小作用于井壁的水压力。当注浆帷幕形成后,起到隔水层作用,井壁上承受的水压力将很小。为提高注浆效果,可采用超细水泥或化学浆液。

(3) 设置卸压装置。在冻结基岩段中、下部,内壁设计按一定水压值进行,该值称为内壁的阈值。通过在内壁中设置卸压装置,当内壁承受的水压超过该阈值时,卸压装置自动打开放水。由于西部地层属孔隙、裂隙地层,地下水补给相对较慢,随着卸压装置的

放水,作用在井壁上水压力将明显降低,小于设计值,确保井壁安全。

特别是靠近下部煤系地层,为确保开采安全,也应该提前疏排水,并起到给井壁减压的作用。

## 6 结 论

(1)对于西部地区的深基岩冻结井筒,在目前还缺少井壁受力现场实测资料基础上,没有很好解决单层井壁接茬处漏水时,采用双层钢筋混凝土井壁是可行的。

(2)室内冻胀试验结果表明,西部地区岩石冻胀率远小于中、东部地区,甚至出现了负值,说明他们的岩层冻胀性弱,冻结压力小,考虑到围岩本身具有一定的强度和稳定性,外壁设计要求满足厚壁圆筒结构的最小厚度。

(3)根据渗流场理论分析表明,在不进行壁后围岩注浆情况下,如果井壁基本不渗水,井壁将承受全水压。如果井壁出现渗漏水,则井壁承受的水压力将大大减小,水压力折减系数主要取决于围岩渗透系数与井壁混凝土渗透系数的比值关系;在进行壁后注浆条件下,注浆效果越好,围岩渗透性越小,在井壁渗透系数相同情况下,井壁承受的水压力将得到大大减小。特别是当围岩中的注浆帷幕全部形成后,水压力将由注浆帷幕承担,井壁将几乎不受水压力作用。

(4)井壁结构优化途径主要可采用内、外壁间提前注浆技术,使内、外壁形成整体,共同承担外荷载;通过对壁后围岩进行注浆,减小围岩的渗透系数,降低作用于井壁上的水压力,为提高注浆效果,可采用超细水泥或化学浆液;在内壁中设置卸压装置,使内壁承受的水压值不超过设计值,确保内壁安全使用。

## 参考文献:

- [1] GB 50384-2007,煤矿立井井筒及硐室设计规范[S]. GB 50384-2007, Code for design of coal mine shaft and chamber [S].
- [2] 周晓敏,陈建华,罗晓青. 孔隙型含水基岩段竖井井壁厚度拟订设计研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1174-1178. Zhou Xiaomin, Chen Jianhua, Luo Xiaoqing. Research on the preliminary thickness design of shaft lining in porous rock aquifer [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1174-1178.
- [3] 崔云龙. 简明建井工程手册[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2003: 1423-1429. Cui Yunlong. A concise handbook of mine construction engineering [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2003: 1423-1429.
- [4] 姚直书,程桦,张国勇,等. 特厚冲积层冻结法凿井信息化施工外层井壁受力实测研究[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(6): 49-52. Yao Zhishu, Cheng Hua, Zhang Guoyong, et al. Research on situ measurement of outer shaft lining in freezing sinking shaft in special thick alluvium [J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(6): 49-52.
- [5] 姚直书,蔡海兵,程桦,等. 特厚表土层钻井井壁底结构分析与设计优化[J]. 煤炭学报, 2009, 34(6): 747-751. Yao Zhishu, Cai Haibing, Cheng Hua, et al. Structure analysis and design optimization of drilling shaft lining bottom in super-deep alluvium [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6): 747-751.
- [6] 王衍森,薛利兵,程建平,等. 特厚冲积层竖井井壁冻结压力实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 207-212. Wang Yansen, Xue Libing, Cheng Jianping, et al. In-situ measurement and analysis of freezing pressure of vertical shaft lining in deep alluvium [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 207-212.
- [7] 张荣立,何国纬,李铎. 采矿工程设计手册[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2002: 1743-1751. Zhang Rongli, He Guowei, Li Duo. Designing guidebook of coal mining [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2002: 1743-1751.
- [8] 王建秀,杨立中,何静. 深埋隧道衬砌水荷载计算的基本理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1339-1343. Wang Jianxiu, Yang Lizhong, He Jing. Introduction to the calculation of external water pressure of tunnel lining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1339-1343.
- [9] 王秀英,王梦恕,张弥. 山岭隧道堵水限排衬砌外水压力研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 125-127. Wang Xiuying, Wang Mengshu, Zhang Mi. Research on regulating water pressure action on tunnels by blocking ground water and limiting discharge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 125-127.
- [10] 王建宇,胡元芳. 对岩石隧道衬砌结构防水问题的讨论[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(2): 20-25. Wang Jianyu, Hu Yuanfang. Discussion on waterproofing in tunneling [J]. Modern Tunneling Technology, 2001, 38(2): 20-25.
- [11] 张有天. 岩石隧道衬砌外水压力问题的讨论[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(3): 1-4. Zhang Youtian. Discussion on external hydraulic pressure upon rock tunnel lining [J]. Modern Tunneling Technology, 2003, 40(3): 1-4.
- [12] 盛天宝. 深厚冻结井壁壁间前注浆机理与应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 912-916. Sheng Tianbao. Early grouting mechanism and application between thick freezing shaft walls [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 912-916.