

# 低预应力涨壳式中空锚杆 在大跨初支拱盖暗挖车站的应用研究

马全武 李祥东 司贤超

青岛地铁集团有限公司第一建设分公司

**摘要：**随着我国城市化进程的加快，城市轨道交通大跨暗挖工程愈来愈广泛地出现在隧道建设工程中。传统工法大多以被动支护设计为主，过分依赖拱架，对围岩的自支承能力利用不充分，常造成超挖严重、围岩大面积裸露、支护脱空等问题。为此，本文结合青岛某地铁车站隧道开挖工程，提出了基于主动支护理念的低预应力涨壳式中空锚杆支护设计方案及支护体系，通过与被动式盖拱法方案的对比分析，论证了低预应力锚杆支护为主、钢架与网喷混凝土为辅的支护设计方案的可行性。所依托工程的监测数据表明，该支护体系充分发挥围岩自承能力，针对位于中、硬岩石地层的大跨暗挖隧道具有技术及经济上的优越性。

**关键词：**大跨暗挖；拱盖法；主动支护；预应力锚杆

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.16.032

## 一、引言

目前，地铁等轨道交通已成为我国现代化城市建设的主要发展方向之一，也是新基建的重要发展领域之一。重庆、大连、厦门、青岛等城市市区基岩埋深浅，为规避常规的明挖或盖挖施工引起大量管线迁改、绿化迁移和交通拥堵等难题，城市轨道交通大跨暗挖工法的使用频率越来越高；受线路埋深及车站建筑提升高度限制，不少大跨暗挖隧洞主体结构位于上软下硬的岩石地层中，即拱顶位于强风化和中风化岩石中，拱脚位于中风化或微风化岩石中，主体结构大部分位于中风化和微风化岩石中。

传统的大跨暗挖隧洞施工工法有双侧壁导坑法、洞桩（柱）法等，但随着暗挖技术的发展，融入了拱桥、地铁盖挖顺筑法设计理念的拱盖法在青岛、重庆、贵阳等城市地铁现已大规模的采用，目前大范围采用以被动支护为主的拱盖法方案，拱盖法采用“拱桥”概念加强初期支护，即采用单层或双层的带大拱脚的初期支护结

构，通过初支拱盖将拱顶上方荷载传递到拱脚稳定的围岩上，然后在拱盖的保护下，下部岩体采用明挖基坑的开挖理念进行开挖和施作主体结构，该方法在施工上软下硬地层中的大跨度暗挖地铁车站时，能很好保证主体施工质量和控制地面沉降；下部岩体可实现快速高效施工，有利于工程建设的集约化、专业化、机械化，具有显著的社会效益和经济效益。

## 二、设计背景

青岛某地铁车站主体采用初支拱盖法开挖，车站所处场地地质自上而下主要为第四系全新统人工填土层，基岩为燕山晚期花岗岩，岩体局部节理、裂隙密集发育，局部侵入煌斑岩、花岗斑岩岩脉，受次生构造影响，部分钻孔中揭露有相应岩性的构造岩，车站范围内围岩主要以Ⅲ级、Ⅳ级和Ⅴ级为主，拱顶埋深14.9~26.15m，覆中、微风化岩11~21m，洞身基本位于微风化岩中，强度16.65~116.6MPa，属较软岩~较硬岩~坚硬岩。场区地下水主要类型为第四系孔隙水和基岩裂隙水，勘察期间该层水位埋深2.00~15.80m。不良地质为构造岩（块状碎裂岩），岩体破碎，节理、裂隙发育。该地铁车站的地质纵剖面如图1所示。

