



# 瓦斯治理巷小直径TBM刀盘设计研究

王冰山 王大龙 汪义龙 陈存强 李永元 李克相 马新根 肖运智

## 引用本文：

王冰山, 王大龙, 汪义龙, 等. 瓦斯治理巷小直径TBM刀盘设计研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 306–315.

WANG Bingshan, WANG Dalong, WANG Yilong. Research on design of small diameter TBM cutterhead in gas control roadway of Well 1 Bailongshan Coal Mine[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 306–315.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1706>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 多滚刀协同破岩过程数值模拟与滚刀布置规律研究

Numerical simulation of cooperative breaking rock by multi-cutter and research on the layout law of disc cutter on cutterhead  
煤炭科学技术. 2023, 51(5): 232–244 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-0158>

#### TBM在煤矿巷道掘进中的技术应用和研究进展

Application and research progress of TBM tunneling in coal mine roadway  
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 242–259 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-2253>

#### 煤矿岩巷TBM适应性与新技术发展

Application of TBM in coal mine adaptability type selection analysis and new technology development  
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 351–361 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1404>

#### 煤矿微型TBM及其掘进瓦斯治理巷道工程实践

Coal mine micro TBM and its applications on excavation of coal seam gases drainage roadways  
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 104–111 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.mcq22-0918>

#### 云贵地区煤矿 T B M 施工技术应用研究

Study on application of TBM construction technology in coal mine construction in Yunnan–Guizhou area  
煤炭科学技术. 2022, 50(10): 10–18 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8a8b4730-b608-40f5-9523-71910c33a704>

#### 煤矿全断面岩巷掘进机开发应用与发展

Development and application of full-section rock tunnelingboring machine in coal mine  
煤炭科学技术. 2019(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d1b81fc6-89b5-42d2-bddf-16d709218a9a>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



王冰山, 王大龙, 汪义龙, 等. 瓦斯治理巷小直径 TBM 刀盘设计研究——以白龙山煤矿一井为例[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 306–315.

WANG Bingshan, WANG Dalong, WANG Yilong, et al. Research on design of small diameter TBM cutterhead in gas control roadway of Well 1 Bailongshan Coal Mine[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 306–315.

移动扫码阅读

## 瓦斯治理巷小直径 TBM 刀盘设计研究 ——以白龙山煤矿一井为例

王冰山<sup>1</sup>, 王大龙<sup>2</sup>, 汪义龙<sup>1</sup>, 陈存强<sup>2</sup>, 李永元<sup>1</sup>, 李克相<sup>3</sup>, 马新根<sup>1</sup>, 肖运智<sup>3</sup>

(1. 华能煤炭技术研究有限公司, 北京 100070; 2. 华能云南滇东能源有限责任公司矿业分公司, 云南 曲靖 655800;  
3. 华能云南滇东能源有限责任公司矿业分公司白龙山煤矿一井, 云南 曲靖 655508)

**摘要:**白龙山煤矿一井为煤与瓦斯双突矿井, 采用全断面岩石隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)施工能更好地满足煤矿安全、高效和环保的建设需要, 刀盘是决定 TBM 掘进效率和施工安全的关键部件, 其设计是否合理对保障 TBM 施工效率与煤矿高效生产至关重要。通过分析煤矿瓦斯治理巷道与非煤矿领域隧道工程要求和地质特点差异, 总结了煤矿瓦斯治理巷 TBM 刀盘设计需求, 阐述了瓦斯治理巷 TBM 刀盘的设计流程。针对白龙山煤矿一井瓦斯治理巷开展小直径 TBM 刀盘设计, 从刀盘盘体结构、刀具布置、出渣结构等 3 个主要方面确定刀盘初始方案, 结合倾覆力矩、不平衡力、强度及刚度校核形成刀盘最终设计方案。白龙山煤矿一井瓦斯治理巷 TBM 刀盘选取平面型二分块结构, 采用单螺旋线刀具布置形式, 滚刀刀间距设计根据离散元仿真分析确定, 铲斗均布在刀盘外周, 铲斗尺寸根据出渣量确定。刀盘最大倾覆力矩为 946.53 kN·m, 由刀具产生的倾覆力矩为 523.28 kN·m, 占比为 55.3%, 刀具产生的水平与竖直不平衡力最大值为 78.12 kN, 仅为刀盘重力产生的竖直不平衡力的 17.2%, 刀盘最大应力为 99 MPa, 最大变形为 0.4 mm, 相当于刀盘整体厚度应变量为 0.027%, 满足设计要求。面向白龙山煤矿一井瓦斯治理巷提出的刀盘设计流程能够为同类工程 TBM 刀盘设计提供借鉴。

**关键词:**瓦斯治理巷; 岩石隧道掘进机 (TBM); 刀盘设计; 滚刀布置; 性能校核

中图分类号: U455.3+1 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)S2-0306-10

### Research on design of small diameter TBM cutterhead in gas control roadway of Well 1 Bailongshan Coal Mine

WANG Bingshan<sup>1</sup>, WANG Dalong<sup>2</sup>, WANG Yilong<sup>1</sup>, CHEN Cunqiang<sup>2</sup>, LI Yongyuan<sup>1</sup>,  
LI Kexiang<sup>3</sup>, MA Xingen<sup>1</sup>, XIAO Yunzhi<sup>3</sup>

