

新疆某引水隧洞上游穿河富水洞段突涌水治理研究

黄兴喜

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司地质勘察分公司

DOI:10.12238/hwr.v9i2.6075

[摘要] 在新疆的一项引调水工程中,长隧道施工需穿越具有高压富水特征的不良地质段,该段包含穿越河流、活动断层以及发育有断层和张裂隙的硬岩地层。隧道施工过程中频繁遭遇突涌水问题,导致斜支洞和主洞先后被淹没。为有效治理突涌水,工程采用了地表帷幕灌浆技术,并结合洞内堵水措施,如钻孔泄压分流、预留止浆岩盘、止浆墙以及底板加盖重等超前预注浆技术,辅以系统的径向注浆堵水处理。这些综合措施为类似高压富水破碎地层的突涌水治理提供了宝贵的参考。

[关键词] 活动断层; 高压富水; 张裂隙; 突涌水

中图分类号: TD742 文献标识码: A

Study on the management of surge water in the upstream water-rich hole section of a diversion tunnel in Xinjiang through a river

Xingxi Huang

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] In a water diversion and transfer project in Xinjiang, the long tunnel construction needed to cross an adverse geological section characterized by high pressure and water enrichment, which included crossing rivers, active faults, and hard-rock strata with faults and tensile fissures. During the tunnel construction, the tunnel frequently encountered water surges, which led to the flooding of the inclined branch hole and the main hole successively. In order to effectively control the surge of water, the project adopted the surface curtain grouting technology, and combined with the cave water plugging measures, such as drilling pressure relief and diversion, reserved grouting rock plate, grouting wall, and the bottom plate plus cover weight and other over the pre-grouting technology, supplemented by a systematic radial grouting to plug the water treatment. These comprehensive measures provide valuable references for the management of surge water in similar high-pressure water-rich fractured formations.

[Key words] active fault; high pressure rich water; fissure; water gushing

引言

在实施超长水工隧洞的引调水工程中,内部涌水被视作一种频发的地质灾害。隧道内部发生涌水可能会引发设施的淹没、工程进度的延迟,以及在极端情况下可能导致严重的人员伤亡。对于深度和长度均较大的隧道,由于穿越多种复杂且特殊的地质、地貌及构造,遭遇涌水的风险显著增加。在本工程中,隧洞穿越活动断层以及河流,且在断层和张节理发育段,隧道涌水问题尤为突出。在预测方面,采用地震波法物探来探测构造,并结合激发极化法进行探水,以及超前地质钻探和地质分析进行预测。在治理措施方面,先后实施了地表帷幕灌浆、洞内堵水采用钻孔泄压分流+预留止浆岩盘、止浆墙、底板加盖重等超前预注,以及系统的径向注浆堵水处理技术相结合的治理措施。这些堵漏灌浆措施效果显著,对于确保隧道施工安全、防止可能导致隧

道进一步损害的安全事故发生,以及为同类工程的堵漏灌浆提供了一定的参考价值。

1 工程概况

在新疆某引水隧洞工程中,斜支洞进口位于主洞左侧,斜支洞长1.5km。施工采用传统钻爆法,从主洞交叉口向上、下游掘进。主洞全长约8km,纵坡比为1/2583,埋深在163至205m之间,上游长约3km,下游长约5km。该隧洞工程主要的工程地质问题是上游穿河段的连续突涌水问题。

2 基本地质条件

上游穿河段地表位于宽缓的河谷。谷底河床宽1.0km,心滩、漫滩发育,主河道位于河床北侧,宽40至160m。河流总体方向在洞线附近呈倒转的“V”型,河段及其附近最低侵蚀面是附近唯一的地表水。河流两侧为河漫滩或Ⅰ至Ⅱ级阶地。地表岩性主

要为第四系松散砂卵砾石夹砂土层,厚4.8至36.4m。下覆为中石炭凝灰质砂岩、块状玄武岩、玻屑晶屑凝灰岩等。玻屑晶屑凝灰岩属坚硬岩,玄武岩和凝灰质砂岩为中硬岩。

该段附近规模较大的断裂为F11断裂,为逆断层位于上游穿河段约3.0至4.6km,呈北西至南东向延伸,长度大于170km,属区域性压性断裂,破碎带宽约100至150m,断裂断错了河流II阶地下部的晚更新世湖相厚砂层,该断裂属第四纪晚更新世(Q₃)早、中期活断层。

