

# 大坡度深埋敞开式TBM仰拱块设计制造关键技术

晁林

中铁十五局集团城市轨道交通工程有限公司

**摘要：**TBM工法施工有快速高效、安全可靠、劳动需求少等优势，近些年常被用于长大隧道施工中。TBM工法施工已成功运用于铁路、公路、水利隧道施工中，但在煤矿行业尚无先例，仰拱块作为井筒支护体系的重要组成部分，其设计必须与煤矿井筒结构相适应，同时仍需满足施工过程中各种荷载的分布要求。本文以可可盖矿井及选煤厂项目副斜井井筒掘进工程为案例背景，开展敞开式TBM仰拱块在高寒地区从结构设计到预制生产进行相关的技术研究，使之适应高寒大坡度深埋长距离条件下的敞开式TBM掘进施工，保证工程顺利进行。

**关键词：**大坡度；深埋长距离；敞开式TBM；仰拱块设计制造；缺陷防治

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.12.028

## 引言

随着TBM施工工法在我国隧道施工领域中的广泛应用，预制仰拱块技术也得到了相应的推广，但在煤矿斜井中尚无运用先例。敞开式TBM施工过程中，仰拱块不仅作为TBM后配套轨道步进的道床基础，同时也作为无轨胶轮车及相关物料运输的平台，其设计制造不仅需满足TBM施工过程的需求，同时仍需满足隧道井筒长期服役的安全运行要求。

## 一、井筒支护结构形式及仰拱块设计

### (一) 井筒支护形式

可可盖煤矿副斜井井筒施工采用直径为7.13m TBM工法，是世界首次将敞开式TBM工法应用在富水、软岩、长距离、大坡度煤矿斜井施工领域。本项目井筒支护形式上部采用锚网喷支护，下部采用预制仰拱块。井筒支护详图（图1）。

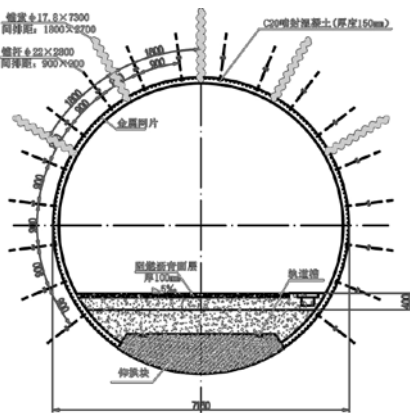


图1 副斜井井筒支护断面（单位：mm）

### (二) 仰拱块设计

预制仰拱块为C40钢筋混凝土，结构底部为半径3565mm的弧形，弦长4004mm，顶部平面宽3550mm，仰拱块高950mm，纵向长度按TBM一个掘进行程1500mm进行设

计；3个吊装孔（注浆孔），2个辅助吊装孔，预留轨道槽，横断面面积为2.293m<sup>2</sup>，体积为4.38m<sup>3</sup>，每块配筋为1.085t；为方便仰拱块安装，纵向设置凹凸榫，凹榫面向掘进面；仰拱块的连接采用螺栓进行连接。仰拱预制块设计详图（图2、图3）。

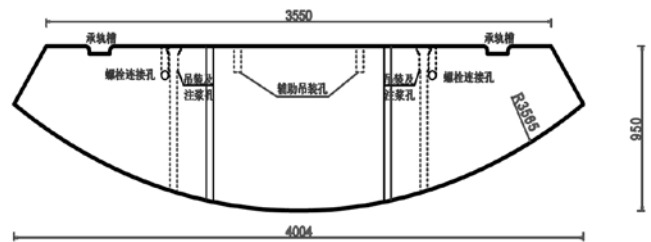


图2 仰拱块断面图（单位：mm）

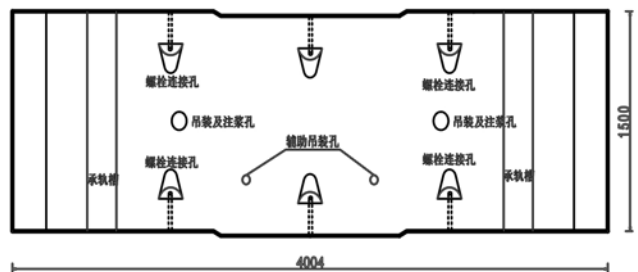


图3 仰拱块平面图（单位：mm）

### (三) 仰拱块受力情况分析

仰拱块的受力情况主要是仰拱块在安装完成后，受到TBM施工顶推油缸压力、台车和其他运输车辆的压力作用时的受力情况，验算在该受力情况下能否满足承载要求。具体情况分析如下：

