



Research
Tunnel Engineering—Article

米德湖 3 号取水口

Jon Hurt^{a,*}, Claudio Cimiotti^b

^a Arup Group Limited, New York, NY 10005, USA

^b S.A. Healy Company, Salini Impregilo Group, Las Vegas, NV 89074, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 April 2017

Revised 19 August 2017

Accepted 22 September 2017

Available online 29 November 2017

关键词

水下隧道

隧道掘进机开挖

取水口

摘要

在美国西南部持续干旱的作用下，为了维持拉斯维加斯山谷既有水容量，南内华达水资源管理局在米德湖中新建了一个深水取水口（3号取水口）。本项目包括一口185 m深的竖井、十分困难的地质条件下4.7 km的隧道以及沉没式取水口海事工程。本文介绍设计和施工过程中积累的经验以及为解决隧道开挖过程中遇到的困难而采取的创新性解决方案，隧道开挖采用双模式泥浆隧道掘进机（TBM），压力高达15 bar（1 bar=10⁵ Pa）。其中特别介绍了掘进机开挖过程中克服的主要挑战，包括作业模式、开挖面支撑压力、预注浆和维护；取水口的施工，涉及用锥形炸药爆破的水下竖井开挖；创造性地建设1200 t以上的混凝土-钢取水建筑物；取水建筑物在水下竖井中的就位；与混合式掘进机开挖的取水隧道的对接。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

近期新建的米德湖3号取水口项目包括一条在高达15 bar（1 bar=10⁵ Pa）水压下用双模式泥浆隧道掘进机（TBM）开挖的水下隧道。米德湖3号取水口项目[1]还包括沉没式取水建筑物、隧道出入井[2]以及与既有取水口和水处理设施的接口。

长期干旱导致米德湖水位不断降低，催生了新建取水口的需求。米德湖是美国蓄水量最大的水库，距内华达州拉斯维加斯约40 km。米德湖长180 km，由胡佛水坝拦截而成，充满水时其水面面积为640 km²，最大蓄水量为32 km³。但1983年以来，受干旱与需水量增加的综合因素影响，米德湖未达到蓄满水的最大容量。米德湖的补给水源来自科罗拉多河，是美国最大的人工水库。米德湖与鲍威尔湖服务于7个州的2500万人口，包

括拉斯维加斯和凤凰城的居民。

美国西南部的长期干旱造成米德湖水资源紧张，目前米德湖的蓄水量仅为满库容的42%左右。1983年达到满库容时，米德湖水位达到平均海平面以上（AMSL）373 m。2016年6月，其水位达到327 m（1072 ft）。米德湖中的南内华达水资源管理局（SNWA）取水口是拉斯维加斯的主要水源。当水位太低以至于既有1号和2号取水口无法使用时，可通过米德湖3号取水口取水。

项目位置如图1所示，这三个取水口的最终布置如图2所示。干旱对米德湖产生的影响如图3所示。

2008年3月，SNWA授予拉斯维加斯隧道建设公司（VTC）（Salini-Impregilo S.p.A 与 S.A. Healy 公司组成的联营体）一份价值4.47亿美元的设计-建造合同，根据该合同，VTC承担本工程主要地下部分的工作。在Brierley联合公司的支持下，Arup集团有限公司成为

* Corresponding author.

E-mail address: jon.hurt@arup.com (J. Hurt).

