

贴砾过滤器贴砾层渗透性试验研究

周绍武¹, 何计彬²

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000;

2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071100)

摘要: 贴砾过滤器、砾石充填在地热开采、水文观测等工程中得到了广泛应用。他们的主要工作部位为贴砾层、充填层, 研究最常用的贴砾材料石英砂的渗透性能。通过调节砂样的粒径、细颗粒含量, 测试砂样固结前后在饱和状态下的渗透性, 分析粒径、级配对砂样固结前后渗透性的影响, 通过试验数据整理, 分析相同条件的砂样固结前后的渗透性能差异。试验表明, 固结前后的砂样的渗透系数随粒径的减小而减小, 在中砂范围内变化最大, 在细砂范围变化较小; 固结前后砂样的渗透系数都随着细颗粒含量的增多而减小, 复配砂的最小渗透系数小于构成其细颗粒组砂的渗透系数; 相同条件下, 粗砂范围内, 石英砂的渗透性能要优于固结后的石英砂, 中细砂范围内, 固结后的石英砂的渗透性能要优于石英砂。

关键词: 石英砂; 粒径; 细颗粒含量; 固结; 渗透性能对比; 贴砾过滤器

中图分类号: P634; P64 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)02-0053-07

Experimental study on permeability of the pre-packed layer in
pre-packed screen pipeZHOU Shaowu¹, HE Jibin²

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding Hebei 071051, China)

Abstract: Pre-packed screen pipes and gravel packing are widely used in geothermal exploitation, hydrological observation and other projects. The main working parts are gravel layer and pre-packed layer. In this paper, the permeability of quartz sand was researched which is commonly used as the pre-packed material. Through adjusting the particle size and fine particle content of the sand samples, the permeability of quartz sand before and after consolidated in saturated state is tested, the effects of the particle size and gradation on the permeability of quartz sand before and after consolidated are analyzed, and the permeability difference in the same conditions is also analyzed by sorting the tested data. The results show that the permeability coefficient of sand samples decreases with the particle size. Changes in medium sands is the biggest and smaller in fine sand. The permeability coefficient of sand samples decreases as the fine particle content increases. The minimum permeability coefficient of composite sand is smaller than that of the sand that constitutes its fine particle group. Under the same conditions, the permeability of loose coarse quartz sand is better than that of the consolidated quartz sand, and the permeability of the medium and fine consolidated quartz sand is better than that of loose quartz sand.

Key words: quartz sand; particle size; fine particle content; consolidation; permeability comparison; pre-packed screen pipe

0 引言

城市化发展对水资源过度利用, 导致地表水域

污染严重。水质无法满足人们日常生活用水。华北许多地区的生活用水、农业用水不得不使用地下

收稿日期: 2023-04-13; 修回日期: 2024-01-02 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.02.008

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“深海钻探工程关键技术支撑”(编号: DD20221721)

第一作者: 周绍武, 男, 壮族, 1996年生, 助理工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻井工艺和技术方面的研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 13240312778@163.com。

引用格式: 周绍武, 何计彬. 贴砾过滤器贴砾层渗透性试验研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(2): 53-59.

ZHOU Shaowu, HE Jibin. Experimental study on permeability of the pre-packed layer in pre-packed screen pipe[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 53-59.

水。地下含水层多为砂层和卵石层,在开采过程中会有砂砾随着水流流动而流入水井,有时为了提高采水量还会采用水平井完井的方法,加大了砂砾流入水井的几率。因此防砂工作是必不可少的。防砂存在着渗透速度与出砂量的矛盾关系,增大渗透速度,砂砾更容易随着水流入井筒,减少出砂量容易减少渗透速度导致单位时间内的出水量减小。

