

# 深井填砾工艺关键技术探讨

景 龙, 王彦静, 徐 树, 常林祯

(河北省地矿局第四水文工程地质大队, 河北 沧州 061000)

**摘 要:**在河北平原新近系地热井施工时采用填砾工艺具有防砂、稳定孔壁的优点,但具有一定的施工难度。通过实践应用提出了管孔径级配方案,总结了终孔替浆工艺,分析并论证了填砾数量计算方法、填砾速度的确定原则及静水填砾方法的可行性。

**关键词:**地热井;深井填砾;河北平原;新近系

**中图分类号:**TE249 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2010)10-0051-05

**Discussion on Key Technology of Gravel-filling for Deep Well/JING Long, WANG Yan-Jing, XU Shu, CHANG Lin-zhen** (No. 4 Team of Hydrogeology and Engineering Geology, Hebei Provincial Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Cangzhou Hebei 061000, China)

**Abstract:** In the construction of geothermal well in neogene in Hebei plain, gravel-filling technology was adopted with the advantages of sand control and borehole wall stability. Based on the practice, the paper put forward the gradation scheme for pipe diameters, summed up the mud replacement technology and analyzed the calculation method for gravel-filling quantity, principle of gravel-filling speed and the feasibility of static water gravel-filling.

**Key words:** geothermal well; gravel-filling in deep well; Hebei plain; neogene

河北平原区新近系热储胶结性差,以往采用非填砾工艺成井,经过多年运行,部分较浅井含砂量增大,山西南部地区亦有类似现象<sup>[1]</sup>,严重者井壁坍塌、产量降低<sup>[2~3]</sup>。

为克服上述弊端,近年来我们通过与兄弟单位合作,逐渐完善了深井填砾成井工艺。通过在河北、天津等类同地层的施工,工艺逐步成熟,可以在新近系成井中应用。

## 1 填砾工艺的优缺点

### 1.1 填砾优点

(1)砾料充填于滤水管与井壁的环隙中,对井壁具有支撑作用,从而平衡井壁与井管之间的力学状态<sup>[4]</sup>。

(2)在滤水管与井壁之间形成人工过滤层,防止较松散地层中极细砂进入井筒,可有效控制管井含砂量(达到 1/20 万以下),延长井及附属设备的使用寿命。

(3)填砾井孔径增大,一定程度上增大了渗水面积,减少水力损失,可增大单井产量。

(4)填砾井的结构更适合回灌,可实现灌采双重功效<sup>[3]</sup>。

### 1.2 施工难点

(1)为能够顺利填砾并形成一定厚度的过滤层,孔径必须增大,给施工带来难度,因此必须选择合理的孔、管径级配,保证普通钻机装备亦可成井。

(2)深井填砾最大的难题即为如何能够保证砾料安全到位,因此必须控制填砾数量及填砾速度,选择合理的填砾方法。

(3)由于孔径较大,填砾成井后不利于洗井<sup>[2]</sup>,合理控制替浆性能以简化洗井工艺也是关键技术之一。

填砾工艺必须克服上述技术难题,才可以推广使用。

## 2 管孔径级配

管孔径级配的优化实质是确定钻孔与井管之间环隙大小,控制砾料厚度。环隙增大利于填砾,但给护壁、成孔带来难度。填砾厚度的控制必须综合考虑多方因素。

### 2.1 影响因素分析

#### 2.1.1 防砂

就挡砂方面不少文献提出了要求,认为只要砾石直径与砂样直径选择合理,填砾的最小厚度相当于砾料标准直径的 2~3 倍时就能够阻砂<sup>[5]</sup>,直径为 4 mm 的标准砾料为例填砾最小厚度不过 15 mm;规

收稿日期:2010-09-10

作者简介:景龙(1978-),男(汉族),河北怀安人,河北省地矿局第四水文工程地质大队地热钻井公司副经理,探矿工程、水文地质专业,从事岩心钻探、地热钻井工程、水文地质施工技术及管理工,河北省沧州市新华区冷冻厂东街,jing\_longd@163.com。

范说明砾料厚度  $> 25 \text{ mm}$  即可有效挡砂<sup>[6]</sup>。由此可见控制砾料厚度  $> 25 \text{ mm}$  方可实现挡砂功能。

### 2.1.2 安全填砾

为预防孔壁不规则时影响砾料安全到位需要将孔、管径间隙增大。规范要求单边环隙  $> 75 \text{ mm}$ <sup>[6]</sup>。实际在施工中发现,通过成井后期扫孔破壁等技术措施能够保证孔壁平整,可避免砂桥风险,从而也可减小孔径,降低千米以深地热井施工难度。