(1. Huaneng Coal Technology Research Co., Ltd., Beijing 100070, China; 2. Mining Branch of Huaneng Yunnan Diandong Energy Co., Ltd., Qujing 655800;  
3. The First well of Bailongshan Coal Mine, Mining Branch of Huaneng Yunnan Diandong Energy Co., Ltd., Qujing 655808, China)

**Abstract:** Well 1 of Bailongshan Coal Mine is a coal and gas blow-out mine, the use of full-face tunnel boring machine (TBM) can better meet the needs of safe, efficient and environmentally friendly construction of coal mines. The cutterhead is a key component to determine the efficiency of TBM construction, and its reasonable design is essential to ensure the safety of coal mine production. Based on the analysis of the differences in engineering demands and geological characteristics between coal mine gas control roadway and non-coal mine tunnel, the design requirements of TBM cutterhead in coal mine gas control roadway are summarized, and the design process of TBM cutter head in gas control roadway is illustrated. The small diameter TBM cutterhead is designed for the gas control roadway in Well 1 of Bailongshan Coal Mine, and the initial scheme of the cutterhead is determined from three main aspects: the body structure, the layout of the

收稿日期: 2022-10-18 责任编辑: 周子博 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1706

基金项目: 华能集团总部科技资助项目(HNKJ19-H28)

作者简介: 王冰山(1975—), 男, 安徽怀远人, 高级工程师, 硕士。E-mail: bs\_wang@chng.com.cn

cutters, and muck removal structure, then, the scheme of cutterhead is finally formed in combination with the verification of overturning moment, unbalanced force, strength and stiffness. The TBM cutterhead of gas control roadway in Well 1 Bailongshan Coal Mine adopts a planar two-part structure, the cutters are arranged in the form of single helix cutter layout, and the cutter spacing design is determined according to the discrete element simulation analysis. The scraper bucket is uniform distributed around the cutterhead, and its size is determined according to the volume of muck removal. The analysis of mechanical properties shows that the maximum overturning torque of the cutterhead is 946.53 kNm, and the overturning torque generated by the cutters is 523.28 kNm, accounting for 55.3%. The maximum horizontal and vertical unbalanced force generated by the cutters is 78.12 kN, which is only accounts for 17.2% of the vertical unbalanced force generated by the cutterhead gravity. The maximum stress of the cutterhead is 99 MPa and the maximum deformation is 0.4 mm, which is equivalent to that the overall thickness strain of the cutterhead is about 0.27%, its performance meeting the design requirements. The cutterhead design process for gas control roadway in Well 1 of Bailongshan Coal Mine can provide reference for TBM cutterhead design of similar projects.

**Key words:** gas control roadway; Tunnel Boring Machine(TBM); cutterhead design; cutter layout; mechanical properties check

## 0 引言

煤炭是我国能源生产和消费结构的重要组成部分, 煤矿安全开采是保障能源安全生产所面临的重要问题<sup>[1]</sup>。近 30 年来, 我国煤炭企业采煤机械化程度不断提高, 但岩巷掘进技术发展则相对缓慢, 制约了煤矿的高效集约化生产<sup>[2]</sup>。传统的钻爆法施工在双突条件下瓦斯治理工艺复杂, 工期和进尺难以保证, 全断面岩石隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)作为目前隧道掘进最为先进的装备, 近年来逐步在我国煤矿巷道施工中推广应用<sup>[3-4]</sup>。刀盘是决定岩 TBM 掘进效率和施工安全的关键部件, 其设计好坏直接影响 TBM 掘进性能<sup>[5]</sup>。因此, 开展煤矿巷道 TBM 刀盘设计研究, 形成一套成熟可靠的设计方法, 对于保障 TBM 施工效率与煤矿高效生产至关重要。

目前国内外针对 TBM 刀盘设计已经开展了大量的研究工作, 涉及刀盘结构设计、刀具布置、破岩机理、载荷预测等多个方面<sup>[6]</sup>。ROSTAMI<sup>[7]</sup>探讨了 TBM 刀盘设计的基本原则, 并总结了刀盘设计的简要步骤。程永亮等<sup>[8]</sup>提出一套 TBM 地质适应性设计方法, 阐述了刀盘基本设计流程, 并设计出一个适用于引水隧道的刀盘方案。霍军周等<sup>[9]</sup>归纳了 TBM 刀具布置技术要求, 建立了非线性多目标刀具布置优化模型, 通过遗传算法求解得到刀具优化布置方案。郭伟等<sup>[10-11]</sup>基于最小破岩比能耗原则, 以最小径向不平衡力和倾覆力矩为目标, 采用遗传算法对 TBM 刀盘布刀方案进行优化。刘建琴等<sup>[12]</sup>针对复合岩层滚刀磨损和受载不均的特点, 提出基于等磨损速率的滚刀布置方法, 并对比了不同刀具布置方式下滚刀磨损速率方差、倾覆力矩、径向不平衡力等因素, 得到最优布置方案。刘亚迪等<sup>[13]</sup>建立了多滚刀协同破岩有限元模型, 分析了多刀组合切削