贴砾过滤器防砂属于机械防砂的一种,其防砂原理与砾石充填类似,区别在于贴砾过滤器在地表根据防砂要求预先将砾石粘结在机械衬管上,衬管起支撑和辅助过滤作用,贴砾层起主要阻砂作用,透水性能与防砂性能好,与砾石充填方式比起来其优势在于省去了充填步骤,可以根据井眼的大小来设计贴砾管的口径,让贴砾层与井壁之间有环空间隙,方便洗井,根据使用需求可以调整贴砾层材料的种类,可用石英砂、塑料颗粒、陶粒、核桃壳颗粒等作为贴砾材料,在美国、日本等国家大量用于水井建造工程中^[1-2]。1978年天津地质局初步仿制西德SBFKK型贴砾过滤器成功,贴砾层脆性大,与基管结合不够牢固,易损坏,之后与满城钻井公司合作研制的贴砾管的基础上进行了改良^[3-6];1991年起地矿部水文地质技术方法研究所李炳平、冉德发、叶成明等相继研制出具有抗腐蚀能力的PVC-U塑料贴砾过滤器^[7]、陶粒贴砾过滤器^[8]、具有自洁能力的双层贴砾滤水管^[9]、使用塑料小球作为贴砾材料的轻质全塑贴砾过滤器^[10],所研制过滤器满足水平井成井工艺要求。魏民等^[11]在贴砾过滤器的基础上,在过滤集水管的管壁上开设带有反冲小孔过水孔,提高贴砾过滤器的抗淤塞能力。

目前,对在防砂过程中起主要隔滤作用的贴砾层的基础渗透性缺少详细的研究。中国地质调查局水文地质环境地质调查中心开展的“盐碱地改良关键技术”项目对贴砾过滤器贴砾层进行研究,在减少出砂量方面已经取得比较良好的效果,在此基础上为提高贴砾层的初始渗透性能,以提高生产井单位时间内的产量,延长生产井经济开采的年限,长时间高效利用地下咸水资源解决土地盐碱化等问题提供技术支撑,开展以常用的石英砂作为贴砾材料的贴砾层渗透性能的试验研究,以对后续工程中使用石英砂作为贴砾层的贴砾过滤器的配比提供参考。

1 贴砾层渗透性试验

贴砾过滤器的贴砾层是工作时主要渗透部分,其渗透性能与未固结的固体颗粒材料存在着很大的联系,因此对未固结固体颗粒材料渗透性能试验是必要的。贴砾层的渗透性能主要由渗透系数 K 反映,对渗透系数 K 有影响的因素有许多,主要的因素有颗粒粒径、颗粒排列结构、级配、孔隙率、饱和度,其中对渗透系数 K 影响最大的是颗粒粒径和级配。孔径的大小和单位多孔介质体积内的孔隙体积直接影响流体在多孔介质中的流动难易,孔径的大小主要由多孔介质的颗粒粒径和级配反映,孔隙体积则由孔隙率反映^[12-14]。试验研究颗粒粒径大小、细颗粒含量对贴砾层固结前后的渗透性能的影响。

1.1 技术路线

先筛选出试验所需的石英砂,先对砂样进行粒度分布测试。对为未固结的石英砂进行渗透性试验,研究粒径大小对渗透系数的影响,在一定粒径范围内,控制粗细颗粒的质量配比研究细颗粒含量对石英砂渗透性的影响。将石英砂固结后,重复未固结石英砂的渗透性试验。对比固结前后石英砂的渗透性差异,技术路线见图1。

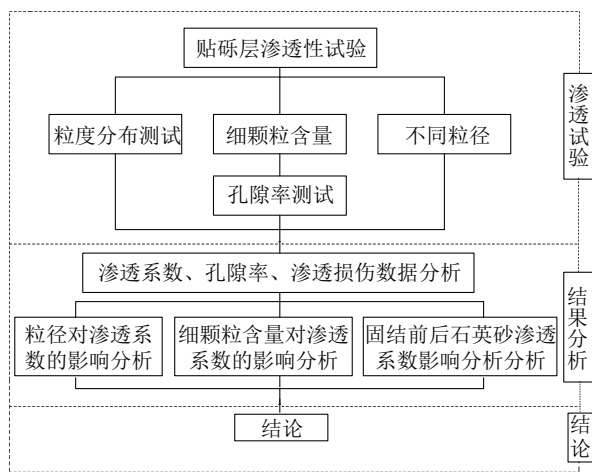


图1 技术路线

Fig.1 Technical route

1.2 试验材料

常用的贴砾固体颗粒材料为石英砂、塑料颗粒、陶粒、核桃壳颗粒^[15-16]。试验使用的贴砾层材料为使用最为广泛和成熟的石英砂,粘结剂使用聚酰胺树脂及配套的固化剂。