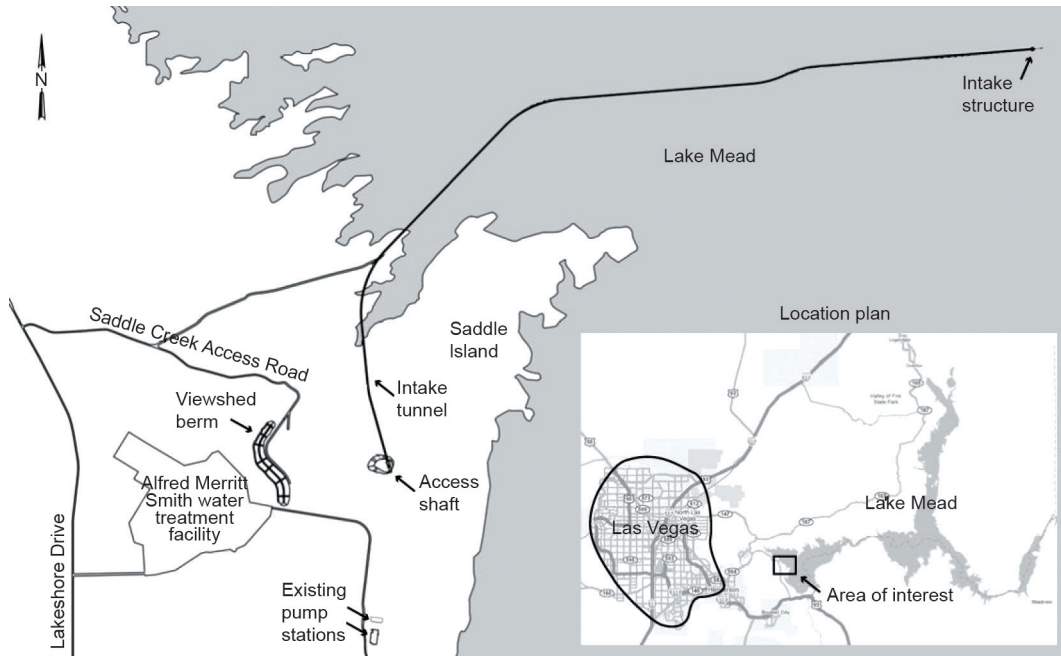


图1. 项目位置与布置。

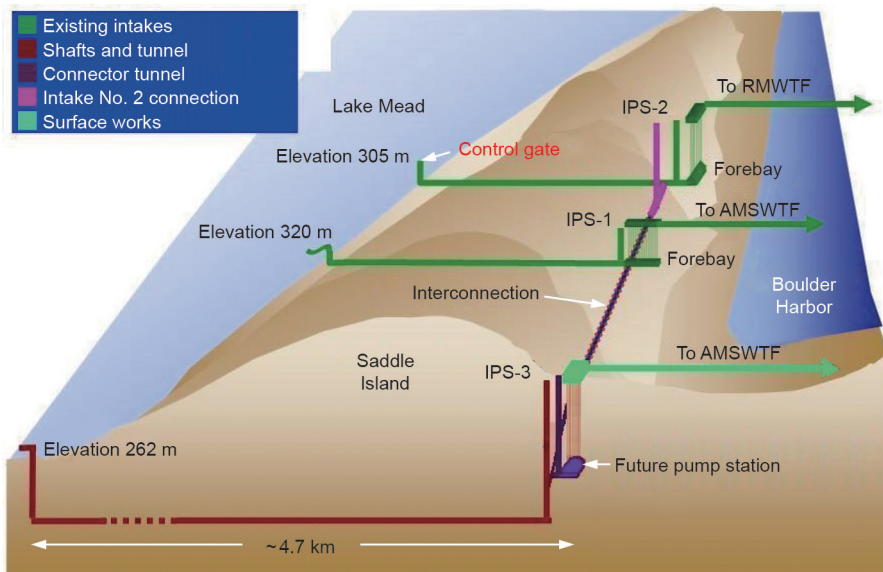


图2. 取水口位置及与SNWA水处理设施（RMWTF和AMSWTF）的接口。IPS：取水泵井。

VTC的设计工程单位。该设计-建造合同包含185 m深的隧道出入井，长4.7 km、直径为6.1 m的隧道和沉浸式取水建筑物。额外的地下合同涉及竖井和连接隧道开挖与泵站施工，是整个项目的组成部分。

下文介绍本项目面对的最具挑战性的问题。

2. 采购

鉴于本合同的独特性质，SNWA审查了采购方案，

最终选用设计-建造采购方法[3]。选用此方法的主要原因是，设计-建造法可节省工期，最能够满足SNWA及时建成3号取水口的需求。此外，项目设计与设计-建造方采用的方法密切相关，这种方法让一个单一实体（即设计-建造方）承担设计和建造责任，以便设计-建造方运用创造性设计方案应对施工挑战。

采购方式分两个阶段进行筛选。进入第二阶段的投标人有机会与SNWA召开机密会议，就本项目拟采用的合同和技术方法展开建设性讨论。



图3. 米德湖实景图。前景区以前沉没于水下，从“浴缸环”可以看出原始水位。

3. 风险管理

SNWA意识到本合同涉及的风险水平较高，特别是在15 bar压力下进行密闭式隧道开挖带来的风险，决定采用积极的风险管理方法[4]。该方法在设计过程中提前识别关键问题，并对风险管理方法进行定义，包括：

- (1) 提供岩土工程基线报告（GBR）作为合同文件的一部分；
- (2) 采用《隧道工程风险管理实施规程》；
- (3) 授标时向VTC提供SNWA风险登记簿；
- (4) 要求VTC编制风险管理计划。

VTC积极参与风险管理过程，编制了风险管理计划，其中明确了责任人、沟通线路、可施工性审查和工程监控等。定期召开风险识别与审查会议。

4. 地质条件

隧道沿线地质特点为：有四大岩组（一个前寒武纪岩组和三个第三纪岩组）以及大量亚组（图4）。对这些岩组分述如下。

(1) 马鞍岛岩组（ P_c ）。隧道始于平均岩石质量指标（RQD）一般的稳定马鞍岛下板块（ P_{cl} ）变质岩，然

后穿过滑脱断层进入平均RQD不良的稳定马鞍岛上板块（ P_{cu} ）变质岩和火山岩中。滑脱断层在隧道层处的厚度为30~40 m，处于短期稳定—不稳定，可能造成严重涌水。该滑脱断层由RQD特差一差的非均质破碎角砾状变质岩和火山岩组成。马鞍岛岩组内的岩石强度达200 MPa。

