

图2 燃气管地面悬吊保护措施

(二) 地面加固方法

地层由于受上软下硬地层慢速度掘进，地层受多次刀盘转动扰动，加之受土压及气压波动影响，导致地层较为松散，地层自稳性和气密性较差。隧道上部存在砂层及淤泥质土层，地层一旦失水，水位下降，容易引起周边管线及建构筑物沉降。同时需考虑盾构周边土体采

用常规注水泥浆加固，可能容易将盾构机包裹，引起刀盘无法转动，盾体被水泥固结无法向前移动等一系列后遗症问题，加固方法需综合考虑不利后果。

需找到一种地层加固办法，既能提高地层自稳性和气密性，加强体强度又不高，又不会导致盾构机刀盘和盾体被困，经过搅拌桩、旋喷桩、水泥浆、化学浆等多种加固方法比选，最后选择化学浆进行刀盘及盾体周边土体加固，化学浆具有以上需求功能特点，同时化学浆尤其对砂层固结效果较好，且具有较强渗透性，加固范围较大，加固半径可按0.8-1米考虑，加固效果较有保证，采用体型小、移动方便、操作简单的钻注一体机注入即可。经多次试验，不断优化化学浆液配合比，磷酸溶液浆液配比：磷酸：水=6：1，磷酸溶液：水玻璃溶液=1：1，初凝时间约为120秒，化学浆液混合凝结成有低强度果冻状，能对地层有良好渗透和固结作用。盾构周边存在围墙及地下管线，可采用避开障碍物地面斜孔注浆方式进行注浆。

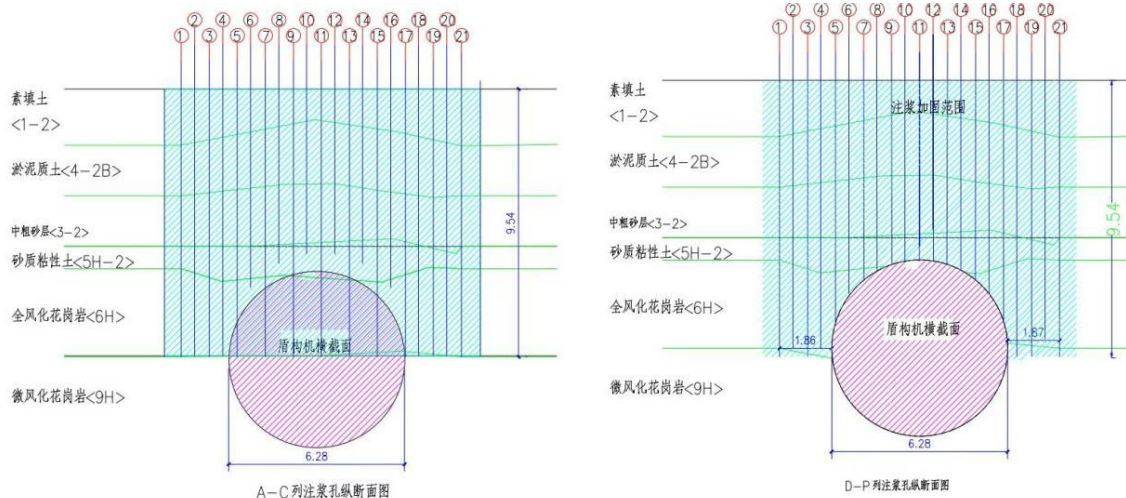


图3 化学注浆布孔剖面图

(三) 洞内加固方法

由于盾构刀盘开挖直径比盾体直径大3厘米，盾体与地层之间存在缝隙，容易形成流水通道，破坏地层及加固体，引起盾体周边掌子面地层土石剥落和坍塌情况。同时开挖过程中，局部地层可能存在松软，开挖面不可避免有超挖现象，为确保盾体周边地层和加固体安全，创新采用前、中盾体径向孔注入化学浆，利用化学浆扩散渗透和固结作用，填充地层空腔、利用与盾体结合支撑开挖面、封堵流水通道，有效阻断盾体后方来水和巩固地层加固效果。