### 2.1.3 施工难度

管径一定时增大环隙即增大孔径,但给施工带来难度。施工时回转扭矩增加,泵量要求增大,工期延长,成本增加。普通深井施工设备无法满足要求,工艺推广受限。

## 2.2 实用分析

2005年以来我们与一些兄弟单位合作,在沧州、天津顺利完成5眼新近系填砾地热井(见表1)。各井运行良好,含砂量均达到普通供水井要求。

表1 井结构数据表

井编号	井深/m	管孔径结构(泵室段/下部)			施工钻机	有效工期/d
		管径/mm	孔径/mm	最小间隙/mm		
R6	1540	340/178	550/311	93/57	GZ-26000	40
社热2	1886	273/178	550/311	125/57	GZ-2600	47
R3-1	1563	273/178	550/346	125/75	GZ-2600	71
R8	1903	340/178	550/311	93/57	GZ-2600	57
DG51R	1652	273/178	550/311	125/57	TSJ-2000	34

由上述施工数据可见:

(1) 只要下管填砾前井眼处理得当,填砾工艺合理,保证上部第四系松散段最小环隙  $> 100 \text{ mm}$ 、下部  $> 55 \text{ mm}$  完全可保证砾料安全通过。

(2) 这种管孔径的级配保证了一定的填砾厚度,实现了挡砂功能。

(3) 从施工能力分析,常规钻机可以满足施工要求,工期及成本相差不大。

(4) 从增产的角度分析,增大井径实现增产是有局限的。以我队近年来在沧州市区施工的4眼井为例拟合涌水量曲线(见图1),各井施工机械、地质条件基本相同的情况下,采用大孔径填砾工艺较常规小孔径(245 mm)非填砾工艺出水能力明显增加;然而同样采用填砾工艺的R3-1井较R6井孔径增大,涌水量增加了45%,但R3-1井施工效率(日均成井深度)仅为R6井的57%,成本明显增加。取涌水曲线与效率曲线的交叉点对应孔径(D点)作为最优孔径,可见取水层孔径达到300 mm(D点)左右时(牙轮钻头选311 mm)是合理的。

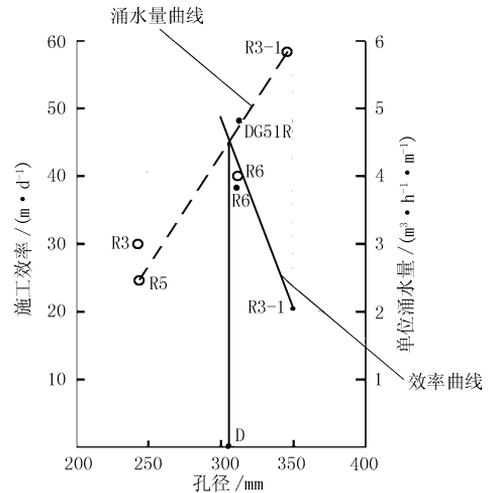


图1 孔径-效率、涌水量相关图

注:(1)涌水量曲线由R3-1、R6、R3、R5井数据拟合,单位涌水量=涌水量/降深;(2)效率曲线由R3-1、R6、DG51R井数据拟合,3眼井均采用填砾工艺,成井深度及施工装备条件相近,成井施工效率=成井深度/有效工期。

## 2.3 管孔径级配

综上所述,以常用的石油套管为例,采用两级井管的成井结构(见图2)并确定管孔径级配(见表2),这与河南千米填砾地热井孔身结构<sup>[7]</sup>相近。

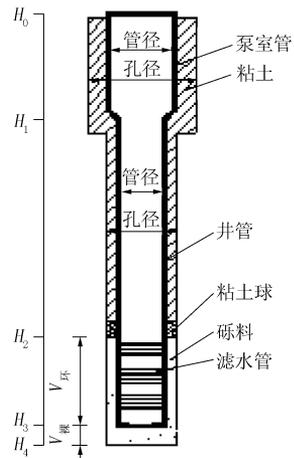


图2 填砾成井结构示意图

表2 管孔径级配表

井段	管径/孔径[mm(in)/mm(in)]			
上部泵室管段	273(10 $\frac{3}{4}$ )/550		340(13 $\frac{3}{8}$ )/550	
下部井壁管段	178(7)/311(12 $\frac{1}{4}$ )	168(6 $\frac{5}{8}$ )/311(12 $\frac{1}{4}$ )	140(5 $\frac{1}{2}$ )/311(12 $\frac{1}{4}$ )	178(7)/311(12 $\frac{1}{4}$ )
				168(6 $\frac{5}{8}$ )/311(12 $\frac{1}{4}$ )