根据平硐地质编录揭示,该段隧洞上游穿河段沿线还发育有12条次级断层,走向NW或SE,多倾向南,倾角以60至80°陡倾为主,断层破碎带宽一般0.05至0.3m,只有1条宽1.5m,断层带内主要为碎裂岩、角砾岩和糜棱岩,该段受乌伦古河断裂影响,断裂两侧岩体内还发育NE或NW向张性节理,以60~80°陡倾为主,节理张开宽度一般0.5~6mm,局部张开14~20mm,基本无充填或充填岩屑,主以走向NNW,向南陡倾为主。

上游穿河段围岩分类统计,总长度2958.0米,IIIa类围岩长1968.8米,约占46.6%。IIIb类的长度935.0米,约占28.3%,IV类的116.2米,约占3.9%。

3 隧道涌水成因及涌水特点

该段地下水类型主要为第四系孔隙潜水和基岩裂隙水。第四系孔隙潜水主要位于河谷覆盖层内,受河水和大气降水补给,以地下径流形式向下游排泄。基岩裂隙水可分为壳状基岩裂隙水和构造破碎脉状基岩裂隙水^[1]。壳状基岩裂隙水赋存于表层节理较发育的风化岩体内,一般随风化带呈壳状分布,其下部,岩体完整,属微弱透水性,基岩裂隙水贫乏。构造裂隙水分布在断层破碎带或张性节理内,受构造控制,沿构造呈线状分布,主要接受第四系孔隙潜水补给,沿构造带向深部下渗。上游段经过数十次的突涌水,水压大,水量大,主要渗漏通道为断层及张裂隙组合形成的通道,裂隙连通性较强。上游段经过数次较大涌水见图1。

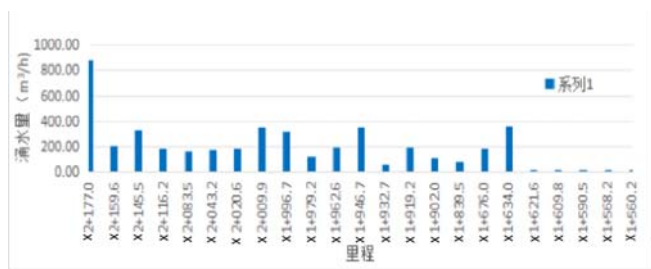


图1 上游历次出水量较大统计表

4 地表帷幕灌浆治理

X2+177突涌水经过:2018年年底隧洞开挖至X0+184.7~X0+177段左侧边顶拱主受断层f₁₂影响出现塌方现象,塌方高度1.5~5m,断层f₁₂为凝灰质砂岩和玻屑晶屑凝灰岩的断层接触带,在桩号X2+177处处理塌方时,出现再次塌方并涌水,初始水量约800~900m³/h,稳定出水量约550~650m³/h,当时由于各方对于洞内涌水量没有准确估计导致前期洞内抽排能力不足,因无处排水,主、支洞被淹,洞内已达到静水平衡,洞外无储水空间,

考虑到最终涌水量无法预测,强排有可能造成渗漏通道增大,涌水量增大,导致裂隙封堵难度增加,堵水风险加大,因此参建各方共同商议决定采用地面灌浆堵水方案,已开挖段隧洞及支洞被淹没停工约一年,随即当年冬天展开补充勘察工作及地表帷幕灌浆工作及利用弃渣场修建蓄水池工程^[2]。前期勘察穿河段隧洞共布4个取芯钻孔和1个水文孔,隧洞X2+177突涌水后,2018年10月~2019年3月补充勘察增加了5个勘探钻孔。2021年初S5竖井勘察,增加了1个勘探钻孔。穿河段隧洞共有11个勘探钻孔。

4.1 灌浆钻孔布置:地表灌浆工程在桩号X2+169~X2+190段的地表及隧洞塌方掌子面附近布置51个灌浆孔,间、排距2.5~3m,采用三面围封、顶部悬挂加固的方式进行灌浆处理。三面围封灌浆孔深度至洞底以下15m。顶部悬挂孔孔底高程按照距洞顶10m控制。合计钻孔长度约为9826m,灌浆段长度2221m。灌浆平面布置及立面图见图2、图3。