(2) 泥溪岩组（ T_{mc} ）。隧道主要位于 T_{mc} （低渗透性沉积岩）内。泥溪岩组内的典型岩石强度为5~10 MPa，岩体渗透性低。 T_{mc} 细分为四个亚组：① T_{mc1} ，稳定—短期稳定泥溪石膏质泥岩；② T_{mc2} ，稳定—短期稳定泥溪粉砂岩、砂岩、泥岩和砾岩软弱互层，韧性低；③ T_{mc3} ，稳定—短期稳定泥溪砾岩，非常软弱、未胶结—胶结良好；④ T_{mc4} ，稳定—短期稳定泥溪角砾岩，硬化良好，胶结良好，节理发育良好。

(3) 红砂岩岩组（ T_{rs} ）。接近取水口时，隧道穿过 T_{rs} ， T_{rs} 为软弱、非硬化—硬化不良（土状）的不稳定角砾岩。

(4) Calville Mesa（玄武岩）岩组（ T_{cm} ）。取水建筑物和隧道末尾段位于 T_{cm} 中， T_{cm} 为稳定、块状—大块状、露出线缝的、多孔状构造及非多孔状构造Calville Mesa玄武岩。

5. 隧道施工

5.1. 双模式 TBM

本项目TBM（图5）采用单盾构机，其性能足够应对困难硬岩地质条件带来的各种挑战，如可能存在的地下水大涌水、高静水压下产生的软弱沉积岩。预计围岩渗透性强的某些洞段需要采用密闭式开挖，沉积岩渗透性弱的洞段需要采用敞开放式开挖，某些区域开挖或维护时可能需要进行预注浆。因此，VTC采购了一台能在加压和敞开放式开挖条件下运行，能在岩石、土壤及混合掌子面条件下掘进的全盾构TBM。

设计时特别注意TBM前方的超前探测和围岩加固，设计采用14个周边钻进洞口和多达30个工作面钻进

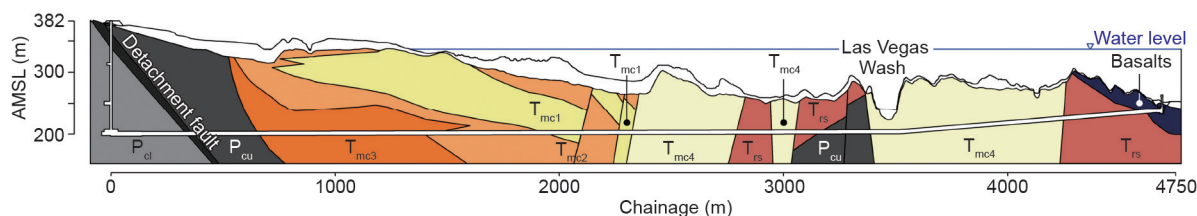


图4. 隧道地质条件。

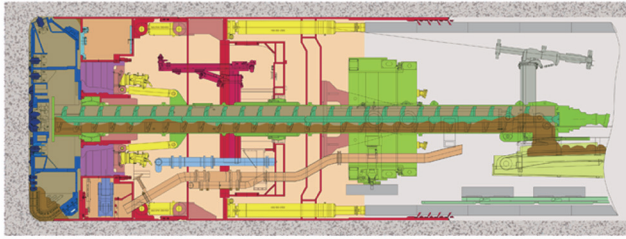


图5. TBM配置（图示为敞开模式运行）。

洞口，以便提供较全面的各种孔位。该TBM盾构内配两台永久钻机，可通过掌子面钻孔，另外一台永久钻机位于管片拼装区后面，可通过TBM外围钻孔口钻孔。同时，预留了在管片拼装机上临时安装一台钻机的条件。敞开式开挖时，可实现全方位钻孔和探测，大部分孔洞中可安装防喷器，可实现密闭式钻孔。两台灌浆装置位于后配套拖车上，配备筒仓、泵和搅拌机。

为了应对敞开式开挖时的突涌水风险，配备一台集中水平螺旋输送机而非凿岩机采用的常规输送机，用于将开挖面的渣土运出洞外。这样可使闸门在120 s内快速关闭。在岩面不稳定或地下水涌水量过大的情况下，可采用半封闭或全加压密闭式开挖，利用全密闭泥浆回路搬运开挖弃土。配备了高压设施，可在外部水压高达17 bar的条件下进入刀盘室。