## 3 替浆

### 3.1 替浆方法

填砾井中管外环隙大,泥浆充填砾料孔隙中,一般占组合颗粒总体积的40%左右。高粘度泥浆将

产生较大的内摩阻力,洗井时需要增大临界压力方使空隙中泥浆流动并排出。可见控制替浆性能可简化洗井工艺。因此替浆时保证井壁稳定的前提下应力求降粘。

我们在下管前泥浆的调整分成除屑和降粘两个阶段。

(1)第一阶段除屑,配合破壁完成。在几级扩孔及破壁的过程中,泥浆中含有大量的岩屑且性能不均。此时必须替入优质泥浆,将孔内岩屑彻底排出。泥浆性能调整主要方向是适当控制泥浆粘度,保证悬浮力,配合固控设备(振动筛、旋流除砂器)提高排屑效率。建议性能参数为:粘度22~23 s,密度1.15 kg/L左右,失水量<8 mL/30 min,含沙量<0.5%。循环2周以上岩屑基本清除时可提钻探孔。

(2)第二阶段降粘,配合探孔完成,是替浆的关键。探孔到底循环泥浆时少量渐入清水降低密度,同时可将探孔过程孔壁脱落岩屑及泥皮排出,此时

建议控制泥浆性能达到:粘度20 s左右,密度1.15~1.10 kg/L。此时要控制清水渐入量,粘度变化不宜太快,循环一般不少于3周。该工序结束要进行短起,短起后再行降粘,此时向泥浆中增大清水渐入量,并定时测泥浆密度及粘度,一般循环2周后将泥浆性能调整为:粘度17 s左右,密度<1.10 kg/L。然后可提钻下管。

### 3.2 实用分析

以社热2、DG51R井降粘过程为例(见图3)分析。社热2井在降粘阶段分成两个步骤,第一步循环3周粘度由27 s降至18 s,短起后循环2周由19 s降至16.5 s结束,下管完井后采用泵抽洗井6 h即达到水清砂净。DG51R井在第一步由于井筒泥浆不均,循环6周粘度由27.8 s降至18.5 s,短起后由20 s降至17 s,最终该井亦采用抽水洗井10 h达到水清砂净。由于合理降低了粘度,最终采用简单的泵抽洗井法即将含水层及砾料彻底洗通。

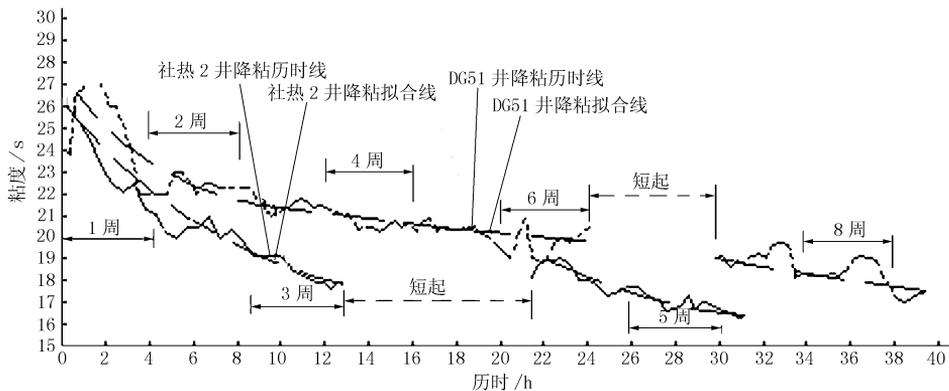


图3 泥浆粘度调整历时线

由上述泥浆调整过程可见:根据地层特征,河北平原区填砾地热井替浆粘度降至17~16 s是可行的,从而简化了洗井工艺,这与河南部分地区的做法相近<sup>[8]</sup>。从图3看出,各井降粘拟合线基本为渐变,因此要保证泥浆性能渐变且要掌握好循环周期,否则替浆不均将影响成井质量<sup>[9]</sup>,DG51R井先期泥浆质量略差,历时线变幅较大,通过增长循环周期,最终成井也取得了较好效果。