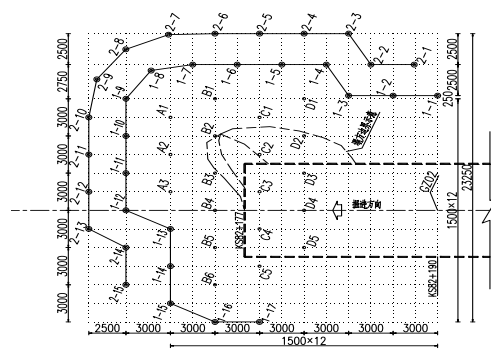


图2 地表灌浆平面布置图

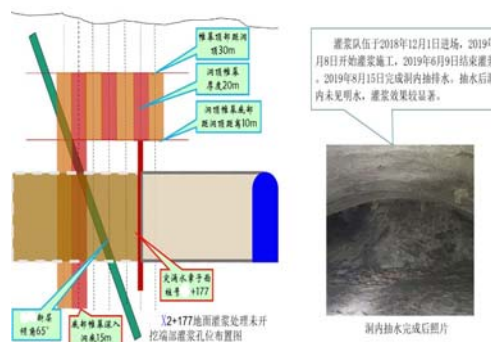


图3 地表灌浆剖面布置图

先内圈、后外圈先悬挂孔、后悬挂底孔,灌浆工作分两序按序加密的原则自上而下分段进行。主洞桩号X2+177上游侧和东西两侧布置地面灌浆,共51个灌浆孔,间排距2.5~3.0m,灌浆孔单孔深164.4~206.9m,总进尺接近10000m,从洞顶以上31.4m开始灌浆(埋深143.6m),单孔灌浆长度63.3~20.8m,灌浆段总长2221.4m,灌浆段高程位于580.7~644.6m之间。

4.2 灌浆材料:主要灌浆水泥采用42.5低碱中抗水泥。外加剂:①对于漏失量比较大张性裂缝采用砂、绿豆、锯末等凝结核、填充增强材料;②速凝剂:水玻璃、氯化钙、三乙醇胺;③减水剂:木质素磺酸盐类减水剂、萘系高效减水剂、聚羧酸类

高效减水剂等。④稳定剂: 膨润土及其他高塑性粘土。

4.3 灌浆工艺。灌浆压力: 保持平稳, 灌浆压力提升采用分级升压法。开灌后吸浆量大、不回浆, 可不加压, 利用浆柱自压灌浆, 在回浆及吸浆量减小后再分级升压。对悬挂孔底部帷幕灌浆时, 灌浆压力值0.3~0.5MPa, 对悬挂孔其他段的灌浆压力0.5~1.0MPa; 对内圈灌浆孔位灌浆, 洞顶帷幕高程601~620m灌浆压力值取0.5~1.0MPa; 对其他灌浆段灌浆压力采用0.5~1.5MPa。水泥浆液水灰比采用5、3、2、1、0.7、0.5六级, 细水泥浆液水灰比可采用3、2、1、0.5四级, 灌注时由稀至浓逐级变换。当钻进时不反水或简易压水试验显示透水率较大时, 可采用2:1水灰比开灌。特殊地质条件比如大裂隙漏失严重, 可采用稳定浆液、膏状浆液、中粗砂、绿豆、锯末等凝结核、填充增强材料进行灌注。其浆液成分、配比以及灌注方法应根据室内浆材试验和现场灌浆试验确定^[3]。水灰比为0.5的新鲜水泥浆液置换孔内稀浆或积水, 采用全孔灌浆封孔法封孔。封孔灌浆压力可采用全孔段平均灌浆压力或2MPa; 封孔灌浆时间可为1h。

4.4 灌浆质量检查。地面灌浆效果评价主要通过洞内试抽排水反映出来的水量减少程度进行评价。2019年9月2日, 2标主洞上游已清淤至约桩号X2+200.5处, 距上游掌子面(X2+177)约3m, 剩余段淤积层厚度约4.7m, 淤积顶面距洞顶约2.5m, 淤积物主要为地面灌浆耗材—水泥、砂子、膨润土等, 表层形成硬壳, 下部结构松散, 塌方堆积体外围部分已被清除。目前掌子面上部岩体及洞顶块石塌方体仅存在少量渗水、滴水, 下部淤积物底部有少量渗水, 证明灌浆效果良好。灌浆完毕抽排X2+177掌子面照片见图4。



