

TBM 掘进技术的发展应用及相关工程地质问题探讨

隆 威¹, 尹俊涛¹, 刘永正², 吴煜宇¹

(1. 中南大学 地学与环境工程学院 湖南 长沙 410083 ; 2. 云南官房地基基础有限公司 云南 昆明 650224)

摘 要 阐述了 TBM(隧道掘进机)半个世纪以来的发展及其在国内外隧道建设中的应用,指出优先采用 TBM 掘进技术进行隧道开挖已成为未来隧道建设总的发展趋势,并在分析大量国内外工程实例的基础上,结合 TBM 施工中的经验及教训,对 TBM 掘进过程中存在的诸如断层破碎带、挤压地层、地下水、岩溶等相关工程地质问题进行了探讨,并提出了相应的处理措施。

关键词 TBM ;隧道 ;掘进 ;工程地质问题 ;不良地质条件

中图分类号 :U455.4 文献标识码 :A 文章编号 :1672-7428(2005)02-0055-05

The Development & Application of TBM , and Discussion of Correlated Engineering Geological Problems/LONG Wei¹ , YIN Jun-tao¹ , LIU Yong-zheng² , WU Yu-yu¹ (1. Central South University , Changsha Hunan 410083 , China ; 2. Yunnan Guanfang Foundation Limited Company , Kunming Yunnan 650224 , China)

Abstract : This paper expounded the development and application in tunnel construction all over the world of TBM in the past half a century , pointed out that excavating tunnel by TBM has become the developmental direction of tunnel construction in the future. On the base of analysis of a great deal engineering example , combining the experience and lessons obtained in TBM construction , the authors discussed correlated engineering geological problems existing in excavation , such as fault fractured zones , compressional stratum , groundwater and karst etc. . At the same time , the corresponding counter-measures particularly for reference were introduced.

Key words : TBM ; tunnel ; tunneling ; engineering geological problems ; poor geological condition

1851 年 ,美国工程师 Charles Wilson 设计了世界上第一台可连续掘进的隧道掘进机(Tunnel Boring Machine ,TBM) ,但由于设计存在难以克服的滚刀问题 ,使之难以与当时刚诞生的钻爆法相媲美 ,无用武之地 ;1956 年 ,美国的 James. Robbins 仿照一百年前 Charles Wilson 的设计 ,只采用滚刀 ,解决了第一台 TBM 的刀具问题 ,获得了成功^[1]。从此 ,TBM 得到了广泛的推广与应用。

由于 TBM 广泛利用监测、遥控、电子信息技术等对施工过程进行全面制导和监控 ,使掘进过程始终处于最佳状态 ,因此相对于传统钻爆法具有高效、快速、优质、安全等优点 ,其掘进速度一般是传统钻爆法的 4 ~ 10 倍。此外 ,采用 TBM 掘进还有利于环境保护和节省劳动力 ,提高施工效率 ,整体上比较经济。^[2]

TBM 的不足之处在于 :对不良工程地质条件的适应性较差 ,不如传统钻爆法灵活 ,前期的一次性投入费用较大 ,对施工人员的素质要求较高。

总的说来 ,TBM 掘进技术体现了计算机、新材

料、自动化、信息化、系统科学、管理科学等高新技术的综合和密集 ,在一定程度上反映了一个国家的综合实力与科技水平。^[3]

1 TBM 掘进技术的发展与应用

随着科学技术的发展与进步 ,TBM 的类型不断增多。以围岩地质条件划分 ,有硬岩 TBM、软岩 TBM 以及软硬岩兼容 TBM ;以开挖直径划分 ,有微型 TBM(250 ~ 3000 mm)、中型 TBM(3000 ~ 8000 mm)和巨型 TBM(> 8000 mm) ;以护盾形式划分 ,有敞开式 TBM、双护盾或多护盾式 TBM、盾构 TBM 等。同时 ,TBM 的适用范围也不断扩大 ,从松散软土、淤泥 ,到极坚硬的岩石都可应用 ,而且还能适用于一些较为复杂的地质条件。