在TBM施工中，仰拱块顶面主要受来自台车、运输车辆的压力，台车最重部分约120t，行走在43钢轨上，轨道固定在仰拱块上，轨距为2.8m；运输车辆为防爆型双头无轨胶轮车，载重约为30t，车辆本身重15t左右，总重量约45t，主要运输仰拱块、施工材料等；仰拱块还承受TBM顶推油缸的压力，顶推油缸共4组，每组推力约1500KN推力。有限元模型荷载示意图（图4）

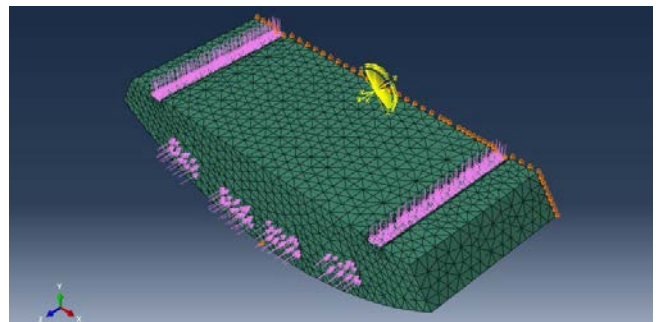


图4 有限元模型荷载示意图

通过计算分析，在台车压力、千斤顶油缸顶推力和辅助运输车辆自重共同作用下仰拱块位移、应力、损伤区分布如图：

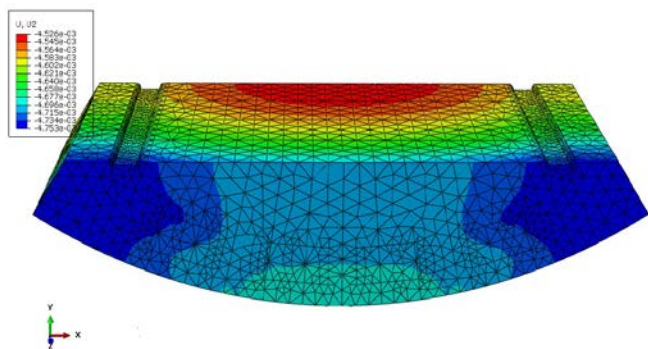


图5 Y方向（仰拱块平面内竖向）位移云图

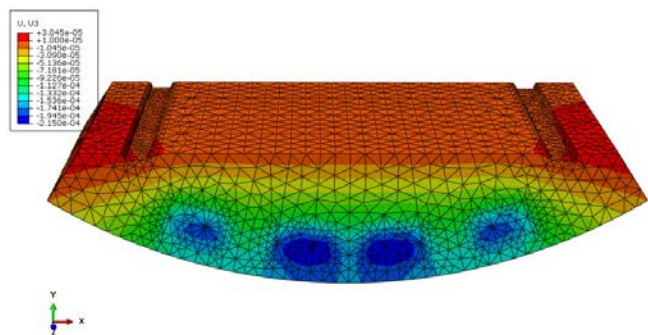


图6 Z方向（隧道轴线方向）位移云图

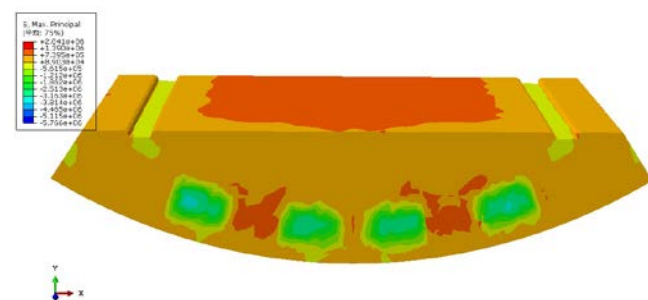


图7 最大主应力云图

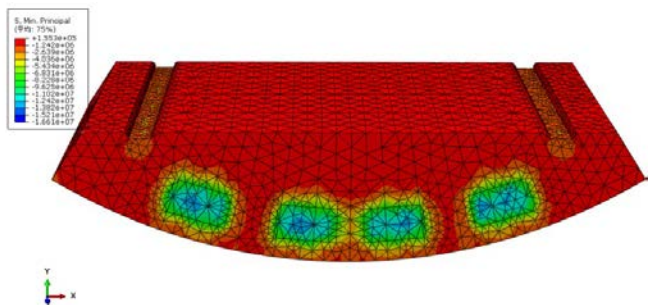


图8 最小主应力云图

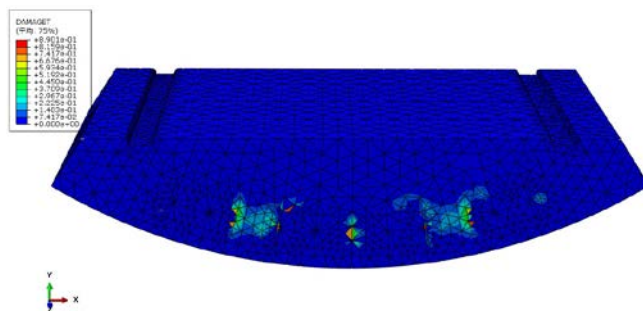


图9 混凝土受拉损伤云图

由图5和图6的位移云图，计算得到的Y方向（仰拱块平面内竖向）位移和Z方向（隧道轴线方向）位移都较小，仰拱块在安装完成后受力不会产生过大的位移和变形，影响后续施工的进行。