密闭式作业时，该TBM在全泥浆模式下工作，利用

加压气泡控制掌子面压力。在稳定、低渗透性岩石区，可在低于外部水压的条件下进行密闭式开挖。这种密闭式开挖过程中，可通过监控回路泥浆浓度来估算地下水涌水程度。敞开式开挖时，通过水平布置的螺旋输送机输送开挖料，经管片环拼装区运至带式运输机上。

切换工作模式不需对刀盘进行改装。螺旋输送机后部卸料门关闭使开挖洞室隔离，形成一个密闭系统。启用泥浆回路前，利用液压方式使刀盘区内的螺旋输送机外壳部分缩回。

该TBM配备一台岩石破碎机和一道前闸门，前闸门在取水口前方，与泥浆系统（吸入格栅）相连。该密闭系统设管道和泵，布置在尾部齿轮上，并沿隧道、竖井延伸至地上泥浆处理设备。该TBM的主要特性如表1所示。

隧道开挖系统的设计和装备允许人员进入高压掌子面。配备氧气减压系统的备用减压舱永久设置在管片环拼装区后面。该备用减压舱足够大，允许多次减压，包括整个减压过程（如需要）。其设计允许在减压舱压力增大时使用混合气体呼吸系统（三元混合气或氮氧混合气）。为了实现在高压下长时间工作，采购了一辆班车，工作人员可乘坐该班车在气闸与出入井底部的高压住处之间通勤，但该班车从未使用过。制作了一根出入管，安装后可将备用减压舱与对接点连接起来，盾构机后部设一辆高压交通车。

表1 TBM技术资料

	Technical data
Machine type	Dual-mode mixshield
Manufacturer	Herrenknecht AG
Excavation diameter	7.22 m
Length	190 m
Total weight	1 450 t
Total power	5 750 kW
Cutterhead	Hard rock, dual mode
Cutters	17 in backloading
Total power supply to the TBM	2 800 kW
Torque	10.1 MN·m (11.7 MN·m in high-pressure mode)
Shield diameter	7.18 m
Maximum pressure	18 bar
Thrust	70 000 kN (100 000 kN in high-pressure mode)
Mucking open mode	690 t·h ⁻¹ (continuous conveyor in tunnel)
Mucking closed mode	1 100 m ³ ·h ⁻¹ , rock crusher (slurry treatment plant at portal)
Backfilling system	Mortar or two-component
Drainage system	400 m ³ ·h ⁻¹ onboard treatment plant
Probing/grouting	3 permanent drills, 1 temporary erector-mounted drill, 14 periphery positions
Drill pattern	30 face positions
Trailing gear	15 back-up gantries, closed deck, train supply

5.2. 隧道衬砌

6.1 m内径 (ID) 管片衬砌作为通用锥形环, 能够在100年设计寿命内承受17 bar的最大静水压力。每个管片环由四个长斜方形管片、一个梯形反向键和一个键组成。选用的管片长度较长, 为1.8 m, 以减少隧道内的接头数量。与1.5 m长管片相比, 1.8 m长管片可使接头总长减少12%。管片厚356 mm, 采用C40/50混凝土浇筑而成, 并按常规做法用 $52 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-2}$ (75 ksi) 钢焊接钢筋网加强。径向接缝上安装了尖头螺栓和导杆, 以提高稳定性; 环向接缝上安装了尖头螺栓和球形接头。还设置了额定压力为38 bar的三元乙丙橡胶 (EPDM) 橡胶垫片。

该管片环采用51 mm锥度, 可在16个不同的位置旋转该管片环。设置的锥度使键槽位于管片环最宽的部位, 绝对最小转弯半径为220 m。为了控制难以在外部压力下密封的十字形接缝, 尽量避免邻近环的特定方位, 最终最小半径约为275 m。

5.3. 涌水试验

为了在常压下进入工作舱, 隧道开挖面需要允许出现涌水; 因此, 要提前对涌水速率进行估算。估算方法为以0.5 bar的步长逐步降低开挖面支撑压力。每次降压后, 在使气泡舱泥浆液位保持不变的前提下, 观察泥浆管线内出水的变化情况, 由此测定涌水量的增加。一般15 ~ 20 min后可达到稳定流量条件。经过数个降压步骤 (一般为10个以上) 后, 即可建立涌水量与开挖面支撑压力之间的关系, 并外推至0 bar。采用这种方法可在常压下安全地对涌水量进行估算; 换言之, 这种方法在不用将支撑压力降至0 bar的条件下对涌水量进行估算, 从而避免了与之相关的开挖面失稳风险。

涌水试验中, 对作用于刀盘的力、扭矩 (TBM不前进时旋转刀盘所需的扭矩) 以及排水的颜色进行观测, 以及及时发现可能出现的局部失稳, 从而通过迅速使支撑压力增加至初始值来中断试验。