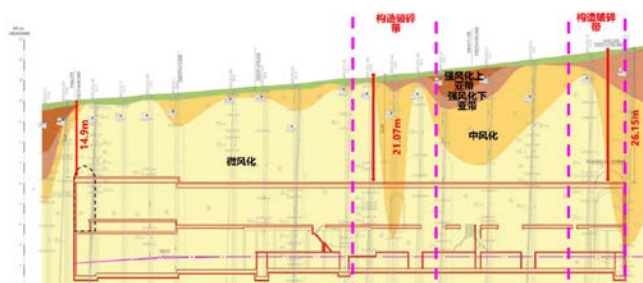


图1 车站地质纵剖面图

## 三、原支护设计方案

原设计方案采用传统双层初支拱盖法支护方案，支护参数见表1，被动支护盖拱法的衬砌断面图如图2所示。

表1 传统双层初支拱盖法支护方案

拱部	边墙	钢架间距
Φ42超前小导管 (L=3.5m@环0.4×纵2.25m) ; Φ25中空注浆锚杆 (L=3.5m@环1.2×纵0.75m) ; 第一层支护Φ8@250×250双层钢筋网; 第一层格栅钢架@0.75m; 第一层喷射300mm厚C25、P6早强混凝土; 第二层格栅钢架@0.75m; 第二层支护Φ8@250×250单层钢筋网; 第二层喷射350mm厚C25、P6早强混凝土; 防水层; 700mm厚C45、P12模筑二次衬砌	Φ25中空注浆锚杆 (拱脚下4m范围L=5m@竖1.5×纵0.75m, 其余范围L=3.5m@竖1.5×纵1.5m) ; Φ8@250×250单层钢筋网; 喷射150mm厚C25、P6早强混凝土; 防水层; 700mm厚C45、P12模筑二次衬砌	0.75m

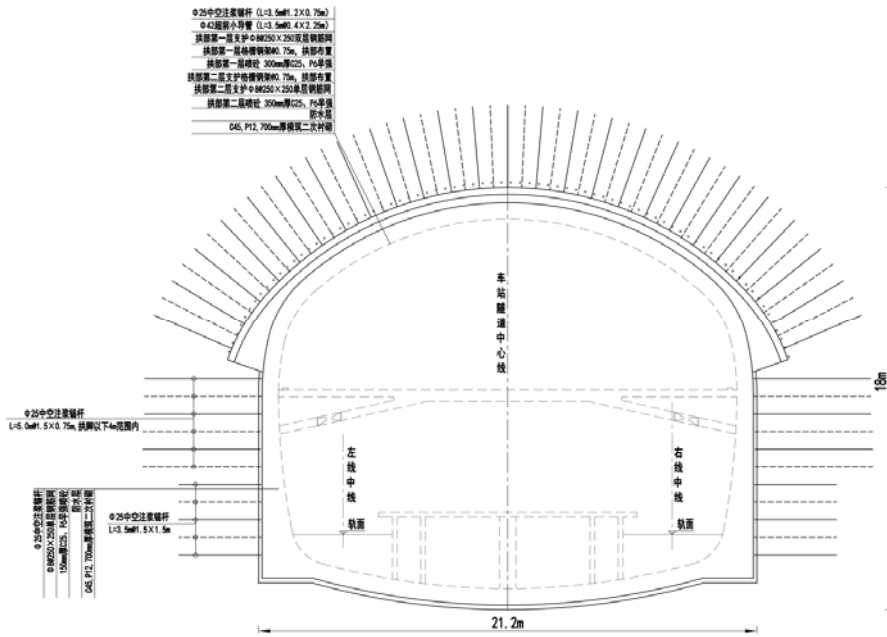


图2 被动支护拱盖法衬砌断面图

**四、原支护方案存在问题**

在以往的设计和施工过程中，发现传统被动支护的拱盖存在以下的一些问题：

**(一) 围岩自承能力认识和利用不充分**

前期工程埋深相对较浅，以围岩加固、预支护和强化初期支护为主要手段，未重视对原状围岩的保护，未充分发挥围岩自承载作用，过多依赖拱架、拱盖等被动概念的支护结构；

**(二) 地质勘查及对应的措施不够精准**

土岩界面、强风化和中、微风化界面测量精度较低，特别是对由硬变软的突变风险辨识不到位；侧重于综合围岩分级表述，忽视同一断面存在不同级别围岩和覆岩变化的情况；主要以综合围岩等级作为依据进行均质化围岩的支护设计，针对性欠缺；

**(三) 轻视锚杆支护**

普遍采用不能施加预应力的锚杆，不能对围岩早期变形起到约束作用；对锚杆的打设角度、深度、锚固安装质量控制不到位，无专业机具，施作质量差，甚至存在偷工减料情况，存在坍塌隐患；

**(四) 过分依赖拱架**

按软岩支护理念来理解和管理硬岩暗挖设计施工，格栅钢架间距过密（0.5、0.75、1.0m）、喷射混凝土厚度过厚（25、30、35cm），甚至采用双层初支，过多依赖格栅钢架作用；要求支护紧跟，与钻爆作业上挑打孔的矛盾始终未解决，导致超挖严重、工效较低；支护后无法及时回填支护与围岩间的空腔，导致围岩大面积裸露、支护脱空，存在岩块掉落隐患；