由图7和图8的应力云图，计算得到仰拱块主要受压区即为台车压力和顶推油缸压力作用区域，且压应力最大未达到混凝土抗压强度，未出现混凝土受压损伤；主要受拉区为顶推油缸压力作用区之间的区域和仰拱块的顶面，结合图9混凝土受拉损伤云图，仰拱块顶面未出现混凝土受拉损伤，而顶推油缸压力作用区之间的区域出现混凝土受拉损伤区，压力作用区边缘损伤因子较大，实际施工TBM顶推时若出现推力增大或分布不均的情况，此处周边混凝土易发生受拉破坏，产生局部裂缝或破碎。整体来看，仰拱块在该受力条件下未表现出整体性破坏或承载能力不足的情况，整体较为稳定。主要可能发生的局部破坏集中在仰拱块侧表面顶推油缸压力作用区之间的区域。

综上所述，仰拱块承受顶推油缸压力作用的表面局部可能发生破坏，建议施工时若有条件，宜在仰拱块承受顶推油缸压力作用的表面铺设钢板，尽量使压力分布面积更大，仰拱块受力更加均匀，并控制TBM掘进参数，不出现顶推油缸压力大于设计值过多的情形。

## 二、仰拱块预制生产

### （一）预制厂房平面布置

本项目仰拱块预制生产采用工厂化流水线作业形式，厂房为封闭式钢结构厂房，总占地面积约1800m<sup>2</sup>。根据生产工艺需求，厂内共设置有钢筋原材堆放区、钢筋半成品制作及存放区、钢筋笼加工及成品存放区、预制生产区、静养存放区、配套设备存放区六个功能区，厂内地面采用绿色地坪漆进行涂装并设置各区域分隔线；厂外设置有空压机房、锅炉房、仰拱块成品存放区。详见仰拱块预制厂房平面布置图（图10）。