1.3 试验仪器

试验主要用到的仪器有:TST-70 型渗透仪、仿制 TST-70 型渗透仪、GSL-3000 激光粒度分析仪、振动筛及筛网等。

1.4 试验方法

试验方法参考《土木试验规程》(SL 237—1999)中的常水头渗透试验,孔隙率测量试验方法参考《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)。固结石英砂使用的砂样为进行过渗透试验后的风干原样砂。石英砂孔隙率试验使用的砂样为进行渗透试验后的风干原样,固结石英砂孔隙率试验使用的砂样为用于测试渗透试验的固结石英砂样,以确保

颗粒级配基本一致。

1.5 试验结果

1.5.1 粒度分布试验

试验所选用石英砂粒度范围为 30~110 目,划分为 30~50 目(0.355~0.6 mm)、40~60 目(0.3~0.45 mm)、50~70 目(0.224~0.355 mm)、60~80 目(0.2~0.3 mm)、70~90 目(0.16~0.224 mm)、80~100 目(0.15~0.2 mm)、90~110 目(0.13~0.16 mm),筛选出的砂样进行的粒度分布测试,土力学中用有效粒径 d_x 表示小于该粒径的土含量占总土质量的 $X\%$ 的粒径。所得结果如表 1、图 2。

表 1 砂样的粒度分布

Table 1 Particle size distribution of sand samples

目数/目	d_{10}/mm	d_{20}/mm	d_{30}/mm	d_{40}/mm	d_{50}/mm	d_{60}/mm	d_{70}/mm	d_{80}/mm	d_{90}/mm	d_{100}/mm
30~50	0.26	0.32	0.34	0.36	0.42	0.46	0.49	0.55	0.65	0.96
40~60	0.28	0.33	0.38	0.40	0.43	0.49	0.53	0.58	0.67	0.96
50~70	0.27	0.32	0.37	0.39	0.43	0.49	0.54	0.59	0.68	0.96
60~80	0.18	0.22	0.24	0.27	0.30	0.31	0.37	0.41	0.47	0.75
70~90	0.18	0.22	0.23	0.29	0.32	0.35	0.39	0.43	0.52	0.75
80~100	0.14	0.21	0.22	0.26	0.29	0.31	0.35	0.38	0.45	0.75
90~110	0.13	0.17	0.19	0.21	0.23	0.27	0.29	0.32	0.37	0.58

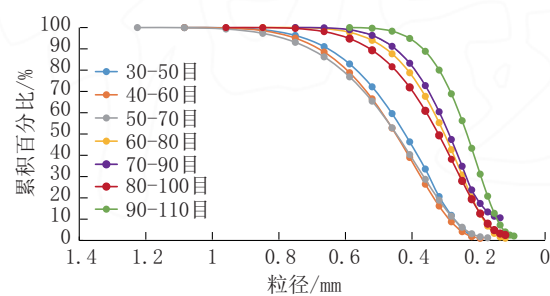


图 2 石英砂级配累积曲线

Fig.2 Accumulation curve of quartz sand gradation

粒度仪测量出来的粒径要大于筛网规格对应的粒径。以 50~70 目(0.224~0.355 mm)为例,用筛网筛出的砂样颗粒粒度应该都在 0.224~0.355 mm 之间,但是粒度仪测出的 d_{60} 为 0.49 mm,超过了筛网对应的最大粒径,这是由于石英砂本身的几何特征和激光粒度仪的测量原理造成的。

首先由于加工工艺的原因,石英砂的磨圆度比较差,颗粒的形状并不像塑料颗粒和陶粒那样的接近球状,大部分石英砂颗粒是带有棱角的非球体。

激光粒度仪则是基于夫朗和费(Fraunhofer)衍射和米氏(Mie)散射理论,激光本身具有很好的方向性和单色性,只有在遇到阻碍物时才会发生散射,散射光的传播方向与原来的传播方向产生的夹角的大小与遇到的阻碍物的大小有关,阻碍物尺寸越大,产生的夹角小,即小颗粒会让激光产生大角度的散射光,大颗粒会让激光产生小角度的散射光。当阻碍颗粒为带棱角的非球体时,若光从垂直于石英砂较长的边的角度入射,则产生小角度的散射光,则认为遇到的颗粒粒径为长边长度对应的大颗粒,从而导致测量结果偏大。