经过半个世纪的发展 ,TBM 掘进技术已相当成熟 ,被广泛应用于世界各国能源、交通、水利、国防等部门的地下工程建设。

一般情况下 ,当隧洞长度 > 6 km 或长径比 > 600 时 ,宜优先采用 TBM 进行开挖 ;不过 ,近几年这

收稿日期 2004 - 06 - 28

作者简介 隆威(1962 -) ,男(汉族) ,重庆丰都人 ,中南大学勘察与基础工程研究所所长、教授 ,从事地质工程、岩土工程专业的教学、科研及工程设计等方面的工作 ,湖南省长沙市岳麓山(0731)8897029 ;尹俊涛(1979 -) ,男(汉族) ,河南开封人 ,中南大学硕士在读 ,地质工程专业 ,研究方向为岩土工程设计与施工 ,yjtwtu2000@sina.com.cn。

一传统观念已被工程实践所突破,在西方发达国家,不少 3 km 左右的隧洞已开始采用 TBM 进行开挖。例如英国伦敦希斯洛机场的艾赛德路双管隧道,内径 8.1 m,长度仅 1.3 km,就采用一台 $\varnothing 9.2$ m 土压平衡式盾构 TBM 开挖。

据不完全统计,截止到 2000 年年底,世界上长度 >10 km 的隧道已超过 100 条,世界隧道总长度已远远超过 10000 km。近几年的隧道工程建设中,有 30%~40% 是采用 TBM 进行开挖的。^[4]

1.1 TBM 在国外的发展与应用

20 世纪 50 年代以来,TBM 掘进技术在世界各国得到了广泛的应用。国外已经建成的采用 TBM 掘进技术施工的著名大型隧道工程有英吉利海峡隧道、日本东京湾海底隧道、荷兰生态绿心隧道等。

1.1.1 英吉利海峡隧道

连接英国和法国的英吉利海峡隧道由 3 条平行排列的隧道组成,全长约 148 km,是目前世界上最长的海底隧道。其中 2 条交通隧道分别长 49.33 km 和 49.36 km,成洞直径 7.6 m;一条服务隧道长 49.32 km,成洞直径 4.8 m;平均海底掘进 37.88 km,主要穿越地层为白垩纪泥灰岩。该工程承包商从国外引进了 11 台 TBM 用于隧道开挖,仅用了 3 年半就完成了掘进任务,并于 1994 年 5 月 7 日正式通车。其中一台 Robbins TBM 创造了当时最佳月成洞 1719.1 m 的世界纪录。^[5]

1.1.2 日本东京湾海底隧道

日本东京湾高速公路工程跨越东京湾,把东京都与千叶县连在一起。该工程包括 2 条长约 10 km 的海底隧道,一座 5 km 长的桥梁和 2 个人工岛,其中海底隧道是该工程最为重要的部分,设计直径为 13.9 m,建于海面以下约 60 m 深的软岩中。为了适应大深度、高水压的施工条件,该隧道采用了 8 台高压泥浆式盾构 TBM 进行开挖,开挖直径为 14.14 m。该工程于 1997 年年底完工。

1.1.3 荷兰生态绿心隧道

荷兰生态绿心隧道位于阿姆斯特丹到布鲁塞尔高速铁路 TGV 沿线,把阿姆斯特丹—鹿特丹高速轨道线连接起来,全长 7.176 km,设计直径 13.30 m,总投资 4.31 亿美元,由法国 Bouygues 公司和荷兰 Koop Holding Europe 公司联合进行建设,采用法国 NFM 制造的“震旦号”泥水盾构 TBM(图 1)进行开挖。该 TBM 总长 120 m,总功率 9540 kW,质量 3520 t,推力达到 184300 kN,开挖直径 14.87 m,是目前世界上开挖直径最大的 TBM。该隧道于 2001

年 11 月 2 日正式开始掘进,主要穿越泥炭土、粘土和饱和砂层土等地层,计划推进速率为 9~12 m/天,实际推进速率为 12~16 m/天,最高月进尺 616 m,于 2004 年 1 月 17 日提前贯通。

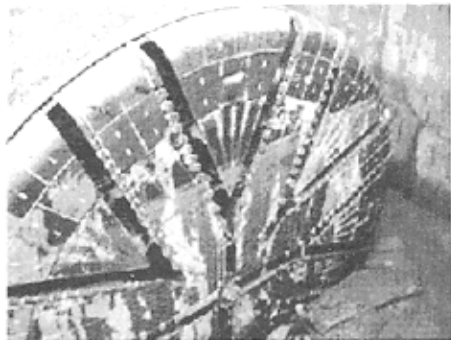


图 1 目前世界上开挖直径最大的“震旦号”TBM 刀盘

“绿心隧道”将阿姆斯特丹与鹿特丹之间的距离缩短为 30 min,安特卫普和布鲁塞尔在阿姆斯特丹和巴黎之间的旅行时间也减少到 2 h,该隧道将于 2007 年 4 月正式开放运营。