图4 地表灌浆结束洞内抽水完成后照片

5 超前帷幕注浆及系统径向灌浆

主洞段的超前X2+177地表灌浆处理以后, 根据超前地质预报及探水孔探水情况进行超前注浆后进行开挖(掌子面前方区域), 开挖后有局部出水点时应及时进行封堵, 并跟进系统固结灌浆, 使洞周形成6m范围固结灌浆圈(开挖后区域)。对于施工前施工方先对掌子面浇筑止浆墙, 然后进行超前堵水灌浆, 采取循环预留止浆岩墙的预留10m。该段施工时经超前堵水后隧洞内出水量较小, 经调整后的排水规模满足要求且该段隧洞出水量可控, 施工方在后续施工时采取先施做探水孔, 循环预留止浆岩墙, 根据探水孔出水情况来确定是否进行超前堵水灌浆的方式进行开挖施工。超前灌浆原则: ①对于集中涌水量 $\geq 200\text{m}^3/\text{h}$ 洞段: 超前灌浆每段长度25m, 掌子面全断面布置3环预注浆钻孔及3环周边孔, 其最外环次外环和内环钻孔与隧洞轴线成 $5.8^\circ\sim 12.8^\circ$ 夹角, 钻孔孔长的水平投影长为25m; 而周边的加密钻孔与隧洞走向成 $19.4^\circ\sim 59.7^\circ$ 夹角, 钻孔孔长的水平投影长为 $3.2\sim 14\text{m}$; ②对于集中涌水量为 $100\sim 200\text{m}^3/\text{h}$ 洞段仅进行最外环及1周边加密钻孔布置, 布置型式同集中涌水量 $\geq 200\text{m}^3/\text{h}$ 洞段; ③对于对集中涌水量 $< 100\text{m}^3/\text{h}$ 的洞段仅进行局部超前灌浆^[4]。

5.1 典型超前堵水灌浆段。①X2+172.9~X2+152.9段洞内灌浆: 洞内清淤及对塌腔处理后实际掌子面桩号为X2+172.9, 掌子面有7处线状流水或小股状水, 总水量约 $40\text{m}^3/\text{h}$, 为防止后续爆破开挖击穿帷幕, 决定对掌子面先进行超前灌浆^[5]。



图5 止浆墙第一层浇筑完成后照片



图6 止浆墙浇筑完成后照片

止浆墙浇筑完成后, 施工方对掌子面X2+172.9~X2+152.9段进行全段面超前固结及堵水灌浆。灌浆孔孔径为 $\Phi 76\text{mm}$, 每循环长度20m, 超前全断面灌浆孔每循环设7环注浆孔, 共64孔, 孔长1090m。



图7 桩号X2+172.9探水钻孔出水照片



图8 堵水完整开挖后掌子面照片



图9 X2+159.6掌子面 堵水前照片



图10 桩号X2+159.6注浆完成 开挖后照片

2019年9月15日对桩号X2+172.9掌子面左侧灌浆孔钻孔至7~12m时出水, 估算最大水量 $340\text{m}^3/\text{h}$ 。堵水完成开挖揭露后, 掌子面无水, 堵水灌浆孔内可见浆液留存凝固, 堵水效果较明显^[6]。

②桩号X2+159.5~X2+139.5段洞内堵水灌浆: X2+172.9掌子面灌浆后, 开挖至X2+159.5处探水时孔内出现涌水, 估算约 $210\text{m}^3/\text{h}$, 随后, 施工方对掌子面X2+159.5~X2+139.5段进行全断面超前固结及堵水灌浆。灌浆孔孔径为 $\Phi 90\text{mm}$, 每循环长度20m, 超前全断面灌浆孔每循环设3环注浆孔, 共22孔, 孔长455m。桩号X2+159.5~X2+139.5段洞内堵水灌浆前后情况对比:

从堵水开挖后照片可以看出, 掌子面水量减少较明显, 堵水灌浆孔内可见浆液留存凝固, 堵水效果较明显。勘探试验洞桩号X2+145.5~X2+125.5段洞内堵水灌浆。

③桩号X2+145.5~X2+125.5段洞内堵水灌浆方案同X2+159.5~X2+139.5段洞内堵水灌浆, 堵水灌浆前后情况对比见下图:



图11 X2+145.5掌子面 堵水前照片



图12 桩号X2+145.5注浆完成 开挖后照片

X2+159.5掌子面灌浆后, 开挖至X2+145.5处探水时孔内出现涌水, 估算约 $330\text{m}^3/\text{h}$, 随后, 施工方对掌子面X2+145.5~X2+125.5段进行局部超前堵水灌浆, 从堵水开挖后照片可以看出, 掌子面干燥无水, 堵水灌浆孔内可见浆液留存凝固, 堵水效果较明显。