条件下刀间距、安装极角和切削顺序等刀具布置参数对破岩载荷和比能耗等指标的影响规律。谭青等<sup>[14-15]</sup>采用颗粒离散元方法研究滚刀破岩的岩石破碎特性规律, 分析滚刀破岩过程中岩体裂纹、贯入度和切削力间的关系, 得到不同贯入条件下最优滚刀刀间距。林赉观等<sup>[16]</sup>采用颗粒离散元方法建立边缘滚刀组合破岩模型, 研究不同岩石条件下边缘滚刀组合破岩过程中的岩体裂纹演化、应力分布及载荷特性变化规律。刘力鹏等<sup>[17]</sup>采用颗粒离散元方法进一步分析了岩石强度、围压等对破岩效果的影响。赵振威等<sup>[18]</sup>对比分析不同几何结构 TBM 刀盘静力学性能, 为选取不同结构形式刀盘提供理论依据。曾文字等<sup>[19]</sup>分析了煤矿斜井土压/TBM 双模式刀盘多工况下的受力特性, 并根据刀盘应力应变分布规律, 提出了刀盘结构优化建议。现有文献主要是针对直径 6 m 以上 TBM 刀盘而提出的设计方法, 面向煤矿岩巷 TBM 刀盘设计理论研究较少, 对于小直径煤矿巷道 TBM 刀盘设计而言, 直径减小将直接导致刀具布置空间受限, 且煤矿巷道岩体相对非煤矿领域 TBM 施工隧道地质特点有较大差异, 也进一步影响 TBM 刀盘刀具布置与结构设计。

笔者针对煤矿瓦斯治理巷 TBM 施工需求和地质特点, 提出一套煤巷小直径 TBM 刀盘设计方法, 包括刀盘盘体结构、刀具布置、出渣结构设计, 结合力学性能校核形成最终刀盘方案。以白龙山煤矿一井瓦斯治理巷 TBM 刀盘设计为例, 阐述了 TBM 刀盘的设计过程, 为后续煤矿巷道小直径 TBM 施工工程刀盘设计提供借鉴。

## 1 工程需求分析

煤矿岩巷施工方法主要有钻爆法、综掘法和 TBM 法。传统的钻爆法施工, 对地质适应能力较强、

开挖成本较低;综掘法施工速度快,巷道质量高,人工劳力少,但作业粉尘浓度高、噪音大,对人员健康影响大;TBM法是煤矿岩巷施工中较新颖的方法,实现了掘进与支护的连续施工作业,机械化和自动化程度高,在安全、效率、环保等方面具有显著优势,特别是在煤与瓦斯突出的煤矿采用TBM施工优势明显。

煤矿可采用TBM施工的岩巷主要有主副斜井、辅运大巷、运输大巷、瓦斯治理巷等。煤矿瓦斯治理巷作为煤层瓦斯治理专用巷道,满足钻孔施工需求及通风需求即可,一般可视为永久或半永久型巷道,具有单条巷道相对较长、支护工作量大等特点。采用TBM施工巷道为圆形断面,辅运大巷和胶运大巷后期均需对巷道底部进行回填以满足设备安装需求,而瓦斯治理巷成型后无需进行底板回填,且瓦斯治理巷TBM设备体积相对较小,对组装硐室施工和设备起重重量要求更低,因此瓦斯治理巷中应用TBM施工对总体工期效率和经济效益提升明显。

由于煤矿瓦斯治理巷道与非煤矿领域(交通、水利等)隧道工程要求和地质特点存在一定差异,故TBM刀盘在结构设计、力学性能分析时重点考虑的因素并不完全相同,主要有:

1)瓦斯治理巷道断面尺寸通常较小,采用TBM施工的圆形巷道直径一般在 $\phi 4$  m左右;非煤矿领域常规TBM施工隧道直径通常在 $\phi 6$  m以上。对于小直径TBM刀盘而言,刀具、铲斗等关键部件的布置空间更为紧凑。

2)瓦斯治理巷所处岩层一般为沉积环境,地层结构简单,常见为泥岩、砂岩地层,地层较为均一,岩石强度较低;非煤矿领域常规TBM施工隧道通常需穿越多种地层,且岩石强度普遍较高。TBM在瓦斯治理巷中采用滚刀破岩优势更为明显,但泥岩地层遇水软化后易产生糊刀盘问题,导致开挖面温度骤升使滚刀密封失效,以及滚刀无法转动而偏磨等异常损坏问题。故瓦斯治理巷TBM刀盘设计需重点配置泡沫喷头及相应的泡沫系统,而常规TBM刀盘通常仅配置高压水系统对开挖面进行冲洗降温。

3)TBM刀盘滚刀产生的载荷是进行结构力学性能校核的关键因素,瓦斯治理巷TBM刀盘直径较小,相应刀盘上滚刀安装半径较小,因此在力学性能分析时需考虑各滚刀旋转过程中挤压破碎刀刃内侧岩石产生的侧向力。

4)瓦斯治理巷TBM刀盘分块设计重点满足巷道内运输尺寸和起重重量限制条件,而常规TBM刀盘分块设计一般为满足道路运输尺寸限制条件,因

此常规TBM分块设计通常只对直径 $\phi 8$  m以上的刀盘进行分块设计,分块后使得最大结构尺寸符合道路运输要求,一般最大分块尺寸不超过 $\phi 7.5$  m。

白龙山煤矿一井是云南省根据“西电东送”能源战略部署而新建的第一对大型现代化矿井。根据云南省“五化”(机械化、自动化、信息化、智能化、标准化)矿井建设要求,以建设国内一流智能化矿井为目标,进一步提升矿井施工技术水平。由于白龙山一井为煤与瓦斯双突矿井,传统的钻爆法施工在双突条件下瓦斯治理工艺复杂,工期和进尺难以保证,采用TBM施工能更好地满足煤矿安全、高效和环保的需要。刀盘作为TBM开挖破岩的关键部件,其设计合理与否直接影响煤巷TBM施工效率。