(四) 掌子面泥膜建立

由于化学浆地层加固，不可避免可能局部存在渗透盲区，掌子面存在孤石在刀盘前方扰动地层，掌子面不规则，出现大小洞等不利情况，考虑进仓后要处理刀具和孤石，需长时间开仓，为提高开仓安全系数，确保进仓人员安全，采用衡盾泥建立泥膜，补充加强掌子面，提高地层自稳性和气密性。

在隧道内，使用剪切泵拌制A料，按A原料：水=1：2拌制，拌制时间至少15分钟，直至底部无沉底颗粒。

A料和B塑化剂利用同步注浆灌进行拌制，B液塑化剂利用喷淋管喷洒，按A料：B液=15：1（重量比）进行充分搅拌，搅拌至少10分钟。选用土仓壁2-10点多个预留孔压注衡盾泥，渣土置换压力设定为0.7-0.9bar，同时利用螺旋机排出土仓泥浆和渣土，并做好注入量与出土量相匹配，直至排出衡盾泥基本上不携带渣土为止，置换过程应保持土压力稳定。按3级加压，每级0.1bar，0.6-0.7bar，0.7-0.8bar，0.8-0.9 bar，每级稳压2小时，分级加压过程不转动刀盘，最后一级保压时，按转速0.1-0.3rpm/分，缓慢转动刀盘。最高压力稳定0.9bar，采用自然降压，过程及时补充注入衡盾泥。稳压6小时后，开启盾构保压系统，进行土仓浆气置换。

(五) 带压开仓

覆土较浅仅约6米，隧道上部临近存在大型箱涵底板埋深约2米，实际覆土仅4米左右，同时拱顶还有砂层，极不利于带压开仓，气压选择过高容易击穿地层形成泄气通道，引起地面隆起等，气压不足无法止住来水及支撑掌子面，根据理论公式计算和施工经验，结合现场实际地层情况，综合考虑各方面因素，选择开仓压力



图4 洞内剪切泵循环拌制A料



图5 A料和B料混合效果

为0.6bar，考虑带压开仓虽然压力较小，常规情况下作业人员从未遇到小压力带压开仓，为确保作业人员减压安全，还是采取分级减压方式，出仓减压时间较规范要求时间12分钟，分级减压时间延长至30分钟。

通过衡盾泥置换、分级加压、浆气置换过程中泄压时间、衡盾泥补注量记录、空压机加卸载时间、地面漏气观察等，进行仔细综合分析判断掌子面及气密性情况，确保各项工作满足开仓要求。

（六）损坏刀具拆除

带压开仓，优先更换容易拆除刀具，后拆换不易拆除刀具，由于盾构掘进上软下硬及孤石地层，由于掌子面不均匀，滚刀受力不均，容易被瞬间应力磕坏，导致滚刀偏磨，刀体变形损坏等现象，刀具无法正常拆出，需对滚刀进行局部切割，带压仓内采用动火作业，高压密闭空间带压动火作业，本身危险系数极高，行业内熟悉带压动火作业操作流程技术人员较少，迫切需要能带压切割局部刀具方法，经过各种方案比选，采用气动切割机进行仓内刀具切割，操作安全，简单，有效，可实现快速拆除刀具，避免进行复杂且风险极高的仓内动火作业。

（七）孤石处理

刀盘前方大孤石，形状不规则，在盾构推力作用下，由于周边地层松软，孤石未能有效受力破碎，会随着盾构掘进过程，一直跟随前进和损坏刀具，对刀盘和刀具破坏力较强，孤石需进行仓内处理。由于仓内作业空间狭小，孤石位于刀盘前方，孤石周边土体被扰动过，虽有地层加固，但还存在土体掉落和坍塌伤人风险，为安全起见，要求作业人员不能出刀盘区域外，需将孤石分成小块取出。