5.2 X1+946.7~X2+043段超前帷幕灌浆和系统径向灌浆结合。该系统灌浆段隧洞桩号范围为X1+946.7~X2+043, 长度96.3m, 本次堵水灌浆将隧洞径向系统灌浆及超前帷幕灌浆和堵水灌浆相结合, 由于X1+946.7~X2+043段掌子面、边顶拱及底板围岩裂隙较为发育, 出水点较多, 且出水点间连通性较好首先对掌子面及部分边墙施作止浆墙进行封闭, 然后进行X1+946.7~X2+043段底板盖重混凝土施工、边顶拱加强初期支护, 为防止灌浆过程中漏浆、串浆现象, 掌子面止浆墙浇筑完成后, 对X1+946.7~

X2+043段范围内底板施作盖重混凝土,在原盖重混凝土基础上再次浇筑盖重混凝土,新浇筑的盖重混凝土平均厚度1.0m。混凝土浇筑前,设置了双层钢筋,并安装 $\Phi 80\text{mm}$ 灌浆管。新浇筑盖重混凝土底板盖重混凝土及止浆墙处理完成后,对掌子面附近21m范围内边墙及顶拱进行加强喷护施作^[7]。在原有的喷护基础上,重新挂网、施作锚杆,并喷射混凝土,混凝土厚度约15cm。

对桩号X1+946.7起始段及桩号X2+043各设3排封闭环灌浆孔,孔深8~10m,孔间排距1.5m,剩余段采用系统灌浆封堵渗水通道,灌浆孔间排距1.5m,孔深6m。该段灌浆孔均沿断面环形、断面图详见图14同一环钻孔分两序施工,先施工I序孔,后施工II序孔,灌浆采用全孔一次灌浆法,灌浆方式采用纯压式灌浆方法^[8]。灌浆布置见图14、现场照片见图15、16、17、18、19。

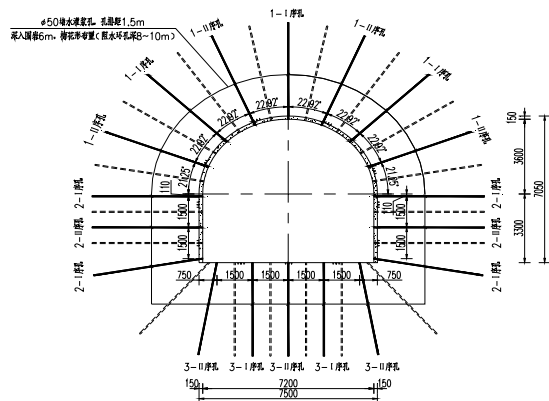


图13 系统径向灌浆钻孔布置图



图14 系统径向灌浆照片



图15 掌子面止浆墙浇筑照片



图16 边墙止浆墙浇筑照片



图17 第一次底板盖重混凝土及引水管施工前照片



图18 第二次底板盖重混凝土及引水管施工前照片

开挖至桩号X1+946.7时超前钻孔探水表明掌子面前方有较大的股状涌水,随即停止掘进。在前期对掌子面附近线状股状出水点堵水灌浆和对掌子面前方进行超前堵水灌浆过程中,上游洞内排水量持续增加,由初期约 $550\text{m}^3/\text{h}$ 逐渐增加至 $1370\text{m}^3/\text{h}$,后经更换施工队伍和施工方案,采取掌子面全断面超前堵水灌浆和桩号X1+951~X2+043已开挖洞段全洞周系统堵水灌浆后,于2022年1月底上游洞内排水量降至 $280\text{m}^3/\text{h}$ 。

6 特殊情况处理

6.1 钻孔遇水出水处理。若钻孔过程中遇小流量微压出水,则继续钻进至目标孔深后进行注浆;若钻孔过程中遇高压涌水($\geq 10\text{m}^3/\text{h}$),则停止钻进并进行注浆封堵,封堵完成之后再继续钻进,如此反复,直至达到目标孔深^[9]。