## 2 瓦斯治理巷TBM刀盘设计

### 2.1 瓦斯治理巷TBM刀盘设计流程

TBM刀盘设计首先需要了解工程需求,进而选取合适的刀盘结构、刀具布置和出渣结构方案,形成初始的刀盘设计方案。在此基础上,进行倾覆力矩、不平衡力、强度及刚度等力学性能校核,若力学性能不符合设计要求,则需要对初始方案进行修改,直到满足设计要求,从而得到最终设计方案。本文重点针对煤矿瓦斯治理巷工程特点,开展小直径TBM刀盘设计,具体设计流程如图1所示。

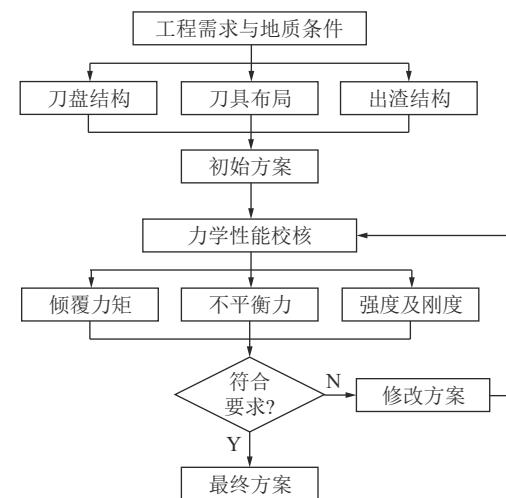


图1 煤巷瓦斯治理巷小直径TBM刀盘设计流程

Fig.1 Design process of small diameter TBM cutterhead in coal gas control roadway

### 2.2 盘体结构

刀盘结构选型设计主要考虑盘体形式和分块形式两种因素。TBM刀盘的盘体形式根据截面轮廓形状可划分为平面形、锥面形和球面形,如图2所示。在相同开挖直径、滚刀数量、施工工况条件下,平面

刀盘的结构更为平滑, 刀盘强度性能更优, 而球面和锥面刀盘的刚度性能相对更优<sup>[18]</sup>。在结构强度和刚度性能均符合要求的情况下, 还需要考虑结构抗冲击振动性能与开挖面稳定性, 与非煤矿领域硬岩隧道相比, 煤矿巷道岩体强度不高、稳定性更低, 平面刀盘结构能够更好稳定前方岩体。综合而言, 选取平面刀盘结构形式, 具有更好的结构强度性能、抗冲击性能和开挖面稳定性。

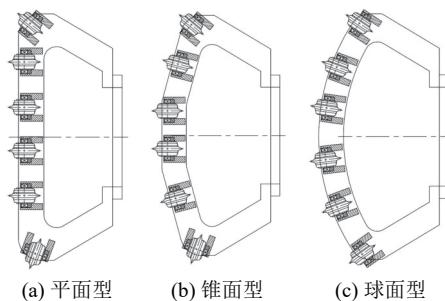


图 2 TBM 刀盘结构形式  
Fig.2 Structural style of TBM cutterhead

刀盘分块形式根据分块数量可以划分为一体式、二分块式、五分块式、七分块式等, 如图 3 所示。由于 TBM 分块连接面加工精度要求高, 且各分块件组装为整体复杂费时, 因此 TBM 刀盘分块并非越多越好, 在满足限制条件的情况下应尽量减少分块数量。针对煤矿瓦斯治理巷道 TBM 而言, 则需要重点考虑井下巷道运输结构尺寸限制, 以及洞内拆装结构重量限制, 可考虑二分块结构形式, 降低单件结构运输宽度和重量。

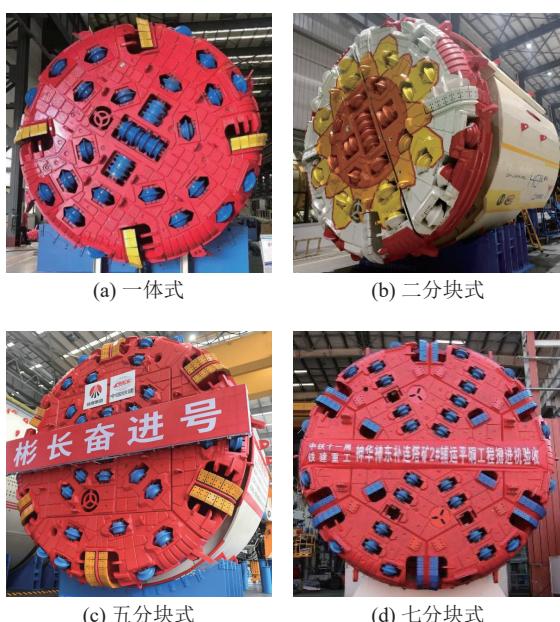


图 3 TBM 刀盘分块结构形式  
Fig.3 Block structure of TBM cutterhead

## 2.3 刀具布置

### 2.3.1 刀间距

刀间距是刀盘上相邻滚刀破岩形成的环形轨迹之间的径向间距, 在确定刀间距后即可大致确定刀盘所需要布置的刀具数量。为保证刀盘开挖破岩的高效性, 认为在理想贯入度下, 相邻滚刀破岩可以使得轨迹间的岩石裂纹贯通破碎, 在不过度破碎且不留岩脊时破岩效率最优, 刀间距表达式<sup>[8]</sup>可写为:

$$S = T + 2p \times \tan(\beta/2) \quad (1)$$

式中:  $S$  为滚刀刀间距, mm;  $T$  为滚刀刀尖宽度, mm;  $p$  为滚刀贯入度, mm;  $\beta$  为岩石破碎角, ( $^{\circ}$ )。破碎角是岩石固有属性之一, 不同岩石具有不同破碎角, 采用式(1)计算刀间距时通常参考典型岩石破碎角经验值来选取<sup>[20]</sup>, 尚缺乏针对煤矿岩巷粉砂质泥岩的破碎角取值相关研究, 且岩石破碎角难以由地勘报告获取, 无法直接采用式(1)估算刀间距。故考虑采用 PFC 离散元仿真, 以直观展示不同贯入度和刀间距条件下岩石裂纹贯通破碎的情况, 从而确定所需刀间距。PFC 离散元仿真无需提供岩石本构模型, 而是采用颗粒流模型细观参数来匹配岩石宏观力学特性, 目前岩石力学特性匹配主要采用试错法使得颗粒模型细观参数与实验测得的岩石宏观力学特性相匹配, 采用一系列数值模拟试验(如单轴压缩试验标定抗压强度和弹性模量、巴西劈裂试验标定抗拉强度), 通过反复调整颗粒细观参数, 从而建立离散元计算模型与岩石力学参数间的联系<sup>[21]</sup>。已知白龙山煤矿一井瓦斯治理巷主要为粉砂质泥岩, 岩层较均一, 密度为  $2660 \text{ kg/m}^3$ , 抗压强度为  $42.7 \text{ MPa}$ , 抗拉强度为  $3.3 \text{ MPa}$ , 内摩擦角为  $34.3^{\circ}$ 。单轴压缩试样尺寸为  $\varnothing 50 \text{ mm} \times H 100 \text{ mm}$ , 巴西劈裂试样尺寸为  $\varnothing 50 \text{ mm} \times H 50 \text{ mm}$ , 考虑初始孔隙率为 0.1 时的颗粒密度, 最后得到标定出的结果如图 4 和表 1。

在获得与实际岩体特性相匹配的离散元细观参数后, 通过离散元仿真模拟双滚刀破岩过程, 并观察相邻滚刀刀刃间岩体裂纹扩展与破碎情况。结合以往工程经验可知, 在软岩地层中 TBM 掘进过程中贯入度控制在  $6 \sim 10 \text{ mm}$  较为常见, 故选取贯入度  $6$  和  $10 \text{ mm}$  这 2 种情况进行分析, 分别考察各贯入度条件下不同刀间距对破岩性能的影响, 如图 5 和图 6 所示。

从图 5 和图 6 中可以看出, 当贯入度为  $6 \text{ mm}$  条件下, 刀间距  $70 \text{ mm}$  时, 相邻滚刀间岩体已过度破碎, 刀间距  $80 \text{ mm}$  时, 相邻滚刀间岩体基本贯通破碎, 而刀间距  $90 \text{ mm}$  以上, 则裂纹扩展并未产生贯通破碎;

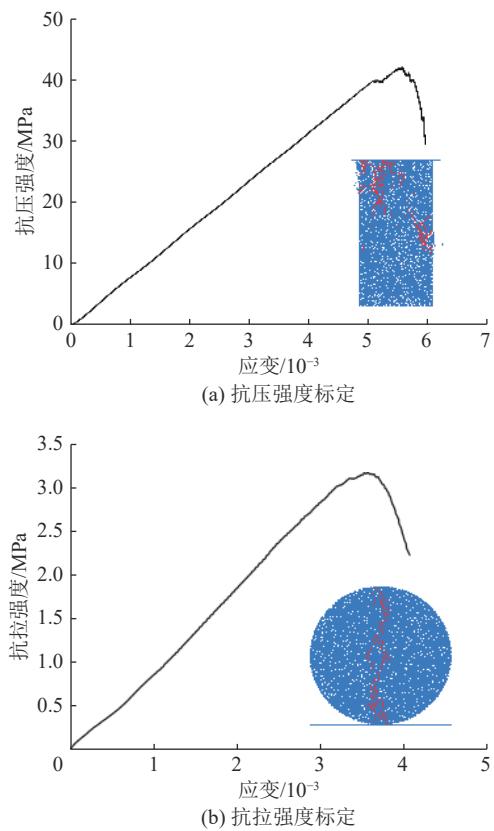


图4 模型细观参数标定

Fig.4 Micro parameters determination of DEM model

当贯入度为10 mm条件下,几种不同刀间距布置均能使岩体贯通破碎。

通过离散元滚刀破岩仿真结果可以看出,不同贯入度条件下,使岩体恰好贯通破碎时的刀间

距选取并不相同。刀盘设计时在考虑滚刀破岩效果的基础上,还需要综合滚刀承载能力、滚刀允许磨损量、安装空间、掘进效率等因素综合确定滚刀刀间距。

### 2.3.2 刀具布局

在进行刀具布局时,应尽量保证刀具在刀盘上的均匀、对称布置,这样可以使得刀盘受力平衡性,目前刀具布置主要由螺旋线布置、星形布置、随机布置3种<sup>[7]</sup>,3种布置方法特点如下:

1)螺旋线布置,刀盘上各滚刀的安装半径和安装角度随着安装半径的增加呈定值增加,这种方法可以使得刀盘以较少的刀具达到更高的切削效率,当刀盘直径较大时,由于外周滚刀分布半径大,切削距离长易导致快速磨损,还可以采用双螺旋或者多螺旋线布置。

2)星形布置,刀具沿径向以等角距布置,这种布置方式刀盘周向上刀盘布置更均匀,但使用刀具数量相比螺旋线更多,相同直径刀盘所需扭矩和功耗更高。

3)随机布置,刀具布置受其他限制因素较多,根据实际情况进行布置,无特定形式。

TBM掘进过程中,滚刀破岩受到较大随机载荷,对刀盘的受力平衡性能要求更加严格;刀具布置还应使各刀具之间磨损量趋于相等,减少换刀次数;此外,刀具布置还应满足几何约束。因此,刀具布置的基本准则包括:

表1 离散元细观参数

Table 1 Micro parameters of DEM

颗粒密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	有效模量/GPa	刚度比	摩擦因数	平行黏结有效模量/GPa	平行黏结刚度比	抗拉强度/GPa	黏结强度/GPa	内摩擦角/(°)
2 660	5.0	2.5	0.577	5.0	2.5	27	20	23

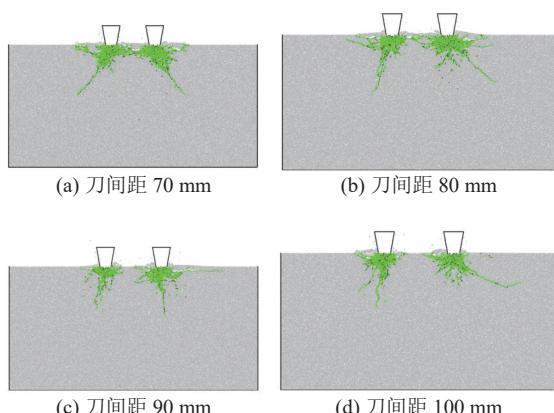


图5 贯入度6 mm时不同刀间距破岩效果  
Fig.5 Rock breaking effect of different cutter spacings under 6 mm penetration

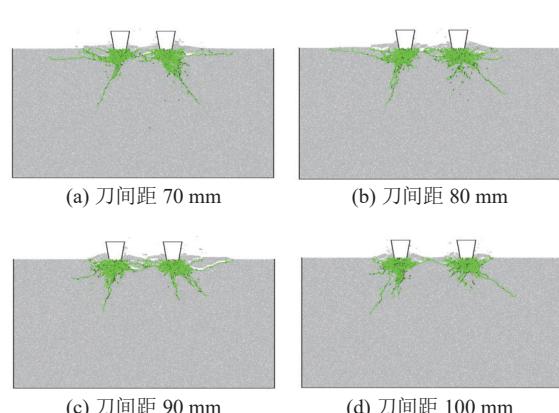


图6 贯入度10 mm时不同刀间距破岩效果  
Fig.6 Rock breaking effect of different cutter spacings under 10 mm penetration

1) 刀盘受力平衡, 即刀盘开挖过程中受到的径向载荷和倾覆力矩应尽量小。

2) 最小破岩量方差, 即每把滚刀破岩量基本相等使刀具力学效果最佳。

3) 最小磨损量差异, 即尽量使每把刀具寿命相近, 减少换刀次数。

4) 刀具分区布置要求, 即滚刀布置考虑结构尺寸和布置区域特点, 将刀盘分为中心区域、正面区域、边缘区域进行刀具布置。

5) 不干涉要求, 即滚刀布置应考虑刀盘结构分块、滚刀拆装空间等需求, 避免结构发生干涉。

针对煤矿瓦斯治理巷 TBM 刀盘刀具布局, 由于刀盘直径较小, 刀具布置空间有限, 同时需要保证刀盘切削效率, 而滚刀刀座系统需要一定的安装空间, 故刀盘中心区域采用双联体滚刀, 这样可以尽量减小中心区域的刀间距, 提高中心切削效率, 并避免刀座干涉, 在正面区域一般采用单螺旋线布置方法。

## 2.4 出渣结构

刀盘铲斗是出渣的关键部件, 直接影响刀盘的出渣效率, 若岩渣未及时排出, 将导致滚刀的二次磨损, 降低了滚刀的使用寿命和掘进效率。铲斗一般均布在刀盘外周, 其尺寸需要保证开挖产生的岩渣能够顺利排出, 同时铲斗也不宜过大而占据刀具布置空间, 并避开分块位置。刀盘出渣槽结构设计, 必须要满足每小时铲渣量大于岩渣产生量, 铲斗数量随着刀盘直径增大相应增加, 一般直径 6 m 以下刀盘布设 4 个铲斗可满足要求, 直径 6 ~ 8 m 的刀盘宜布置 6 个铲斗, 直径 8 m 以上的刀盘需布置 8 个以上的铲斗(图 7)。

刀盘旋转一周破岩产生的岩渣方量计算表达式为<sup>[22]</sup>:

$$V_C = \lambda v \pi D^2 / 4 \quad (2)$$

式中:  $V_C$  为破岩产生的岩渣方量;  $\lambda$  为岩石膨胀系数, 取 1.6;  $D$  为刀盘直径, mm;  $v$  为刀盘贯入度, mm。