1.2 TBM 在我国的发展与应用

1964 年经周恩来总理批准,在国家科委的领导下,我国成立了 TBM 攻关小组,于 1966 年生产出我国第一台 $\varnothing 3.4$ m 的 TBM,并在杭州人防工程中做过试验,70 年代进入工业性试验阶段,80 年代进入实用性阶段,曾研制出 8 台 TBM,先后在云南西洱河水电站、福建龙门滩、青岛引黄济青等工程中使用。由于我国研制的 TBM 与国外相比差距太大,掘进速度仅是当时国际水平的 1/5~1/10,显示不出优越性。因此,我国研制的 TBM 基本上被闲置。

20 世纪 90 年代以来,意大利 CMC 公司、德国 Zublin 公司等国外承包商先后在引大入秦、万家寨引黄工程、掌鸠河引水供水工程等大型水利工程中从国外引进先进的 TBM 进行隧道开挖,取得了很大成功,1996 年,我国铁道部门从德国 Wirth 公司引进 2 台 TB880E 型敞开式硬岩 TBM 用于秦岭隧道的开挖,并取得了成功。

1.2.1 引大入秦工程

引大入秦工程是将大通河水引入秦王川的大型跨流域调水工程,总干渠全长 86.9 km,其中隧洞 33 座,总长 75.11 km。1988 年 9 月,意大利 CMC 公司采用 TBM 掘进技术进行隧洞开挖在该工程 30A 号和 38 号隧洞国际招标中中标。30A 号隧洞全长 11.649 km,成洞直径 4.80 m,隧洞埋深 51~330 m,采用美国 Robbins 双护盾式 TBM 进行开挖,1991 年 1 月正式开始掘进,1992 年 1 月贯通,平均月进尺

1000 m,最高月进尺 1300.8 m,最高日进尺 65.5 m;38 号隧洞全长 4.948 km,开挖直径 5.54 m,1992 年 4 月正式开始掘进,1992 年 8 月贯通,仅用了 4.5 个月就完成了掘进任务,平均月进尺 1100 m,最高月进尺 1408 m,最高日进尺 75.20 m。

1.2.2 万家寨引黄工程

万家寨引黄工程是以地下工程为主的引水工程,从黄河万家寨水利枢纽取水,将水东调,经总干线、南干线和北干线分别向太原、大同、平朔 3 个能源基地供水。引水线路总长 314 km,跨越 5 个地质单元,穿过太古界、古生界、中生界直至新生界几乎所有的地层,埋深一般 100~300 m,地质条件比较复杂。其中总干线 6、7、8 号隧洞总长约 21 km,成洞直径 5.46 m,1994 年 7 月开始掘进,1997 年 9 月贯通,平均月进尺 900 m,南干线 4、5、6、7 号隧洞总长约 90 km,采用 4 台 $\varnothing 4.88$ m 双护盾 TBM 同时掘进,其中一台 Robbins TBM 创造了月进尺 1860 m 的新世界纪录,联接段 7 号隧洞总长 13.52 km,成洞直径 4.14 m,采用 Robbins 双护盾 TBM 进行开挖,2000 年 12 月正式开始掘进,2002 年 9 月贯通,平均月进尺 1400 m,并于 2001 年 3 月 21 日创造了日进尺 113.21 m 的世界纪录。

1.2.3 掌鸠河引水供水工程

掌鸠河引水供水工程是为满足昆明市可持续发展的需要,解决昆明市近期和中远期的城市供水问题而决定兴建的大型水利工程,输水线路总长 97.258 km,其中隧洞 16 座,总长 85.655 km。上公山隧洞是其中最长的一条,全长 13.769 km,设计直径 3.00 m,穿越地层主要为板岩、砂岩和灰岩,由意大利 CMC 公司采用 Robbins 双护盾 TBM 进行开挖。该隧洞于 2003 年 4 月正式开始掘进,截止到 2003 年 12 月底,已掘进 3.337 km,平均月进尺 426 m,最高月进尺 771.72 m,最高日进尺 64.90 m,计划于 2005 年年底贯通。