## 4 填砾

### 4.1 砾料数量确定

砾料规格选择可参照普通供水管井的方法,但数量确定有所差异。关于砾料数量的计算参考规范<sup>[6]</sup>稍作修改见下式:

$$V = [0.785(D_k^2 - D_g^2)L + V_{裸}] \cdot \alpha \quad (1)$$

式中:V——砾料数量, m<sup>3</sup>; D<sub>k</sub>——填砾段孔径, m;

D<sub>g</sub>——过滤管外径, m; L——填砾段长度, m; V<sub>裸</sub>——裸孔段体积(见图2); α——附加系数。

关于α取值须特别说明:α的产生主要由于砾料运输损失、钻孔超径、砾料在环隙下沉过程中的孔壁粘接等原因造成。深井中砾料通过有限的环状间隙与孔壁时有碰撞,在具有泥皮的孔壁上易于粘结,填砾数量越多,粘结量越多。以直径311 mm钻孔为例,1000 m钻孔壁总面积接近1000 m<sup>2</sup>,砾料的粘接量不容忽视,这也是深浅井砾料量计算之别。

以我们填砾井实际砾料使用量分析(见表3):较深井(社热2)或大径钻孔(R3-1)孔壁面积较大,砾料粘结量大,使α达到1.5以上;而孔径相对小、深度相对浅的井(R6、DG51R)也达到1.3~1.4。据此现场砾料应以1.5~1.8的数量准备,较普通供水管井的砾料有所增加。

表3 填砾数量统计表

井号	井深/m	理论填入体积/m <sup>3</sup>			实际使用体积/m <sup>3</sup>	附加系数 $\alpha$
		环隙体积	裸孔段体积	合计		
R6	1540	16.34	1.67	18.01	24	1.33
社热2	1886	26.13	1.90	28.02	44	1.57
R3-1	1563	13.82	4.89	18.71	33	1.76
DG51R	1652	24.00	3.04	27.04	38	1.41

## 4.2 填砾速度控制

为保证砾料在滤水管对应位置不产生分选、填砾过程不产生架桥现象,须控制填砾速度,否则可能影响填砾质量,以下逐一进行分析。

### 4.2.1 分选效应分析

河北平原新近系热储颗粒分选具有差异性,实现挡砂砾料须具有一定级配。填砾时粒径不同的砾石在冲洗液中的沉降速度是不同的。如果投入速度过快,大砾已充填而小砾还未到位,造成大径颗粒在下而小径颗粒在上的分选性,长距离下沉的深井中尤为明显<sup>[2]</sup>。为此必须测算各级颗粒到达井底时间,使用下式<sup>[4]</sup>:

$$v = K[d(\rho_1 - \rho)/\rho]^{0.5} \quad (2)$$

式中: $v$ ——砾料在静止冲洗液中的下沉速度, m/s; $K$ ——砾料颗粒的形状系数,对于球形颗粒 $K = 5.11$ ,不规则颗粒 $K = 2.5 \sim 4$ ,我们使用定厂家的砾料经现场试验取3.5为宜; $d$ ——砾料粒径, m; $\rho_1$ ——砾料密度,选择石英砾石时为 $2.65 \text{ g/cm}^3$ ; $\rho$ ——完井液密度,通过现场测出,一般在 $1.10 \sim 1.05 \text{ g/cm}^3$ 之间,计算时取均值 $1.07 \text{ g/cm}^3$ 为宜。利用上式可初步测算出不同粒径砾料在完井液的下沉速度,以求得砾料到达井底时间。

为容纳最初沉入井底的大径砾石,须在井管串底部预留一定体积的裸孔段(成孔而不下管)来沉淀。由于颗粒不均,比较大砾到达滤水管底界的时间差来控制填砾速度。使用如下公式:

$$q_1 \leq V/[\sum(t_1 - t_i)n_i] \quad (3)$$

式中: $q_1$ ——填砾速度限量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ; $V$ ——滤水管底部可容砾料的体积,  $\text{m}^3$ ,包括沉淀管处环隙体积和预留裸孔段体积(俗称“口袋”),裸孔段还具沉淀残余岩屑的作用,岩屑沉淀按照施工经验以孔深的5%计取; $t_1$ ——最小砾料颗粒到达时间, h,  $t_1 = H_2/v$ ; $H_2$ ——滤水管串底界深度, m; $t_i$ ——其它各级砾料颗粒到达时间, h,  $t_i = H_2/v_i$ ; $v_i$ ——各级砾料在冲洗液中的下沉速度; $n_i$ ——各级砾料对应的体积含量, %,据颗分试验取得。