铲斗每小时可运输的岩渣方量为:

$$V_{cd} = 60 \omega \sum_{i=1}^{n_{cd}} L_{cdi} W_{cdi} H_{cdi} \quad (3)$$

式中:  $V_{cd}$  铲斗每小时可运输的岩渣方量,  $\text{mm}^3/\text{h}$ ;  $L_{cdi}$  为第  $i$  号铲斗长, mm;  $W_{cdi}$  为第  $i$  号铲斗宽, mm;  $H_{cdi}$  为第  $i$  号铲斗高, mm;  $n_{cd}$  为刀盘上铲斗总数;  $\omega$  为刀盘转速,  $\text{r}/\text{min}$ 。

铲斗尺寸设计时, 宽度尺寸需保证铲刀安装空

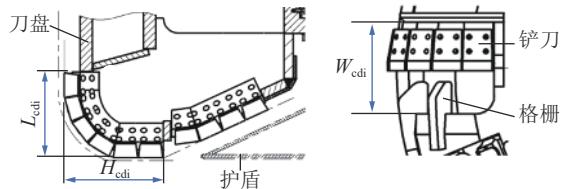


图 7 铲斗结构尺寸

Fig.7 Diagram of bucket structure dimension

间, 且不宜过宽, 防止大块岩块进入砸坏运输机, 必要时还需焊接格栅限制进渣粒径, 一般近似为铲刀长度的 2 倍, 铲斗宽度尺寸则受刀盘盘体厚度和护盾结构限制决定, 在确定铲斗宽度和高度尺寸后, 最终根据式(2)和式(3)计算确定长度尺寸, 保证刀盘以最优速度掘进时, 能够满足排渣要求。

## 2.5 方案生成

白龙山煤矿一井瓦斯治理巷道直径要求  $\phi 4.2 \text{ m}$ , 刀盘初始方案根据上文刀间距、刀具布局和出渣结构等综合确定。为保证 TBM 施工过程中刀盘具有更好的抗冲击性和开挖面稳定性, 采用平面盘体结构, 同时为满足煤矿巷道运输要求, 刀盘可采用二分块结构形式, 运送至组装硐室再焊接为整体。

由于该煤矿巷道岩石强度不高, 且地层单一, 为提升掘进效率, 刀盘设计考虑采用 10 mm 贯入度进行开挖施工, 根据上文分析可知, 该贯入度条件下可使刀间距 100 mm 相邻滚刀间岩体贯通破碎。受滚刀结构尺寸限制, 刀盘中心采用双联滚刀, 刀间距选取为 101.5 mm, 能够满足岩体破碎要求。正面及边缘由于刀具安装半径大, 相比中心滚刀切削距离更长, 磨损更快, 为保证刀盘整体的破岩效率, 正面区域采用单螺旋线布置形式, 刀间距适当加密, 选取 80 mm, 边缘滚刀刀间距则逐步过渡减小。刀盘滚刀总数量 23 把, 其中中心双联滚刀 4 把, 单刃滚刀 19 把, 总切削刃数量为 27 刀。巷道施工中 TBM 转弯时, 可采用边滚刀刀座安装垫块方式满足扩挖需求<sup>[23]</sup>。

刀盘采用 4 个铲斗均匀设置, 宽度尺寸均取 500 mm, 铲斗长度尺寸取 660 mm, 为避免与滚刀干涉, 4 个铲斗设置为三短一长, 短铲斗的长度尺寸为 450 mm, 长铲斗长度尺寸为 570 mm。当取最大推进速度 100 mm/min, 刀盘转速 5 r/min 时, 根据式(2)和式(3)计算得到刀盘需要运输的岩渣方量为  $110.8 \text{ m}^3/\text{h}$ , 铲斗可运输的岩渣方量为  $185 \text{ m}^3/\text{h}$ , 满足出渣要求。在盘体结构、刀具布置、铲斗布置及尺寸均确定之后, 再布置人孔和泡沫喷嘴, 形成初始刀盘方案(图 8)。

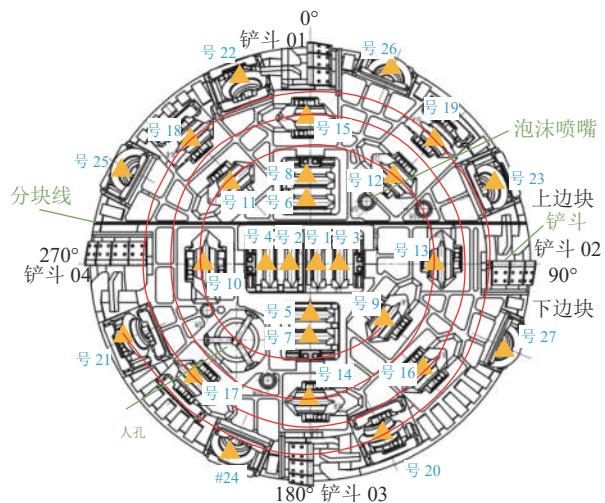


图 8 刀盘初始方案示意

Fig.8 Schematic diagram of initial scheme of cutterhead

### 3 刀盘力学性能校核

TBM 刀盘工作过程中, 刀盘受到倾覆力矩、不平衡力、强度及刚度等力学性能主要由滚刀破岩受载决定。滚刀破岩过程中将受到垂直力、滚动力和侧向力, 其中垂直力和滚动力预测以科罗拉多矿业学院提出的 CSM 模型最具代表性, 该公式基于大量实验研究建立, 其表达式如下:

$$F_v = C \frac{TR\varphi}{1+\psi} \sqrt{\frac{S\sigma_c^2\sigma_t}{\varphi\sqrt{RT}}} \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (4)$$

$$F_r = C \frac{TR\varphi}{1+\psi} \sqrt{\frac{S\sigma_c^2\sigma_t}{\varphi\sqrt{RT}}} \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (5)$$