6.2 出水孔注浆处理。小涌水孔处理方法:采用纯压式注浆法,同时提高注浆压力(设计压力 $(1.0\sim 2.0)\text{MPa}$),注浆结束后

进行闭浆待凝,待凝时间不少于8h。大涌水孔处理方法:大涌水孔应测记涌水量与压力,直接使用特种堵水注浆材料灌注至结束标准,之后旁边扫孔使用纯水泥浆灌注至结束标准。

6.3注浆中断处理。注浆工作应连续进行,若因故中断,必须马上处理,尽早恢复注浆。如被迫中断时间超过30min,则应进行钻孔冲洗;如冲洗无效,则应扫孔。恢复注浆时应使用水灰质量比3:1(无水孔、小水孔)或0.5:1(股状水)的水泥浆进行灌注,若注入率为中断前的90%及以上,应逐级加浓浆液继续灌注;若注入率为中断前的70%~90%,可采用中断前注浆水灰质量比的水泥浆继续灌注;若注入率小于中断前的70%,且在短时间内停止吸浆,则该段注浆应视为不合格,需要重新扫孔、洗孔后复灌^[10]。

6.4串浆、冒浆、漏浆处理。注浆过程中发现冒浆、漏浆时,应根据具体情况及时采用嵌缝、表面封堵、低压、浓浆、限流、限量、间歇、待凝等方法进行处理。若漏水或漏稀浆时可继续灌注;若漏浓浆则应降低注浆压力,直至漏浆停止,然后逐渐升压至原来注浆压力后继续灌注。若降压无效再变浓浆液灌注;若降压和变浓均无效,且漏浆量接近注入量,应停止灌注进行待凝,待凝时间不少于8h;若恢复注浆后吸浆量接近于零或停止吸浆,此段应作为不合格孔段,需视情况进行处理。注浆过程中发生串浆时,若串浆孔具备注浆条件,可进行并联注浆,但并联注浆孔不宜多于3个,否则应塞住串浆孔,待注浆孔注浆结束后,再在串浆孔旁边扫孔、冲洗,而后继续钻进或注浆^[11]。

6.5钻孔漏水的处理。钻孔过程中遇卡钻不能成孔,或遇岩脉及影响带导致钻进循环水漏失而不能继续钻孔时,可先进行注浆加固处理,而后旁边钻孔进行深部注浆。

6.6大耗浆孔段处理。为保证注浆质量,无水孔和小水孔宜先采用纯水泥浆进行灌注。若单孔灌注量达到 1.2m^3 ,流量、压力均无明显变化时,应待终凝至少8h后扫孔复注。若单孔注浆次数达到3次,压力、流量仍无明显变化,则应改用特种堵水注浆材料进行灌注,结束后再用纯水泥浆复注,直至达到结束标准^[12]。

7 结论与建议

新疆某引水隧洞上游穿河段工程钻爆施工段遭遇裂隙水压高、流量大的不良地质,为正常施工带来了巨大的困难。针对上述问题,预测方面,采用地震波法物探来探测构造,并结合激化极化法进行探水,以及超前地质钻探和地质分析进行预测,本文提出了洞内堵水采用钻孔泄压分流+预留止浆岩盘、止浆墙、底板加盖重等超前预注,以及系统的径向注浆堵水处理技术相结合的治理措施的,实现了对高压富水裂隙渗流出水的有效封堵。通过在本工程的注浆封堵实践,表明该技术具有良好的封堵效果,值得推广应用。

【参考文献】

- [1]孙振川.高压富水隧洞硬岩地层径向注浆堵水施工技术及应用[J].隧道建设(中英文),2017,37(11):1455-1461.
- [2]喻久康,童蕾,严俊,等.深埋长隧洞穿越富水断层带涌水突泥风险预判与处理措施研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(S2):371-378.
- [3]宾胜利.某隧道涌水原因分析及综合处治方案研究[J].北方交通,2023(12):88-91.
- [4]水工建筑物水泥灌浆施工技术规范:DL/T5148-2012[S].2012.
- [5]易举.对GB50108《地下工程防水技术规范》探讨[C]//全国第十七届防水材料技术交流会论文集,2015:79-81.
- [6]水工建筑物水泥化学复合灌浆施工规范:SL/T802-2020[S].
- [7]水工混凝土施工规范:DL/T5144-2001[S].
- [8]水利水电工程地质勘察规范(试行):SDJ14-1978[S].
- [9]水利水电工程钻探规程:SL291-2003[S].
- [10]水电水利工程高压喷射灌浆技术规范:DL/T5200-2019[S].
- [11]水工建筑物水泥化学复合灌浆施工规范:SL/T802-2020[S].
- [12]水泥基灌浆材料应用技术规范:GB/T50448-2008[S].

作者简介:

黄兴喜(1981--),男,汉族,江苏徐州人,高级工程师,从事水利水电工程地质及水文地质工作研究。