### 4.2.2 砂桥效应分析

假设井壁稳定,如投入的砾料(或封填材料)速度太快,使投入量大于其通过环隙的能力,砾料堆积于最窄环隙处可能产生自锁而形成砂桥(见图4),在不稳定段架桥现象更易出现<sup>[10]</sup>,为此须控制砾料在环隙中的流通量。取该处环隙尺寸的1/4为经验系数控制填砾速度,颗粒可安全通过而不产生挤密现象:

$$q_2 \leq 0.25v_2S \quad (4)$$

式中: $q_2$ ——填砾速度限量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ; $v_2$ ——砾料中最小颗粒在完井液中的下沉速度,  $\text{m}/\text{h}$ ,由式(1)计算; $S$ ——最小环隙面积,  $\text{m}^2$ ,一般为管箍处。

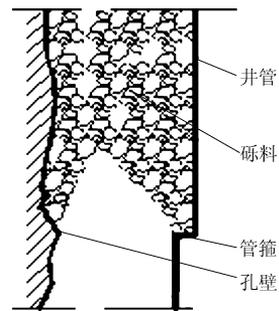


图4 砾料架桥示意图

### 4.2.3 实用分析

采用上述分析方法,在R6、社热2、R3-1、DG51R井施工中按照式(3)、(4)计算值与实际对比可见:由于实际填砾速度均未超过计算填砾速度限量(见表4),因此施工中未出现砂桥现象;含砂量亦未超标,可确定砾料安全到位,无分选现象。

综合分析,从避免分选及砂桥效应出发确定填砾速度是可行的,根据计算可知:

(1)由于预留裸孔段长度之别造成了分选限速( $q_1$ )的差异,因此控制裸孔段的长度对填砾地热井具有重要意义;裸孔段不但可以沉淀泥浆中的残留岩屑及稠浆以简化洗井工艺,对减弱砾料的分选效应更显作用,因此在许可条件下应力求增大裸孔段,但这将增大施工成本,综合分析1500 m以浅的填砾地热井,保持 $q_1 = q_2$ 条件下反推裸孔段长度宜控制在40 m左右较合理。

(2)砂桥效应限速 $q_2$ 比较固定,只要确定了管孔径级配便可确定,一般178 mm/311 mm(管径/孔径)的级配填砾限速在 $7 \sim 8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,该限值与施工经验接近,其它封填材料投入速度的控制亦可以式(4)进行校核。

## 4.3 填砾方法

普通供水管井采用的填砾方法主要有静水填

表4 填砾速度数据统计表

井号	基本数据		分选限速 $q_1 / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$		砂桥限速		实际填砾速度 $/( \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} )$
	界面位置/m	$t_i / \text{h}$	$\{ q_1 \leq V / [ \sum (t_i - t_i) \cdot n_i ] \}$		$q_2 / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$		
			$V = (V_{\text{环}} + V_{\text{裸}}) \alpha$	$\sum (t_i - t_i) \cdot n_i$	$q_1 \leq$	$(q_2 \leq 0.25 S v_1)$	
R6	$H_2 = 1502, H_3 = 1510, H_4 = 1540$	$t_2 = 2.19, t_4 = 1.55, t_6 = 1.27$	2.91	0.57	5.11	7.84	4.00
社热2	$H_2 = 1832, H_3 = 1851, H_4 = 1886$	$t_2 = 2.67, t_4 = 1.89, t_6 = 1.54$	4.07	0.69	5.90	7.84	5.28
R3-1	$H_2 = 1504, H_3 = 1524, H_4 = 1563$	$t_2 = 2.20, t_4 = 1.55, t_6 = 1.27$	6.01	0.58	10.36	10.93	8.99
DC51R	$H_2 = 1584, H_3 = 1605, H_4 = 1652$	$t_2 = 2.31, t_4 = 1.64, t_6 = 1.34$	5.64	0.59	9.56	7.84	7.17