**(五) 工法有优化的空间**

采用CRD、CD等软岩开挖工法，分部开挖工序转换多，支护不能及时成环，无法发挥机械作业效率，工效极低，对围岩变形控制不利；大量使用临时支撑支护，导致浪费，工程造价高；拆撑应力体系转换存在坍塌变形风险，也导致工效降低。

**五、优化方案**

针对前述问题，研究采用可施加预应力的锚杆进行支护，有利于尽快恢复围岩开挖前的三向应力状态，使围岩形成挤压加固、组合拱作用，显著减小围岩拉应力区，并缩小塑性区范围。通过理论分析，若单根锚杆预应力施加至100kN，围岩拉应力减少已达95%以上，同时也发现更高的锚杆预应力对于围岩拉应力及塑性区的减小已无贡献，因此在中、硬岩层下采用小于100kN的低预应力锚杆，从经济性、施工工效方面考虑均为较优选择。

因此，为充分发挥围岩的自承能力，抑制围岩的早期变形，引入采用以预应力锚杆为主、钢架及网喷混凝土为辅的思路进行支护设计，为了更早的建立起控制围岩变形的支护体系，在预应力锚杆的选型上，结合涨壳式锚杆、树脂卷锚杆、摩擦性锚杆的工作特性及适用条件，并从开挖后可立即提供主动支护抗力的前提出发，优选采用低预应力涨壳式实心锚杆作为支护锚杆。低预应力涨壳式锚杆的大样图如图3所示。该锚杆由涨壳锚固件、全螺纹实心锚杆、塑料波纹管、垫板、球形注浆囊及螺母组成。其中涨壳锚头、锚杆选用高强度钢材加工而成。涨壳式注浆锚杆通过涨壳与锚杆孔内壁的挤压摩擦产生锚固力实现锚杆的精确定位，同时通过施加规定的预应力实现锚杆的张拉。通过尾部的球形注浆囊可以对锚杆进行注浆，一方面可以充填裂隙，提高围岩的稳定性；另一方面注浆后浆液可有效包裹涨壳式锚杆体，防止杆体锈蚀导致的锚杆失效。

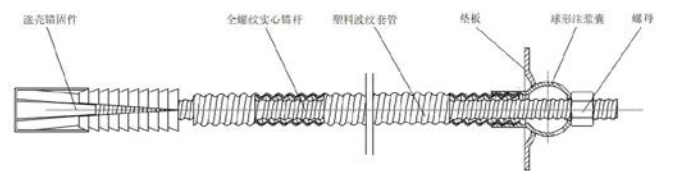


图3 低预应力涨壳式锚杆大样图

经过设计论证，采用以低预应力涨壳式锚杆支护为

主、钢架与网喷混凝土为辅的主动支护体系。支护体系的设计参数如表2所示，衬砌断面图如图4所示。

对比表1及表2中支护设计参数可知，采用低预应力涨壳式锚杆支护为主、钢架与网喷混凝土为辅的主动支

表2 主动支护参数表

拱部	边墙	钢架间距
Φ42超前小导管 (L=3.5m@环0.4m×纵2m) ; Φ25预应力锚杆 (80kN, L=4m@环1.5m×纵1m) ; Φ8@250×250双层钢筋网; 格栅钢架@1m; 喷射300mm厚C25、P6早强混凝土; 防水层; 700mm厚C45、P12模筑二次衬砌	Φ25预应力锚杆 (60kN, L=5m@竖1.5×纵1.0m, 拱脚下4m范围) +Φ25预应力锚杆 (60kN, L=3.5m@竖1.5×纵1.5m, 其余范围) ; Φ8@250×250双层钢筋网; 喷射150mm厚C25、P6早强混凝土; 防水层; 700mm厚C45、P12模筑二次衬砌	1m