### （二）预制生产工艺

仰拱块预制是一个综合性的生产过程，工艺流程的设计不仅影响仰拱块生产的进度、成本管控，而且直接影响仰拱块生产质量。因此制定一套科学、合理、可行的仰拱块预制生产工艺显得至关重要。仰拱块预制生产采取专业化、标准化流水作业施工模式，根据总体施工进度计划及TBM掘进工效指标综合分析，配备9套高精度定制整体钢模具，并联布设，每套模具单独配置4台风动附着式高频振动器，底部独立铺设蒸汽及高压风

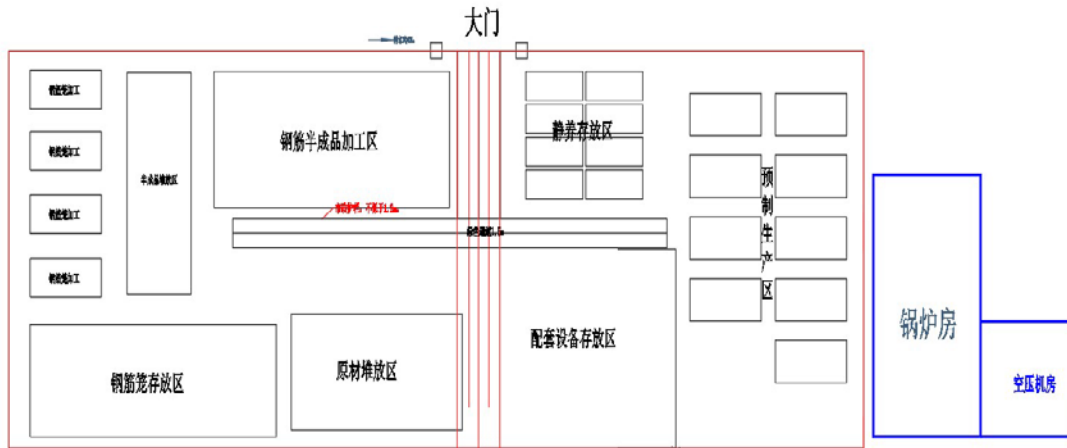


图10 仰拱块预制厂房平面布置图

管路。预制厂房内配备2台16T、1台5T桥吊用于辅助各工序施工。

仰拱块钢筋笼制作统一在预制厂房内下料加工，配备5套仰拱块钢筋笼制作胎模架，胎模架采用角钢制作，上面设置钢筋布置定位槽，使整个钢筋笼在制作过程中始终处于稳定状态，进而保证钢筋笼入模后的保护层厚度。

仰拱块预制生产采用成品混凝土批量浇筑的生产模式，待模具清理、预埋件安装定位、钢筋笼安装等准备工作验收合格后，运输罐车将混凝土运至厂内浇筑区，经取样进行拌合物性能检测合格后进行浇筑，同步制作混凝土试件，混凝土浇筑采用16T桥吊配合料斗进行入模浇筑，密实振捣采用风动附着式高频振动器为主，辅以人工插入式振捣。

仰拱块养护采取脱模前蒸汽养护，脱模后进行喷涂养护剂、洒水自然养护相结合的方式，即仰拱块浇筑完成后需静停4-6h，静停期间环境温度不低于5℃，之后进入升温阶段，升温速率不宜大于10℃/h，恒温期以混凝土芯部温度最大不超过65℃为标准进行控制，恒温时间则根据现场实际环境条件及混凝土配合比等情况经试验确定，一般以达到脱模条件即可；降温阶段速率不宜大于10℃/h。整个蒸养期间设专人进行温度检测记录。蒸养结束且达到仰拱块吊运强度要求后通过16T桥吊将仰拱块吊运至液压翻转机平台上进行180°翻转，随后采用液压真空吸盘将仰拱块吊运至静养存放区进行喷涂养护剂养护，连续室内养护3d后转运至室外仰拱块存放区养护至14d龄期，待同期试件28d强度满足设计要求后方可运至洞内使用。详见仰拱块预制生产工艺流程图（图11）。