注:(1)基本数据: $H_2$ ——滤水管底界深度; $H_3$ ——井管下入深度; $H_4$ ——成孔深度(见图2); $t_2, t_4, t_6$ ——2、4、6 mm 粒径的砾石达到  $H_2$  界面的时间,由式(2)计算,为分析方便,将所填砾料概化为 2、4、6 mm 三种规格,含量分别为 20%、60%、20%(这与砾料筛分结果相近),据式(1)计算其在井内下沉速度分别为 685、968、1186 m/h。(2)分选限速: $V$ —— $H_2$  界面以下环隙体积,亦为沉淀管段环隙体积; $V_{\text{裸}}$ ——裸孔段体积(见图2),计算时应扣除孔底岩屑沉淀(根据施工经验一般沉淀以孔深 5% 计); $\alpha$ ——附加系数,一般取 1.4 为宜; $t_1, t_i$ ——最小粒径的砾料及  $i$  级粒径砾料到达  $H_2$  界面的时间; $n_i$ —— $i$  级粒径砾料所占砾料总体积百分量; $q_1$ ——避免分选发生条件下的填砾限量。(3)砂桥限速: $S$ ——井管与孔壁最窄处环隙面积,一般位于管串接箍处; $v_1$ ——最小粒径的砾石下沉速度; $q_2$ ——避免砂桥发生条件下的填砾限量。

砾、动水填砾、抽水填砾<sup>[4]</sup>等,也有特殊的导管填砾法<sup>[11]</sup>。在深井中,采用动水填砾分选加剧;抽水填砾容易孔壁失稳,产生砂桥;导管填砾要求环隙足够大,深井使用受限。

#### 4.3.1 基本原理

在填砾过程中,随着砾料的均匀投入,环隙泥浆在砾料的冲击下形成活塞效应,使井管内外水柱产生压差,迫使泥浆通过滤水管沿井管向上逐渐流出管外。随着孔内砾料高度增加,砾料逐渐埋没滤水管,井口返浆量渐少,流速由急变缓。当砾料全部埋没滤水管时,井口停止返浆,以此核算填入量和理论计算量。这种填砾方法实际也有抽水填砾的功效,由于环隙流体速度较低,减少了抽水填砾的安全隐患;同时通过井口返浆情况能判定填砾的进度及安全性。即使在社热2井(成井深度 1886 m)中应用,填砾质量亦可保证<sup>[3]</sup>。

#### 4.3.2 工艺流程

(1)下管后井口安装排浆三通,排浆管引出保证不回流;

(2)按照设计速度进行填砾,并观测井口返浆量,填砾一般为 2 人于井口铁锹连续均匀投入;

(3)井口及时补充稀泥浆,保证不缺水;

(4)井口返浆明显减小时停止填砾,待砾料密实下沉封井口泵压检验(泵压升高环隙稳定不返水时砾料到位);

(5)井管内下钻到底泵入清水替浆;

(6)泵抽洗井管外液面未下降验证投砾到位,投粘土球止水。

## 5 结论

(1)合理的管孔径级配是成井的前提,保证管孔环隙在松散层段达到 100 mm 以上,填砾段达到 55 mm 以上是可行的;从施工难易程度及增产角度分析目的层选择 311 mm 的孔径是合理的。

(2)终孔替浆也是成井的关键环节,采用除屑、降粘的调整方法逐步降低粘度,可简化洗井工艺。

(3)深井填砾数量较浅井有所增加,附加系数  $\alpha$  宜控制在 1.3 ~ 1.7,最终要进行泵压检验。

(4)填砾速度的控制是施工中的重要技术措施,以分选效应和砂桥效应为出发点确定的填砾速度可以保证填砾质量。

(5)静水填砾方法可行,砾料可安全到位。

## 参考文献:

- [1] 李连生. 第三系地层中地热井施工常见的主要问题[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004, 31(9): 59-60.
- [2] 卢予北. 地热井常见主要问题分析与研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004, 31(2): 43-47.
- [3] 景龙, 杨永明, 常林祯, 等. 任丘市首眼填砾地热井施工工艺[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(7): 28-32.
- [4] 王世光. 钻探工程(下册)[M]. 北京:地质出版社, 1987. 216-218.
- [5] 姚爱国, 马明, 吴翔, 等. 岩土工程钻进原理[M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社, 2000. 207.
- [6] GB 50296-99, 供水管井技术规范[S].
- [7] 刘志国, 刘新丽, 刘丕新, 等. 千米地热井施工技术[M]. 河南郑州:黄河水利出版社, 2004. 34.
- [8] 姜继国. 桥式滤水管在平原地热深井中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(5): 44-46.
- [9] 张秋冬, 卢予北, 吴青松, 等. 河南某地热井管挤毁事故分析及处理[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(3): 18-20.
- [10] 彭桂湘. 地热深水井蓬堵事故的处理及预防[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(7): 28-31.
- [11] 刘志国. 导管填砾在千米地热井的应用[J]. 探矿工程, 2000, 27(4): 48.