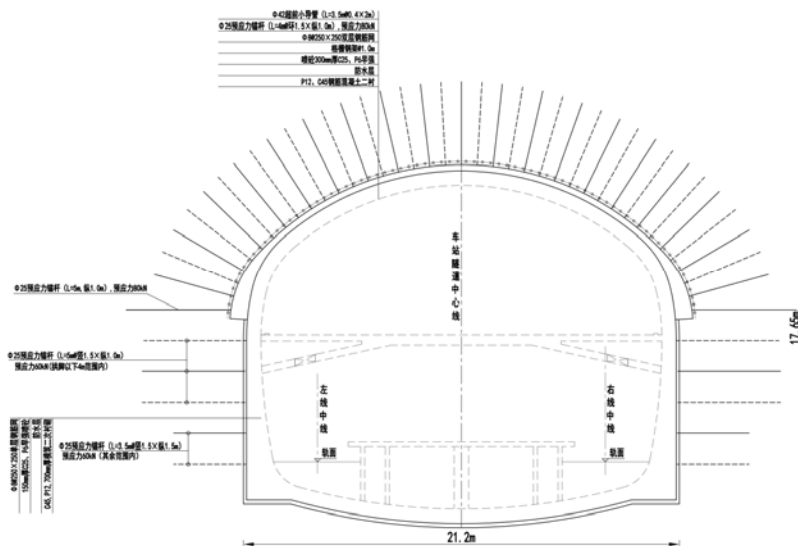


图4 主动支护拱盖法衬砌断面图

护体系后：中空注浆锚杆优化为低预应力涨壳式锚杆，对于隧道拱部：格栅钢架由双层优化为单层，格栅钢架的间距由0.75m优化为1m；优化节省了一道350mm厚C25、P6早强混凝土层的施工工序；对于隧道边墙：支护锚杆的间距适当增加。测算数据显示，优化后的方案车站施工工期缩短4~6个月、拱部的围岩开挖量减少8%、拱架、锚杆材料用量减少约40%，显著提高了施工效率、节省了施工工期和成本、更加绿色节能减排。

充分考虑低预应力涨壳式锚杆与围岩的协同工作，优化了锚杆数量及初期支护的工序，将双层初支减为单层初支，在显著节省工期和成本的同时，有效防止了刚性支撑中喷射混凝土厚度过厚，支护与围岩贴合度差、支护与围岩大面积脱空的现象，提高了支护工程的可靠性。

按照本文提出的低预应力涨壳式锚杆支护体系施工后，经探测主动支护部分围岩表面应力部分恢复了围岩三向应力状态，充分发挥了围岩的自承拱能力。施工过程中及施工完成后的实时监测数据均保持稳定，表明采用低预应力锚杆的部位稳定状态良好，主动支护效果显著。

综上，对后续类似工程，可以借鉴采用低于应力锚杆为主要支护手段的主动支护体系，在施工过程中应重点做好掌子面素描、超前地质预报等地质研判手段，并以此进行信息化施工，同时应做好现场锚杆预加力的施工，确保锚杆可提供可靠有效的预应力，以保证结构体系的安全性。

### 六、结论及建议

### 参考文献

本文提出的低预应力涨壳式锚杆支护体系采用主动支护的柔性支护设计理念，充分发挥围岩的自支撑能力，强调围岩与支护的协同工作及共同受力变形，在青岛某地铁车站隧道开挖工程中达到了良好的预期效果。

[1] 王安东. 一种新拱盖法—叠合初支拱盖法的特点与应用[J]. 现代城市轨道交通, 2016 (1): 48-52.

从施工角度，该工法变被动支护为主动支护，有效规避了隧道超挖现象的发生；采用涨壳式预应力锚杆，使得锚杆打入角度、深度、锚固安装质量得到有效控制。从勘察角度，由于需要发挥围岩的自支撑能力，迫使地质探查更加精确，尤其对于土岩界面及断层破碎带等不利地质条件的探测更为细致；从设计角度，该工法

[2] 安柯, 敖贵勇, 司小东. 上软下硬地层隧道双层初支拱盖法应用研究[J]. 华北科技学院学报, 2019, 16 (2): 30-36.

[3] 郭小红, 姚再峰, 杨春英, 晁峰, 陈红宾. 大跨度地铁车站初支拱盖法支护参数研究[J]. 现代城市轨道交通, 2019 (5): 75-79.

[4] 张秀山. 地铁车站拱盖法暗挖技术研究[J]. 工程建设与设计, 2019 (1): 231-233.

[5] 李克先, 李术才, 赵继增. 大跨度暗挖地铁车站开挖工序优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13 (5): 1329-1337.