对比液压劈裂岩石、静力爆破、密布花孔等多种方法，选择速效型孤石涨裂剂爆破方法进行孤石处理，作业人员利用刀盘开口进行孤石长斜水平钻孔，特质装药设备，流体速效型孤石涨裂剂填充钻孔，封堵钻孔，待短时间内，涨裂剂起效膨胀岩体，利用葫芦分块取出孤石。

三、施工重难点

（1）周边地层含砂层、岩面起伏较大且存在孤石，布孔及地层加固质量较难保证。

为确保注浆扩散半径和地层加固效果，正式注浆前预设试验孔和检查孔，确定浆液配合比、注浆和终孔压力、流量、旋转和提升速度等相关参数，注浆顺序采用

先深后浅，先外后内原则，跳孔注浆方式，注浆扩散半径相互交圈，确保地层加固质量。

（2）掌子面条件复杂，泥膜建立难度较大。

孤石周边存在不规则被扰动土体，上软下硬地层，上部为含砂土体，下部为凹凸不平岩面，泥膜建立较困难，泥膜容易脱落。采用稠度较高泥膜，分级加压注入泥膜，让泥膜有效渗透掌子面土体，提高黏结力，同时适当转动刀盘，泥膜均匀分布，安排专人盯控关注盾构机空压机加卸载时间，确保一台空压机加载时间是卸载时间十分之一以内，确保土仓内有良好气密性，盾构机空压机应一用一备，同时隧道内应配备一台同功率应急空压机备用，并做好连接调试。

（3）刀盘前方孤石，周边裸露土体存在掉落风险，孤石强度较高处理难度较大。

孤石处理作业，考虑施工风险确保作业人员安全，要求作业人员不可爬出刀盘前方，但孤石较大，部分孤石无法触及，采用凿岩机长钻孔，静力爆破剂形成流体装，灌输入孔内，并做好封孔，等待一段时间后，岩体裂开，分块将孤石吊运取出土仓。仓内作业空间狭小，周边土体存在掉落风险，不便人员撤离，仓内作业人员必须配备安全绳，一旦出现险情必须及时撤离。

四、结论

盾构开仓存在浅覆土、含砂层、带压开仓、上软下硬、孤石处理、地面管线密集等多重不利因素叠加，采用常规地层加固及施工方法，无法保证盾构开仓及周边安全，对于盾构施工技术人员是一次前所未有的新挑战，查阅了相关各方面资料和咨询了多方面老专家，均未遇到过如此棘手问题，只能通过多种方法创新组合使用尝试解决这一工程难题。在现场各方精心组织和管理下，经历15天（其中8天地面和洞内地层加固和7天带压开仓作业）艰苦施工作业，成功高效地完成浅覆土砂层带压开仓和孤石预处理施工，较常规地面加固方法至少提前15天，盾构掌子面稳定安全，未对地面、地下管线、周边房屋造成不利影响，各方面均安全可控范围。此次施工技术新尝试，一定程度填补了盾构施工技术空白，施工方法可操作性强、施工工期短、经济合理等特点，有效解决复杂工程难题，具有较好推广应用性。

参考文献

[1]周斌.盾构开仓的重难点及解决办法[J].市政技术, 2020(6), 166-170

[2]李杨.土压平衡盾构遭遇孤石、漂石的处理方法[J].市政技术, 2022(11): 43-51

[3]朱建辉,复杂地质条件下地铁隧道盾构施工技术的研究[J].市政技术, 2021(5): 52-55

[4]刘洪亮,章邦超,郭佳,焦叶飞,张敏,土压盾构穿越上软下硬地层洞内超前注浆加固技术[J].现代隧道技术, 2022(8): 240-247

[5]胡鹰志,复杂地质条件下富水动压砂层盾构开仓加固区施工技术[J].施工技术, 2020(7): 10-13

[6]仇培云,魏鑫,戚玉亮等.孤石发育地层城市轨道交通工程盾构施工风险分析[J].广东土木与建筑, 2018, 25(8): 23-25.