5.4. 在马鞍岛上板块中开挖隧道

对开挖面稳定性进行了全面评估, 以确定预期围岩条件、静水压头和渗透性的范围[5,6]。经分析, 在这些预期范围内, 隧道的大部分均位于“排水”条件与“非排水”条件之间的岩土工程条件复杂区, 无法确定将遇到较稳定的短期条件还是将遇到不良长期条件。该结论使得开挖前TBM工作方式的选择变得更加复杂。基于

预期条件的定性评价, 制定了隧道开挖计划, 其中考虑了最坏工况下的应急方案, 即对沉积岩土进行超前排水处理, 加强工作面稳定性, 使需要施加的压力减少达10 bar。

实际施工时, 最具挑战性的洞段是穿过高渗透性马鞍岛上板块地层的初始段, 此处的工作面稳定性比预计的差, 涌水量比预计的大。2011年12月27日盾构始发后, TBM在密闭模式下掘进了140 m (工作面压力高达7 bar), 然后进入该地层。TBM继续在密闭模式下工作, 压力高达13 bar。接近280 m时, 进尺速度大大降低, TBM停下来进行维护。开展了涌水试验, 以确定是否可以在常压下采取干预措施, 但当压力降至10 bar时, 涌水量就超过了 $200 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。由于用摄像头对刀盘进行检查后未发现过度磨损现象, 所以TBM继续掘进, 采用的工作面压力更大, 高达15 bar。进尺速度得到了改善, 但好景不长, 接近430 m时进尺速度又降低了。此时, 探测到TBM刀盘已受损, 所以决定对TBM进行维护。

5.5. 预注浆

隧道开挖430 m后, 探测到刀盘磨损迹象, 实施了预注浆。用超过 560 m^3 的水泥浆浇筑三层重叠顶棚[7]。

计划采用灌浆强度值 (GIN) 法在TBM前方进行地基处理[8]。根据断裂地基条件确定最大注浆压力和最大注浆量。通过刀盘得到的可用钻孔布局固定, 不够灵活, 造成施工困难。在不同阶段, 一次孔和二次孔均采用系统化注浆顺序。

在13 bar工作面压力下作业, 意味着常规钻孔和注浆程序不适用。难以控制涌水 (有压力), 钻孔完毕后难以安装封隔器。为了应对地质条件带来的挑战, 对设备进行了创造性的改进。特别是在以下方面进行了改进:

(1) 另外设计一个回流防止器安装在原回流防止器前方, 防止水和岩土进入隧道;

(2) 将钻钢的几何形状由圆肩T38改成方肩T38, 减小钻钢与回流防止器内侧橡胶之间的摩擦;

(3) 设计封隔器和使封隔器能够安装在严重断裂材料中的内部套管, 利用设计的套管可将封隔器安装在正确的位置和膨胀处而不损坏回流封隔器;

(4) 使用不同尺寸和配置的钻头;

(5) 根据破碎岩体情况, 采用不同的配合比设计, 使用波特兰水泥和超细水泥。

第三层顶棚完成之后, 尽管涌水为 $220 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, 仍

可将开挖面压力逐步降至常压条件，对关键开挖面进行维护。维护包括更换磨损的管线、阀门和泵，以及在泥浆环流管线上安装新的液压阀。

泥浆回路维护完毕后，TBM向前掘进，不稳定区则位于TBM盾构后方。然而，掘进20 m后，泥浆分离装置处的磁铁上发现一些钢碎片。为了调查这一问题，决定让TBM停止前进。将压力成功降至常压，对开挖面进行检测，检测结果显示刀盘中心部位的刀具和刀具壳受到严重损坏。经测量，涌水约为 $900 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，但岩石条件稳定；因此，开始进行检修。用小型手动工具在刀盘前方挖出一个壁龛。壁龛挖好后即对刀盘进行结构性修复。为此，不得不清除工作区的水，并建立通风，以便进行刀盘修复（图6）。TBM制造商的技术人员到现场指导修复工作。TBM中部不得不完全修复，包括滚刀壳、结构、耐磨板和刀具。

5.6. 余下的隧道掘进段

沉积岩区域的进展顺利得多，不需要超前排水来维持开挖面的稳定[9]。根据遇到的地基条件，TBM在该洞段以敞开模式和密闭模式掘进。前1615 m的开挖工作在6个月内完成，平均约 $14 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。该洞段遇到的主要挑战是皮带输送机渣土搬运问题以及刀盘阻塞问题，特别是在黏土含量高的区域，TBM在密闭模式下对开挖面施加较大的压力。经过该洞段后，对TBM进行了大修，包括更换密封系统（需要时拆除刀盘）和更换所有行星齿轮。

6. 取水口

6.1. 取水建筑物施工

除高压隧道开挖外，由于岩质和超过100 m的水深，取水建筑物的施工及其与隧道的对接也十分具有挑战性[10]。投标设计阶段，考虑布置常规钻孔竖井或干抽。该方案包括在湖床上建造一口直径5 m的钢竖管井。在竖管下方开挖隧道，然后在隧道与竖管之间进行开挖，从而实现对接。隧道到达取水口位置前，需要对地基进行改良，钻挖大直径竖井，放置竖管井并注浆。