1.5.2 渗透系数试验

参照《土木试验规程》(SL 237—1999)中的常水头渗透试验,对划分好粒径的石英砂样分别进行渗透性试验,并利用 30~50 目砂样与 50~70 目砂样按不同比例进行复配后测试渗透性能,并利用石英砂原样制成固结石英砂样进行渗透系数测试,研究颗粒粒径大小、细颗粒含量对贴砾层渗透性能的影响,固结前后石英砂的渗透性能变化。

1.5.2.1 不同粒径的渗透试验

对用筛网筛分过后的砂样进行渗透性能测试所得试验结果见表2、图3。

表2 不同粒径砂样的渗透试验结果(固结前后)

Table 2 Results of permeability test of sand samples with different particle sizes (quartz sand before and afte consolidation)

目数/目	渗透系数 $K_{20}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	
	散体	固结
30~50	0.144	0.111
40~60	0.091	0.098
50~70	0.049	0.051
60~80	0.024	0.034
70~90	0.023	0.038
80~100	0.015	0.029
90~110	0.015	0.017

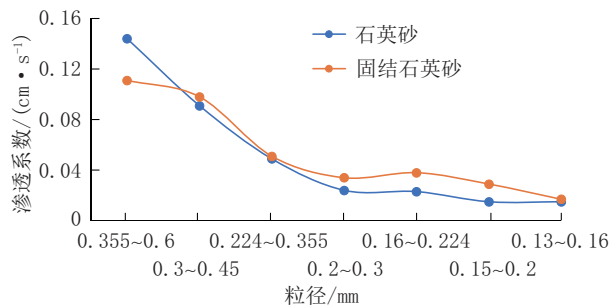


图3 粒径对渗透系数的影响

Fig.3 The effect of particle size on permeability coefficient

从图3可知,随着颗粒粒径不断减小,石英砂样及固结后的石英砂样的渗透系数都不断降低。土力学上中砂与细砂的粒径分界点为0.25 mm。未固结前,0.355~0.6 mm试样的渗透系数为0.144 cm/s,0.2~0.3 mm试样的渗透系数为0.024 cm/s,0.13~0.16 mm试样的渗透系数为0.015 cm/s,试样的颗粒粒径由中砂往细砂过渡的过程中,渗透系数减小幅度达到83%。粒径达到细砂范围后,渗透系数减小幅度37.5%;固结后0.355~0.6 mm试样为0.111 cm/s,0.2~0.3 mm试样的渗透系数为0.034 cm/s,0.13~0.16 mm试样的渗透系数为0.017 cm/s,由中砂向细砂过渡时渗透系数减小幅度为69.4%,在细砂范围内的减小幅度为50%。试样在固结前后,渗透系数在中砂范围内的减小幅度要大于其在细砂范围内的减小幅度。粒径范围在

0.355~0.6 mm时,固结后的试样渗透系数下降了23%,粒径减小到0.3~0.45 mm后,固结状态石英砂的渗透系数开始大于石英砂。粒径0.16~0.224 mm时,固结状态的石英砂的渗透系数是石英砂的1.7倍。在中粗砂范围,石英砂的渗透性能要优于固结状态的石英砂的渗透性能,在中细砂范围,固结状态的石英砂的渗透性能比石英砂的渗透性能好。

1.5.2.2 复配砂的渗透试验

以30~50目(0.355~0.6 mm)砂样为粗颗粒,以50~70目(0.224~0.355 mm)砂样为细颗粒,按不同质量比例进行复配得到30~70目(0.224~0.6 mm)砂样后测试渗透性能。试验所得结果见表3、图4。