### 三、仰拱块预制生产常见质量缺陷及防治措施

#### （一）常见质量缺陷

从仰拱块预制生产现场实际情况出发，经总结梳理主要存在如下常见质量缺陷：结构表面气泡、裂纹、构件局部缺棱掉角。这些缺陷的发生不仅影响仰拱块外观及结构的耐久性，而且造成大量的修补工作，因此找出发生这些病害的原因并加以控制显得很有必要。

#### （二）原因分析

#### 1. 结构表面气泡

1) 配合比方面：骨料集配不合理就会导致空隙率增大，如果没有足够的胶凝材料进行填充便会形成气泡；同样水灰比设计不合理，过大的水灰比会造成大量的自由水存在，当这些自由水蒸发后其所占的空间便形成了气泡。

2) 施工工艺方面：一次浇筑厚度过大造成混凝土内部的气泡不易向上排出；振捣时间不合理也会造成气泡的产生，过渡振捣会使混凝土产生离析，造成骨料和胶凝材料分离，混凝土出现不密实的情况；同样漏振或振捣不到位同样会造成混凝土内部出现不密实的情况，这些都会给结构气泡的产生提供条件。

#### 2. 裂纹

因为混凝土具有热胀冷缩的特性，在混凝土硬化过程中，由于水化热反应，混凝土内部产生大量的热量，同时会散失大量的水分，当混凝土内外温差达到一定程度则会在结构内部产生一定的拉应力，当这种拉应力大于混凝土自身的抗拉强度时即会产生温度裂纹。同样如果养护不到位，无法提供水化热所需的大量水分，造成内外水分散失不平衡，便会产生干缩裂纹。

#### 3. 掉块

通过在仰拱块生产过程中的观察总结，发现掉块的现象主要出现在仰拱块顶部平面的长边棱角方向，经分析，主要原因一方面为仰拱块在脱模起吊过程中，由于桥吊钢丝绳与仰拱块起吊重心不能准确重合，仰拱块在起吊脱离模具的瞬间仰拱块长边棱角与模具发生碰撞造成掉块；另一方面由于仰拱块在翻转过程中，由于顶部平面棱角处受力集中造成局部掉块。

### （三）防治措施

针对上述质量缺陷，通过对产生原因的分析，主要从以下几方面措施进行防治：

#### 1. 结构表面气泡

1) 严格控制混凝土配合比的骨料集配及水灰比，首先要根据现场粗细骨料的级配情况通过试验合理确定参配比例，保证混凝土中的骨料结构尽量密实，同时在满足强度指标的前提下适当降低水灰比，一方面减少了自由水的存在，另一方面提高了混凝土的密实度，这样