1.2.4 秦岭隧道工程

秦岭隧道工程是西安至安康铁路线上的咽喉工程,包括 2 条平行的单线隧道,其中 I 线隧道全长 18.460 km,II 线隧道全长 18.456 km,是我国目前最长的铁路隧道。2 条隧道间距 30 m,最大埋深约 1600 m,主要穿越地层为花岗岩和片麻岩。铁道部门从德国 Wirth 公司引进 2 台 TB880E 型敞开式硬岩 TBM 用于该隧道施工,2 台 TBM 分别从南北两个进口进行开挖,开挖直径为 8.8 m。南口于 1998 年 3 月正式开挖,1999 年 8 月贯通,平均月进尺 334.5

m,最高月进尺 509 m,最高日进尺 35.2 m;北口于 1998 年 1 月正式开挖,1999 年 8 月贯通,平均月进尺 276 m,最高月进尺 402 m,最高日进尺 36 m。

2 TBM 相关工程地质问题及处理措施

由于 TBM 设备庞大,对地质条件的适应性不如钻爆法灵活,如果在没有预警的情况下遇到不良地质条件,往往会导致掘进速度缓慢、效率低下、工期拖延,甚至有可能带来灾难性的严重后果。我国昆明掌鸠河引水供水工程、山西万家寨引黄工程、台湾平林公路隧道,以及荷兰南部的西斯凯尔特河隧道等,在 TBM 通过不良地质地段时均发生了诸如突水、塌方、卡机等工程事故,威胁着施工人员及机械设备的安 全,并造成长时间的停机处理。因此,为了避免类似事故的发生,必须根据 TBM 自身特点及不良地质条件的具体情况及时采取相应的处理措施,以保证 TBM 安全、顺利地通过不良地质地段。

2.1 断层破碎带

断层破碎带是绝大部分隧道工程都不可避免地要遇到的不良地质条件,如何安全、顺利地通过断层破碎带是隧道工程取得成功的关键,往往会成为影响工期的重要因素。

TBM 在断层破碎带掘进时,经常会出现围岩松动、坍塌等工程问题,如果处理不当,甚至有可能导致卡机事故的发生,严重地影响工期。例如,在掌鸠河引水供水工程上公山隧洞的掘进中,2003 年 10 月 23 日在桩号 2+627.777 m 处遇到一压扭性断层,掌子面出现大塌方,被迫停机进行处理,在掌子面处对围岩进行灌浆(聚氨酯泡沫)。由于大量塌落的围岩将刀盘卡死(图 2),再加上灌浆工艺出现了一些问题,最终导致 TBM 被困长达 26 天之久。



图 2 TBM 刀盘被大量塌落的围岩卡死

为了使 TBM 能够安全、顺利地通过断层破碎带,在 TBM 通过断层破碎带之前,一定要充分利用地表踏勘、勘探以及洞内超前钻探等地质资料对断

层破碎带的位置、规模作出比较准确的预测,并采取相应的处理措施。

(1)如果断层破碎带的规模较小,则可以不予处理,采用低转速、小行程、快速掘进的方法直接掘进通过,尽可能不要停机(停机可能会导致卡机事故的发生)。

(2)如果断层破碎带的规模较大,直接掘进无法通过时,可以先对破碎带进行预处理(如注浆预加固等),然后再进行掘进,缓慢通过。

(3)对于更大规模的断层破碎带,采用以上方法均无法通过时,则可以从旁边人工开挖支洞,对断层破碎带地段采用常规法进行开挖,待开挖完毕后,TBM 在空载状态下直接步进通过。

2.2 挤压地层

挤压地层是一个需要十分关注的影响 TBM 正常掘进的重要因素之一,隧洞的快速收敛经常会导致混凝土管片衬砌的变形、破损(图 3),严重时还会导致卡机事故的发生(图 4)。近年来关于隧洞快速收敛变形导致卡机事故的报道也屡见不鲜。例如:委内瑞拉的 Yacambu 隧道,由于围岩快速收敛变形(每分钟达到 20 cm),致使 TBM 无法正常掘进而被迫停机长达数月;荷兰南部的西斯凯尔特河隧道,由于在掘进过程中遇到挤压地层,两台德国海瑞克 TBM 被困在含海绿石的砂层中;此外,在我国山西