表3 复配砂的渗透试验结果

Table 3 Results penetration test of compound sand

编号	粗细颗粒质 量比	渗透系数 $K_{20}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	
		散体	固结
SY-1	9:1	0.078	0.105
SY-2	4:1	0.073	0.086
SY-3	2:1	0.067	0.095
SY-4	1:1	0.063	0.088
SY-5	1:2	0.045	0.070
SY-6	1:4	0.043	0.077
SY-7	1:9	0.027	0.046

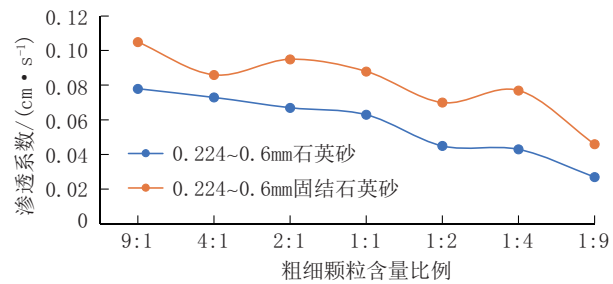


图4 细颗粒含量对渗透系数的影响

Fig.4 Effect of fine particle content on permeability coefficient

从图4可知,随着细颗粒含量的增多,渗透系数不断减小。0.224~0.6 mm的试样在粗细颗粒比例由9:1逐渐过渡到1:9时,渗透系数由0.078 cm/s逐渐减小至0.027 cm/s,渗透系数减小65.4%。

结合表2、表3数据分析,复配砂的渗透系数最小值小于单纯由细砂组成的砂土体。0.224~0.6 mm粒组的细颗粒组的粒径为0.224~0.355 mm,

0.224~0.6 mm 粒组试样最小渗透系数为 0.027 cm/s, 而 0.224~0.355 mm 试样的渗透系数为 0.049 cm/s, 0.224~0.6 mm 粒组的最小渗透系数为其细粒组 (0.224~0.355 mm) 渗透系数的 55%, 固结后复配砂最小渗透系数比其细粒组降低 9.8%。

粒径范围 0.224~0.6 mm 时, 固结状态的试样渗透系数均比未固结试样的渗透系数要大。固结前后试样的平均渗透系数分别为 0.057 cm/s、0.080 cm/s, 固结后的平均渗透系数是固结前的 1.4 倍。

1.5.3 孔隙率试验

利用复配砂进行孔隙率试验, 结果如表 4、图 5。

表 4 复配砂的孔隙率测试结果

Table 4 Porosity test results of compound sand

编号	孔隙率/%	
	散体	固结
SY-1	42.20	31.40
SY-2	42.10	30.20
SY-3	40.50	27.90
SY-4	40.80	26.50
SY-5	40.90	28.60
SY-6	41.10	31.40
SY-7	41.40	32.80

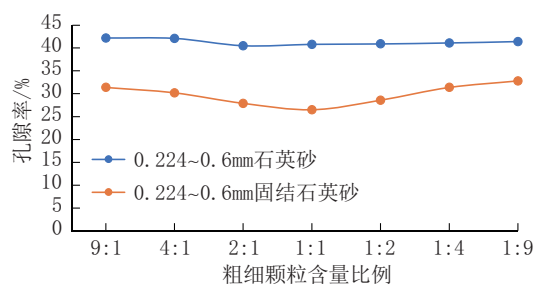


图 5 复配砂的孔隙率 (固结前后)

Fig.5 Porosity of compound sand (quartz sand before and after consolidation)

从图 5 可知, 孔隙率有一个先减小又增大的变化, 孔隙率在粗颗粒与细颗粒配比小于 1:1 时, 随着细颗粒含量占比增高而略微减小, 在配比比值超过 1:1 过后有随着细颗粒含量增多而增大, 0.224~0.6 mm 试样在固结后这一现象更为明显。