VTC的工作队认识到该方案可能存在的风险，对其他配置和施工方法进行分析。选定的方案如图7所示，在岸边预制取水建筑物，然后用沉管技术将其放置在湖床上；该建筑物即为掘进末端TBM“对接”的位置。TBM进入取水建筑物且TBM外皮与该建筑物之间用灌浆（或冻结法）密封后，TBM可部分解体，并浇筑最终的混凝土衬砌。投标阶段设计采用钢结构；然而，授标后编制了混凝土-钢混合结构方案。

取水建筑物自身重量超过1200 t，建造时完全用岸边的一艘浮式驳船支撑。该驳船能够在建造取水口的过程中支撑其重量，还要能够在需要时将取水口下放至合适位置。取水口的下放采用安装在驳船上的大型结构钢上的钢绞绳千斤顶。取水建筑物由两段构成：高压段由混凝土制成；低压段由不锈钢制成。高压段采用55 MPa钢筋混凝土制成，为取水口的基座，形成TBM接收仓；该段的设计需能够承受仓内为常压时的外部水压。

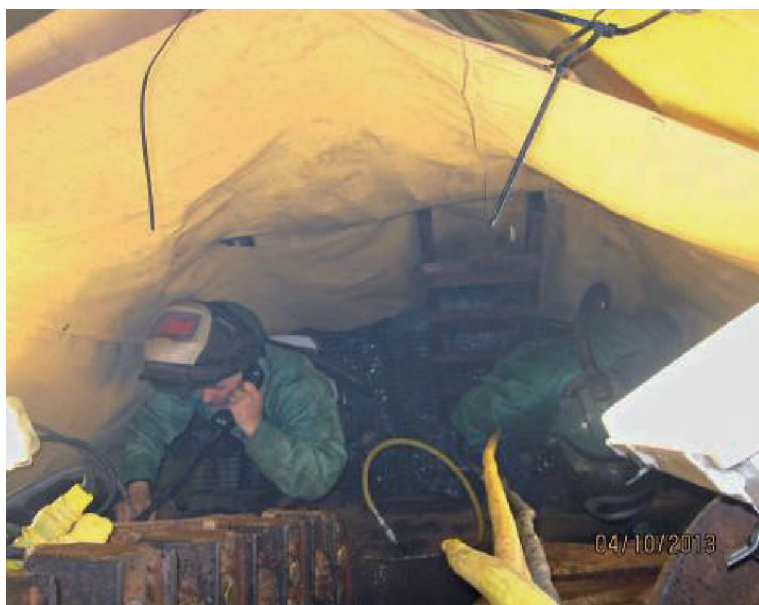


图6. 刀盘修复。



图7. 取水建筑物透视图。

上面部分为低压段，完全采用316L不锈钢制作而成。低压段由16 m全不锈钢竖管组成，该竖管由14 m长的4.8 m直径竖管+顶上约2 m高的拦污栅组成。竖管的设计厚度不均匀：前2 m与托臂预埋件相连，采用30 mm不锈钢制成，之后的5 m采用25 mm板制成，其余部分采用20 mm板制成。

取水口竖管特别采用316L不锈钢制成，以确保其满足100年设计寿命的防腐要求。取水口所处的环境对取水口材质构成两大威胁：加氯线处高浓度氯导致的腐蚀和米德湖高导电性水导致的损坏。为了确保316L不锈钢能够在这种环境下持续100年，该材料化学成分需要满足至少2.5%钼（Mo）和低碳要求。这意味着须采用316L不锈钢，并且其化学成分须规定含2.5%的钼，因为ASTM A240钢等级定义中钼含量为2%~3%。

为了完成取水建筑物的建造，取水建筑物内须安装一个堵头，以便TBM能够在不被水淹的条件下进入取水建筑物。未来，通过该堵头还可实现检测和检修时隧道的排水。为此，设计了一个堵头，其形式为带橡胶垫片的不锈钢半球形盖。制作的堵头能够安装在低压段内，并落在托臂预埋件顶上。橡胶垫片通过环氧树脂附于堵头底部，在两个对立的不锈钢表面形成密封。堵头的设计能够承受最大的压力（13.5 bar），堵头按20 bar进行试验。

6.2. 取水建筑物开挖

开挖取水建筑物所需空间是海事工程最具挑战性的方面之一。这一任务需要在米德湖湖面下100 m处共挖除近37 000 m³的材料。开挖区根据取水建筑物尺寸进行确定，并应能够满足在混凝土回填区内至少安装两个隧道衬砌环的要求。湖底材料为沙漠冲积扇、多孔状和非多孔状玄武岩以及少量黏土的混合物。