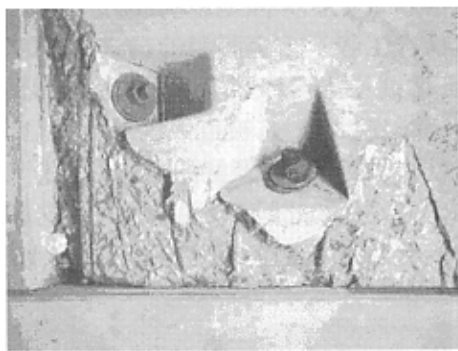


图3 隧洞快速收敛导致管片变形、破损



图4 隧洞快速收敛导致 TBM 被困

万家寨引黄工程施工中也发生了由于隧道快速收敛变形而导致 TBM 长时间被困的工程事故^[6]。

为了避免卡机等类似工程事故的发生,当 TBM 在挤压地层中掘进时可以采取以下处理措施。

(1)对于大多数 TBM,可以适当地进行超挖,把盾壳与开挖面之间的间隙从通常的 6~10 cm 调整到 15~25 cm,给围岩提供一定的变形空间。

(2)对于护盾式 TBM,可以适当提高辅助液压缸的推力,必要时可采用高压拉缸,使 TBM 快速地通过挤压地层。

2.3 地下水

当隧洞位于区域地下水位线以下时,地下水将会对掘进过程产生不良影响。掘进过程中的突水经常会导致围岩失稳、坍塌,甚至淹没隧洞,危及洞内施工人员及设备的安全,给施工带来严重影响。例如越南中部的海文隧道,由于洞内施工过程中发生突水(涌水量达 90 L/s),被迫停机近 2 个星期;云南昆明上公山隧洞 TBM 掘进过程中也发生了由于突水而被迫停机的工程事故。

对于掘进过程中的突水,可以采取以下措施进行处理。

(1)如果涌水量不大,可以利用 TBM 自身携带的排水设备,变被动排水为主动排水,保证排水系统畅通的情况下,TBM 继续掘进。

(2)对于涌水量较大的情况,可以利用超前钻探设备钻取排水孔进行排水,并适当地增加排水设备以提高排水能力;也可以采用围岩注浆的方法将地下水封堵在围岩内部。

2.4 岩溶

由于 TBM 采用全断面掘进,机身将开挖断面完全封堵,只能进不能退,因此,当 TBM 在岩溶发育地区掘进时,溶洞的处理就成为 TBM 掘进中较难解决的问题之一。如果处理不当,常会造成管片整体下沉、接缝张开、错台严重等工程问题,甚至会导致机头下沉、陷落等恶性事故的发生。例如在危地马拉 Rio Chixoy 水电站引水隧洞的掘进过程中,一台 TBM 被埋在溶洞里,造成很大的经济损失。

尽管 TBM 操作系统的有关参数在遇到溶洞时会显示出不正常,但为了确保施工安全,避免 TBM 机头下沉、陷落等恶性事故的发生,在 TBM 掘进前应利用超前钻探、地质雷达等设备对前方地段进行超前地质预报,初步查明溶洞的分布、规模及充填情况。

在掘进过程中,当 TBM 掘进至溶洞边缘时,施

工技术人员可以通过检修孔查明溶洞的发育情况,并根据查明的具体情况采取相应的处理措施。

(1)对于已停止发育且规模较小的溶洞,一般不会对 TBM 掘进造成大的影响,可以不予处理,直接掘进通过,待 TBM 通过后,通过管片回填孔对溶洞回填豆砾石,并进行固结灌浆加固。

(2)对于位于隧洞下方规模较大的溶洞,如果被充填,可以先进行超前注浆加固,然后进行掘进,待 TBM 通过后,通过管片回填孔对溶洞段进行后期高压固结灌浆,如果溶洞无充填或仅部分充填,则可以先利用豆砾石、砌石、混凝土等材料进行回填并压浆加固,然后进行掘进,待 TBM 通过后,对溶洞段进行后期高压固结灌浆。