2 试验结果分析与讨论

渗透系数、孔隙率变化与颗粒排列形成的中间

通道的尺寸有关。假定石英砂颗粒为圆球状, 颗粒的主要排列方式见图 6^[17]。

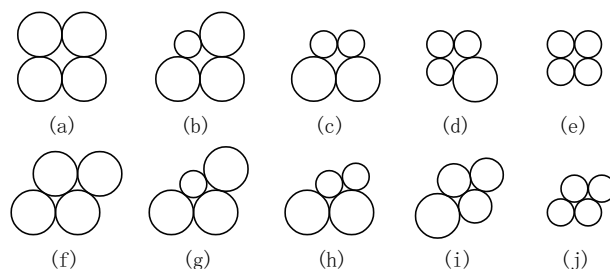


图 6 颗粒的主要排布方式

Fig.6 The main arrangement of particles

颗粒间的内切球体直径最大的排列方式为图 6 中 (a) 的立方体排列方式。最小直径为图 6 中 (i) 和 (j) 的斜方体排列, 如图 7、图 8。

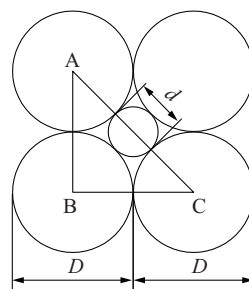


图 7 立方体排列

Fig.7 Cube arrangement

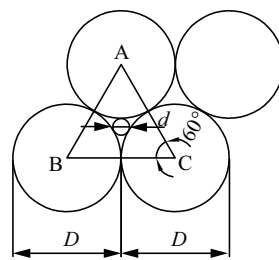


图 8 斜方体排列

Fig.8 Rhombus arrangement

根据几何关系可以求得立方体、斜方体排列方式形成的内切圆直径 d 分别为 $0.414D$ 、 $0.154D$, 依此计算出每种试样颗粒排列形成的内切圆直径范围见表 5。

0.355~0.6 mm 试样的内切圆直径为 0.055~0.248 mm, 0.2~0.3 mm 试样的内切圆直径 0.031~0.124 mm, 相对于 0.355~0.6 mm 试样的最小、最大内切圆直径减小了 0.024 mm、0.124 mm, 减小幅度

表5 不同试样的颗粒形成的内切圆直径
Table 5 Diameter of inscribed circle formed by particles of different samples

目数/目	粒径/mm	内切圆直径/mm
30~50	0.355~0.6	0.055~0.248
40~60	0.3~0.45	0.046~0.186
50~70	0.224~0.355	0.034~0.147
60~80	0.2~0.3	0.031~0.124
70~90	0.16~0.224	0.025~0.093
80~100	0.15~0.2	0.023~0.083
90~110	0.13~0.16	0.020~0.066

为43.6%、50%。0.13~0.16 mm试样的内切圆直径为0.020~0.066 mm,相对于0.2~0.3 mm试样的最小、最大内切圆直径减小了0.011 mm、0.058 mm,幅度为36.5%、46.8%。试样粒径由0.355~0.6 mm减小至0.2~0.3 mm时的最小、最大内切圆直径的减小量和幅度均大于粒径由0.2~0.3 mm减小至0.13~0.16 mm时的最小、最大内切圆直径的减小量和幅度,所以中砂范围内渗透系数随颗粒直径的减小而减小的幅度在要大于细砂范围内的渗透系数的减小幅度。因此在选用防砂配比时,在使用粗砂能起到防砂效果的情况下,应当尽量选择颗粒直径大的配比,这样既能增大产能。如果使用细砂仍起不到较好的防砂效果时,可选取颗粒更小的的配比,这样既能防砂,又对渗透性能的影响不大。

理论上0.355~0.6 mm试样的孔喉直径范围为0.055~0.248 mm。实际上人工加工生产的石英砂并不是完全的球状,其形成的孔喉要比球体形成的孔喉直径要大一些。0.224~0.355 mm的石英砂本身存在粒径 <0.248 mm的颗粒,0.355~0.6 mm颗粒含量占试样的50%以上时,0.224~0.355 mm的砂样中粒径 <0.248 mm的颗粒能够进入0.355~0.6 mm形成的孔隙中,使得孔隙率会随细颗粒含量的增多有一定的下降。

在细颗粒含量 $>50\%$ 时,孔隙主要由细颗粒构成,随着细颗粒的增多,发生细颗粒填入大颗粒形成的通道的现象越来越少,孔隙率逐渐恢复,这符合等大球形理论的孔隙率与颗粒粒径无关的观点。