考虑多种方案后，开挖最终采用空运系统和起重机/抓斗结合形式。是否采用空运或蛤壳状挖泥器系统主要

基于材料组成，一般来说，搬运细粒材料宜用空运方式，搬运含岩石的粗粒材料宜用蛤壳状挖泥器。细粒材料易从蛤壳式铲斗中漏出，用空运方式运输大块岩石时容易阻塞。开挖料置于湖底。

遇到硬岩时，采用锥形炸药进行破碎，然后用空运或蛤壳状挖泥器清运。海洋爆破选用锥形炸药，因为锥形炸药可直接置于岩石表面进行引爆。传统爆破法需要钻孔、装药，然后爆破。锥形炸药的工作原理与射弹类似：爆炸性物质置于与垫片相连的铝壳上方，与岩面相隔充分的距离。岩面与炸药之间的空间使得引爆炸药时铝板快速熔化可产生一个金属小块。该金属小块像一颗子弹或炮弹那样高速飞进岩石。这种情况下使用气泡帷幕减小引爆炸药产生的压力波。

随着开挖的推进，有必要计算清除的开挖料的数量。为此，采用多波束声呐系统。采用的多波束声呐系统安装在专用船只上，根据施工进度每周使用一次或两次。该系统提供三维（X、Y、Z形式）坐标，可根据开工前测量与最近测量的差值计算挖填量。

6.3. 取水口就位

为了便于取水建筑物的定位，使用重型钢结构作为取水口的引导和定位框架。满足测量控制后，用自流水下浇注混凝土在框架顶部以下约0.3 m内浇筑框架。用遥控潜水器（ROV）对水下浇筑混凝土作业进行监控。浇筑混凝土后，过了几天，对框架的位置和高程进行复测，以确认位置。

框架可靠就位后，取水建筑物被拖到湖中，如图8所示。取水建筑物置于框架上方，然后用导向绳和钢绞绳千斤顶将其下放到框架上。下放作业持续了大约60 h。取水建筑物完全在底框架上就位后，对其位置和高程进行人工测量，以确认位置，然后拆除所有起吊绳和导向绳。经验证核实，取水建筑物最终位置满足设计规范规定的公差要求。北面 and 东面的最大偏差在TBM接收室的东面，差异为380 mm。将该最终位置输入TBM导向系统，对TBM线形进行少量修正。

6.4. 水下浇筑混凝土

约9200 m³混凝土在12 d的时间里一次浇筑成型。使用的混凝土小导管直径为250 mm，由两套相同的混凝土泵送和浇筑系统供料。每套系统高峰运行时可输送92 m³·h⁻¹的混凝土。泵送系统由数艘驳船（每艘搭载八辆混凝土搅拌运输车）供料。每辆混凝土搅拌运输车的



图8. 取水建筑物下放就位。

混凝土容量为 7.6 m^3 。负载驳船平均每80 min到达起重船处一次。混凝土浇筑速率为 $42 \sim 46 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，浇筑过程未中断。

底部小导管的位置由全球定位系统进行跟踪。这样可在计算机屏幕上以图形化方式对混凝土剖面进行监控。用长卷尺对混凝土最终标高进行了校核，并用多波束声呐测量法对其进行了确认。水下浇筑混凝土的更多细节（包括设计标准和配合比设计）参见参考文献[11]。

6.5. TBM 贯通

对取水建筑物进行15 m钻孔取芯，以调查玄武岩与水下浇筑混凝土之间的过渡情况，其中包括检测水下浇筑混凝土的质量和取水口“软眼”处的界面。跟预期的一样，玄武岩由于之前对取水建筑物的爆破而高度破碎。水下浇筑混凝土的质量比预期的好，钻孔取芯结果显示，水下浇筑混凝土与取水建筑物之间有明显接缝。

对TBM参数进行了调整，降低穿越水下浇筑混凝土和软眼玻璃钢的速率。该工法减少了对取水建筑物的潜在损坏。

TBM最终掘进取水建筑物的开挖压力设为9.3 bar，与理论湖水压力匹配。

开挖最后阶段对从软眼开挖的开挖料在分离装置处进行检查。取水建筑物/软眼/取水口上的混凝土事先涂上了颜色，在分离装置处看到了这种颜色，表明TBM的位置正确。然后TBM继续向前推进，直至在取水建筑物内的环形钢环处停下。安装好堵头后，缓慢排干取水仓内的水。

突破后，计划通过TBM前盾外围的注浆孔向盾构与取水建筑物之间的环形缝隙注入速凝水泥浆或与水反应的化学浆液，对其进行密封。如果此类注浆无效（即注

入过程中注浆压力未增加），则计划停止注浆作业，改用冻结方案。TBM前盾周围配备冻结夹套，能够使盾构与取水建筑物之间的环形缝隙内的积水冻结成冰。然而，对取水建筑物进行评估后发现，TBM盾构周围的分流流量低于 $1 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ，取水建筑物/堵头无漏水现象，因此，不需注浆。