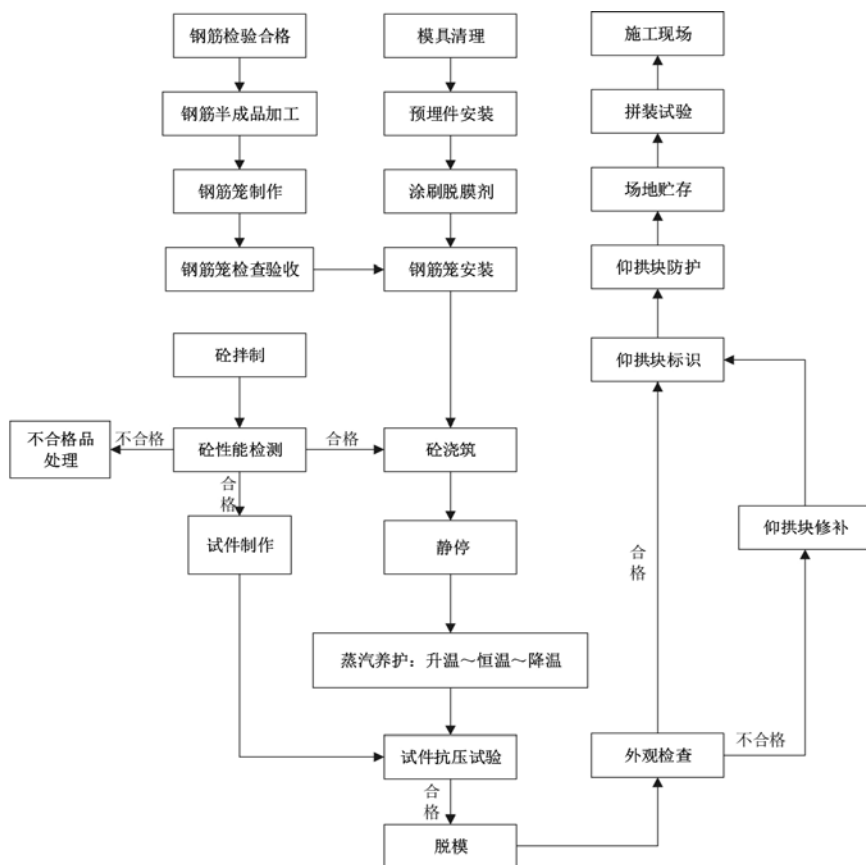


图11 仰拱块预制生产工艺流程图

便可以减少气泡的产生。

2) 加强对出机及入模拌合物性能的检测，尤其是对坍落度的控制。

3) 分层浇筑，分层振捣，严格控制分层厚度及振捣时间；尤其针对混凝土与模板接触处的振捣，由于涂刷了脱模剂，一定程度上限制了气泡的排放，必要时采取人工插捣的方式进行局部加强处理。

### 2. 裂纹

1) 严格控制蒸养的升降温速率，升降温速率不宜大于10℃/h；同时保证环境温度与混凝土表面温度、混凝土表面与芯部温度不得大于20℃，大风或气温骤降的时候不应拆模。

2) 适当的延长蒸养恒温阶段的时间，一方面可以为混凝土凝结过程水化热反应提供充足的温度和湿度，保证混凝土结构内外温差及水分均衡，另一方面可尽快使混凝土凝结，提高自身抗拉强度，尽量避免裂纹的产生。

3) 仰拱块脱模后室内养护满3d后转运至室外继续保温保湿养护至14d龄期。根据室外环境温度情况，可采取洒水、喷涂养护剂、覆盖等养护方式。

### 3. 掉块

1) 在满足现场仰拱块供需的前提下尽量延长在模具内的养护时间，提高早期强度。

2) 针对桥吊钢丝绳与仰拱块重心不能准确重合而造成的掉块情况，经现场实地研究，可采取“三线定位法”进行预防，即通过在厂房特定位置进行标记，使桥吊大梁、起吊小车、仰拱块重心进行十字交叉定位，避

免出现斜吊的情况。起吊时应设专人指挥，必要时人工辅以平衡，尽量避免仰拱块在起吊瞬间晃动过大。

3) 针对仰拱块在翻转过程中出现的掉块现象，可定制一块橡胶衬垫固定于翻转设备大梁与仰拱块边角接触点，增大接触面积，减小局部应力过大的同时可实现仰拱块与钢梁之间的软接触。

### 四、结束语

在陕北地区，昼夜温差大、天气干燥、冬季寒冷、气候条件恶劣，仰拱块设计生产相对困难，必须结合项目工况特点，在仰拱块设计优化、预制厂房合理布局、制造生产等方面统筹考虑、充分调研，研究优化各项施工关键技术，满足高寒地区预制仰拱块的质量要求，消除仰拱块质量缺陷，探索推广大坡度长距离敞开式TBM仰拱块施工在煤矿斜井中的应用，不断开创煤炭行业斜井开拓施工新工艺。

### 参考文献

[1] 霁锦义. 特长隧道TBM仰拱预制块质量控制要点分析[J]. 工程技术与应用, 2022(04): 68-70.  
 [2] 徐赞. 西秦岭隧道仰拱预制块施工技术[J]. 隧道建设, 2011(02): 256-261.  
 [3] 符亚鹏. 敞开式TBM施工铁路隧道仰拱预制块关键设计参数研究[J]. 铁道标准设计, 2016(08): 80-83.  
 [4] 中铁三局集团有限公司. 铁路混凝土工程施工质量验收标准: TB10424-2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019: 54-55.