由图4、图5可知,随着细颗粒含量的不断增多,孔隙率有一个先变小后变大的趋势,但渗透系数不断下降,因此孔喉直径对渗透系数的影响要大于孔

隙率对渗透系数的影响,因此在选用防砂配比时,应优先考虑孔喉直径的大小。在多孔介质中,并不是所有的孔隙都对流动有作用,只有相互连通的孔隙才对流体的流动有促进作用,称之为有效孔隙,有的孔隙并不相互连通,有的是相互连通的孔隙,但对流动几乎没有作用,称之为死端孔隙(图9)。

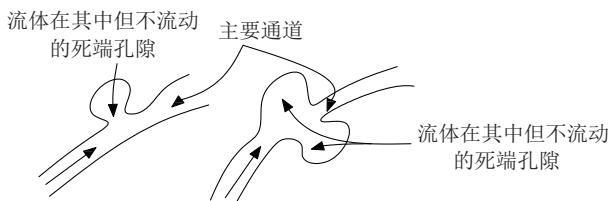


图9 死端孔隙示意^[11]

Fig.9 Schematic diagram of dead end pores

试验测出的孔隙为总孔隙率,0.355~0.6 mm粒组由于本身颗粒大,形成的孔喉大,死端孔隙较少,因此添加固结剂反而占用了流通通道降低了有效孔隙率,使得固结后渗透系数降低;粒径0.3~0.45 mm粒组,固结石英砂的总孔隙率要小于未固结的石英砂的总孔隙率,但是固结剂把无效死端孔隙占用,并未降低有效孔隙占比,因此尽管总孔隙率有所下降,但是降低了死端孔隙率,水流不需充填死端孔隙直接从有效孔隙中流动,反而对流速起到促进作用。因此固结石英砂的渗透性反而要大于未固结的石英砂。因此在考虑使用普通砾石充填还是贴砾过滤器进行防砂时,如果粗砂就能起到防砂效果时,应采用普通砾石充填,在中细砂才能起到防砂效果时应考虑采用贴砾过滤器。

依托“地下咸水综合利用”项目,通过理论计算与室内外试验结合,成功实施了适用于浅层咸水综合利用的水平双面井,长距离铺设了贴砾过滤器,有效增大地层汇水面积,施工了两口水平井,其中一口水平井使用包网滤管,出水量为8 m³/h,另一口使用贴砾管,出水量为10 m³/h,水井出水量增加。

3 结论

(1)随着颗粒粒径的不断减小,石英砂和固结状态下的石英砂的渗透系数都不断地减小,在中砂(0.25~0.5 mm)范围内变化最大,在细砂(0.075~0.25 mm)范围变化较小。

(2)粒径范围确定时,随着细颗粒含量的增多,

石英砂和固结状态石英砂的孔隙率有一个先减小后增大的趋势,渗透系数不断地减小。

(3)粒径及细颗粒含量相同时,试验所选用的石英砂在粗砂范围内,石英砂的渗透性能要优于固结状态的石英砂,在中细砂范围内,固结状态的石英砂的渗透性能要优于石英砂。由此,建议使用砾石充填类防砂方式的工程中,遇到使用30~50目的粗砂即可达到防砂效果的地层时,从增大产能的角度出发,筛管加砾石充填比贴砾过滤器具有更高的渗透系数。遇到需要使用粒径30~50目的中细砂才能达到防砂效果的地层时,使用贴砾过滤器比筛管加砾石充填的方式渗透系数高。

参考文献(References):