(3)对于位于隧洞上方规模较大的溶洞,如果被充填,可利用 TBM 自身携带的超前钻探设备和灌浆设备对溶洞进行全洞周超前注浆处理(防止 TBM 经过时溶洞充填物塌落),然后进行掘进,待 TBM 通过后,通过管片回填孔对溶洞段进行高压固结灌浆并施设锚杆,如果溶洞无充填或仅部分充填,则可以采用锚杆加槽钢的半环形钢支撑,并利用豆砾石、砌石、混凝土等材料进行回填并压浆加固。

2.5 膨胀岩

膨胀岩具有膨胀、崩解、软化等一系列不良工程特性,在 TBM 掘进过程中,如果处理不当,常会造成隧洞变形、撑靴反力不足、围岩坍塌,甚至导致刀盘被卡等工程事故。

为了使 TBM 能够顺利地通过膨胀岩地段,在施工过程中一定要做好防水止渗工作,要特别注意衬砌管片接缝宽度的控制和止水条安装的质量,避免洞内施工用水和膨胀岩中的水相互渗透,防止围岩崩解、软化,此外,还要对隧洞开挖断面进行适量扩挖,给膨胀岩预留一定的变形空间。

2.6 有害气体

由于石炭系地层常常含有 CO_2 、 N_2 、 CH_4 等有害气体,严重地威胁着洞内施工人员的健康和生命安全。因此,当 TBM 在石炭系地层中掘进时,一定要

注意加强洞内通风,同时还要在 TBM 上安装有害气体检测仪,加强对瓦斯等有害气体的监测,并制定严格的防火措施,以确保施工安全。

3 结语

TBM 掘进技术是目前世界上最为先进的隧道开挖方法,相对于传统钻爆法具有明显的快速、优质、安全、经济、环保等优点,尽管存在对于诸如断层破碎带、挤压地层、岩溶等不良地质条件适应性较差的缺点,但只要给予足够的重视,利用各种地质资料和超前地质预报成果,对遇到的困难作出充分的估计,并采取相应的处理措施,就能够安全、顺利地通过不良地质地段。

随着世界经济的快速发展以及各国之间经济、文化交流的进一步加强,大规模地修建跨越高山、海底的长大深埋隧道已势在必行。目前国外拟建的大型隧道项目有:联接日本和韩国长约 120 km 的日韩海底隧道,联接亚洲和美洲长约 74.8 km 的白令海峡隧道,从 Rosenheim 到 Verona 穿越阿尔卑斯山脉总长大于 500 km 的铁路隧道等,其中绝大部分隧道将优先采用 TBM 进行开挖。

总之,TBM 掘进技术在未来的地下工程建设中将会得到更为广泛的应用,优先采用 TBM 掘进技术进行隧道开挖已成为未来隧道建设总的发展趋势。

参考文献:

- [1] 王淑新. TBM 掘进技术的发展与展望[J]. 工作研究, 2003, (9): 46-48.
- [2] 张镜剑. TBM 的应用及其有关问题与展望[J]. 岩石力学与工程学报, 1999 (3): 363-367.
- [3] 傅冰骏. 建立隧道掘进机产业,促进我国地下空间开发[J]. 探矿工程, 2001 (2): 1-2.
- [4] 王占生,王梦恕,等. TBM 在不良地质地段的安全通过技术[J]. 中国安全科学学报, 2002 (4): 55-59.
- [5] 徐书林,傅冰骏. 推广应用隧道掘进机,促进我国地下空间开发[J]. 建筑机械, 2002 (5): 36-39.
- [6] 尚彦军,王思敬,等. 万家寨引黄工程泥灰岩段隧洞岩石掘进机(TBM)卡机事故工程地质分析和事故处理[J]. 工程地质学报, 2002 (3): 293-298.

(上接第 54 页)

2.8 施工方法设想

在水泥浆封固孔壁时,在封孔钻杆底部钻几个小孔,焊上几束钢丝,边注入水泥浆边转动,以使孔内坍塌、缩径物质与水泥充分拌合,使封固更有效,关键是要速度快,以防水泥浆初凝而造成封孔钻杆提不动。 万方数据

3 结语

通过该矿区的钻探施工,我们相应地使用了多种钻探工艺,特别是水泥浆封固孔壁、硬质合金钻头下套管、膨润土固相冲洗液金刚石钻进等施工方法的使用,收到了良好的效果。使整个矿区的施工快速顺利地结束,圆满地达到了项目地质技术要求。