除TBM与取水建筑物之间的密封很成功外，就测量和TBM对准而言，对接也取得了圆满成功，TBM位置满足 $\pm 3 \text{ mm}$ 公差要求。

取水仓完全密封后，开始用取水建筑物内的吊梁对刀盘进行解体。然后，在TBM盾构与取水建筑物预埋进口环之间焊接带阀门的钢板。在TBM盾构保持原位不动的前提下，对盾构与取水建筑物间的环形缝隙注浆，实现长期密封。然后对TBM内部进行最终解体和拆卸，该洞段的最终衬砌用喷射混凝土浇筑成型。

7. 结论

米德湖3号取水口项目的技术难度大，要求高；本项目的建成离不开Salini-Impregilo S.p.A和S.A. Healy公司、Arup集团有限公司以及SNWA的精诚合作、投入和敬业精神。实施本项目的过程中取得了许多成绩，包括TBM首次在15 bar压力下掘进。

Compliance with ethics guidelines

Jon Hurt and Claudio Cimiotti declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] McDonald J, Hurt J, Moonin E. Lake Mead Intake No. 3. In: Proceedings of the 36th ITA-AITES World Tunnel Congress: Tunnel Vision towards 2020; 2010 May 14–20; Vancouver, BC, Canada; 2010.
- [2] Hurt J, McDonald J, Sherry G, McGinn AJ, Piek L. Design and construction of Lake Mead Intake No. 3 shafts and tunnel. In: Almeraris G, Mariucci B, editors. 2009 rapid excavation and tunneling conference proceedings; 2009 Jun 14–18; Las Vegas, NV, USA. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 2009. p. 488–502.
- [3] Feroz M, Moonin EP, McDonald J. Project delivery selection for Southern Nevada's Lake Mead Intake No. 3. In: Almeraris G, Mariucci B, editors. 2009 rapid excavation and tunneling conference proceedings; 2009 Jun 14–18; Las Vegas, NV, USA. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 2009. p. 503–15.
- [4] Feroz M, Moonin EP, Grayson J. Southern Nevada Water Authority (SNWA) risk management strategy to create a win-win situation for the contractor, the insurer, and the owner on the Lake Mead Intake No. 3 (LMIN3), Las Vegas, Nevada. In: Proceedings of the 36th ITA-AITES World Tunnel Congress: Tunnel Vision towards 2020; 2010 May 14–20; Vancouver, BC, Canada; 2010.
- [5] Anagnostou G, Cantieni L, Nicola A, Ramoni M. Face stability assessment for the Lake Mead Intake No. 3 tunnel. In: Proceedings of the 36th ITA-AITES World Tunnel Congress: Tunnel Vision towards 2020; 2010 May 14–20; Van-

- couver, BC, Canada; 2010.
- [6] Anagnostou G, Cantieni L, Ramoni M, Nicola A. Lake Mead intake no. 3 tunnel: geotechnical aspects of TBM operation. In: Eckert LR, Fowler ME, Smithson Jr MF, Townsend BF, editors. *North American Tunneling 2010 proceedings*; 2010 Jun 20–23; Portland, OR, USA. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 2010. p. 125–35.
- [7] Nickerson J, Ceccato R, Bono R, Cimiotti C, Fioravanti P. Lake Mead—intake tunnel no. 3 pre-excavation grouting challenges using a high pressure slurry TBM. *Geotech News* 2014;32(3):32–8.
- [8] Lombardi G, Deere D. Grouting design and control using the GIN principle. *Int Water Power Dam Constr* 1993;15–22.
- [9] Nickerson J, Bono R, Cimiotti C, Moonin E. Lake Mead Intake No. 3—TBM tunneling at high pressures. In: Johnson MC, Oginski S, editors. *2015 rapid excavation and tunneling conference proceedings*; 2015 Jun 7–10; New Orleans, LA, USA. Englewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 2015. p. 936–46.
- [10] McDonald JA, Pireddu G, Nickerson J, Kunz W. Lake Mead underwater intake structure and tunnel connection—Lake Mead Intake No. 3 tunnel project. In: Redmond S, Romero V, editors. *2011 rapid excavation and tunneling conference proceedings*; 2011 Jun 19–22; San Francisco, CA, USA. Englewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 2011. p. 1409–26.
- [11] Nickerson J, McDonald J, Grayson J. Lake Mead Intake No. 3 tunnel intake structure and tremie concrete placement. In: DiPonio MA, Dixon C, editors. *2013 Rapid Excavation and Tunneling Conference proceedings*; 2013 Jun 23–26; Washington DC, USA. Englewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 2013. p. 1214–25.