- [1] 张育芾.西德SBFKK型贴砾滤水管[J].水文地质工程地质,1980(4):54.
ZHANG Yuxiang. West Germany SBFKK type pre-packed screen pipes [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1980(4):54.
- [2] 赵玉杰.也浅析贴砾滤水管[J].工程勘察,1987(5):53-54.
ZHAO Yujie. An analysis of the pre-packed screen pipes [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1987(5):53-54.
- [3] 左克谦,黄自培,邵俊琪.贴砾滤水管[J].探矿工程,1980(3):21-22.
ZUO Keqian, HUANG Zipei, SHAO Junqi. Pre-packed screen pipes[J]. Exploration Engineering, 1980(3):21-22.
- [4] 孙振源,杨炳灿,郭俊贤.贴砾滤水管使用新途径——贴砾滤水管在地热深井中使用成功[J].水文地质工程地质,1997(3):55-58.
SUN Zhenyuan, YANG Bingcan, GUO Junxian. A new way of the use of pebble-lined filter pipe: The successful application of pebble-lined filter pipe in geothermal well[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1997(3):55-58.
- [5] 李哲新.使用贴砾滤水管修复涌砂井[J].水文地质工程地质,1992(4):57-59.
LI Zhixin. Restoration of sand gushing wells using pre-packed screen pipes [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1992(4):57-59.
- [6] 高爱军,那又春.运用贴砾滤水管新技术修复涌砂井[J].纯碱工业,1999(4):43-46.
GAO Aijun, NA Youchun. Restoration of sand gushing wells using new technology of pre-packed screen pipes[J]. Soda Industry, 1999(4):43-46.
- [7] 李炳平,张京城.塑料贴砾滤水管的研制与应用[J].探矿工程,1997(3):50-52.
LI Bingping, ZHANG Jingcheng. Development and use of pre-packed plastic screen pipes [J]. Exploration Engineering, 1997(3):50-52.
- [8] 李炳平,解伟,李小杰,等.陶粒贴砾过滤器的研制与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(8):7-10.
LI Bingping, XIE Wei, LI Xiaojie, et al. Development of porcelain granule pre coated well screen and the application [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009,36(8):7-10.
- [9] 冉德发,叶成明,张佳,等.U-PVC双层贴砾滤水管和快速连接在粉细砂地层成井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(1):117-119.
RAN Defa, YE Chengming, ZHANG Jia, et al. Application of double-layer U-PVC pre-packed pipes and quick connection for well completion in fine silt sand formation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007,34(1):117-119.
- [10] 叶成明,李炳平,李小杰,等.水平井在地下水开采中的应用研究[C]//第十六届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流年会论文集,2011:224-232.
YE Chengming, LI Bingping, LI Xiaojie, et al. The application of horizontal well technology in groundwater exploitation [C]//Proceedings of the 16th National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Technology Academic Exchange Annual Conference, 2011:224-232.
- [11] 魏民,陈桦.反冲型贴砾过滤器:CN201738372U[P].2011-02-09.
WEI Min, CHEN Hua. Recoil type gravel filter: CN201738372U [P]. 2011-02-09.
- [12] J·贝尔.李竞生,陈崇希译.多孔介质流体动力学[M].北京:中国建筑工业出版社,1983:30-34.
J·Bell. Dynamics of Fluids in Porous Media [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1983:30-34.
- [13] 刘勇,赵燕容.砂土渗透系数影响因素试验研究[J].江苏建筑,2017,12(5):88-90.
LIU Yong, ZHAO Yanrong. Experimental study on influence factors of permeability coefficients of sand soil [J]. Jiangsu Construction, 2017,12(5):88-90.
- [14] 刘一飞,郑东生,杨兵,等.粒径及级配特性对土体渗透系数影响的细观模拟[J].岩土力学,2019,40(1):403-412.
LIU Yifei, ZHENG Dongsheng, YANG Bing, et al. Microscopic simulation of influence of particle size and gradation on permeability coefficient of soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019,40(1):403-412.
- [15] 范孔岳.核桃壳贴砾滤水管及其在土壤改良水平定向孔中的应用研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015.
FAN Kongyue. Walnut shell filter tube and its application research of soil improvement in horizontal directional hole [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [16] 张萌.贴砾过滤防砂效果实验研究[D].北京:中国地质大学(北京),2018.
ZHANG Meng. Experimental study on sand control effect of pasted gravel [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [17] 何计彬,余莉,叶成明,等.基于气井防砂砾石粒径构成特征的砾石堆积孔隙直径分析[J].科学技术与工程,2018,18(14):116-120.
HE Jibin, YU Li, YE Chengming, et al. Analysis of gravel accumulation pore diameter based on gravel composition characteristics of sand control in gas well [J]. Science Technology and Engineering, 2018,18(14):116-120.

(编辑 王文)