式中:  $F_v$  为滚刀垂直力, N;  $F_r$  为滚刀滚动力, N;  $C$  为常系数, 取值 2.12;  $T$  为滚刀刀尖宽度, mm;  $R$  为滚刀半径, mm;  $\varphi$  为刀岩接触角, rad,  $\varphi = \arccos[(R-p)/R]$ ;  $p$  为滚刀贯入度, mm;  $\psi$  为刀尖压力分布常数, 取值  $-0.2 \sim 0.2$ ;  $\sigma_c$  为岩石单轴抗压强度, MPa;  $\sigma_t$  为岩石抗拉强度, MPa;  $S$  为滚刀刀间距, mm。

根据文献 [24] 可知, 由于滚刀安装半径较小, 刀具旋转过程中挤压破碎刀刃内侧岩石将受到较大侧向力, 且滚刀安装半径越小, 侧向力越大, 其表达式为:

$$F_s = \frac{\sigma_t R p (2R - p) \arccos \varphi}{2\rho_s} \quad (6)$$

式中:  $F_s$  为滚刀侧向力;  $\sigma_t$  为岩石剪切强度;  $\rho_s$  为滚刀安装半径。

根据上述滚刀三向力计算公式 (式(4)一式(6)), 以及滚刀布局参数, 便可以进一步求解初始刀盘方案的倾覆力矩、不平衡力, 再校核刀盘强度和刚度,

最终确定刀盘方案。

#### 3.1 倾覆力矩

刀盘倾覆力矩是指工作过程中滚刀破岩和刀盘重力引发的力矩矢量和, 主要考察刀盘绕水平轴线倾覆的可能性, 由滚刀破岩引起的倾覆力矩  $M_c$  和刀盘总倾覆力矩  $M$  表达式<sup>[25]</sup> 为:

$$M_c = \sum_{j=1}^l [F_{v,j}\rho_{s,j}\sin(\theta_{s,j} + \varphi_D)\cos\alpha_{s,j} + F_{s,j}\rho_{s,j}\sin(\theta_{s,j} + \varphi_D)\sin\alpha_{s,j}] \quad (7)$$

$$M = M_c + M_D \quad (8)$$

式中:  $F_{v,j}$  为第  $j$  号滚刀垂直力, N;  $F_{s,j}$  为第  $j$  号滚刀侧向力, N;  $\rho_{s,j}$  第  $j$  号滚刀安装半径, mm;  $\theta_{s,j}$  为第  $j$  号滚刀安装角度, (°);  $\alpha_{s,j}$  为第  $j$  号滚刀的安装倾角, (°);  $\varphi_D$  为刀盘滚刀总数;  $\varphi_D$  刀盘转动角度, (°);  $M_D$  为刀盘重力引起的倾覆力矩, N·mm,  $M_D = G_D S_D$ ;  $G_D$  刀盘重力, N;  $S_D$  刀盘质心离刀盘与主轴承结合面的距离, mm。

由式(7)和式(8)计算得到滚刀破岩引起的倾覆力矩和刀盘总倾覆力矩如图 9 所示, 滚刀破岩引起的倾覆力矩  $M_c$  最大值为 523.28 kN·m, 刀盘总倾覆力矩为 946.53 kN·m, 由滚刀破岩引起的倾覆力矩最大值为总倾覆力矩的 55.3%, 与刀盘重力引起的力矩值相当。

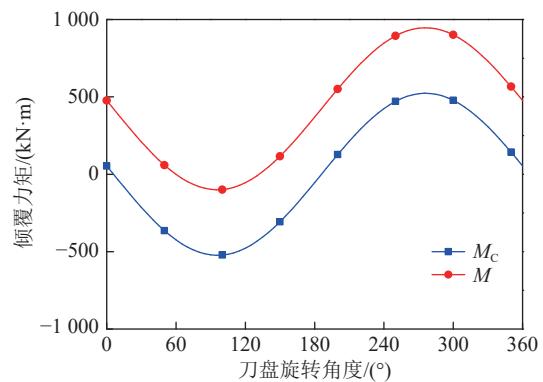


图 9 刀盘倾覆力矩图

Fig.9 Diagram of cutterhead overturning moment

#### 3.2 不平衡力

刀盘不平衡力是由滚刀载荷引起的水平和竖直方向载荷的矢量和, 刀盘上滚刀破岩引起的水平方向不平衡力  $F_{Cx}$  和竖直方向不平衡力  $F_{Cy}$  的表达式为<sup>[25]</sup>:

$$F_{Cx} = \sum_{j=1}^l [F_{s,j}\cos\alpha_{s,j}\cos(\theta_{s,j} + \varphi_D) + F_{r,j}\sin(\theta_{s,j} + \varphi_D) + F_{e,j}\cos(\theta_{s,j} + \varphi_D)] \quad (9)$$

$$F_{CY} = \sum_{j=1}^l [F_{sj} \cos \alpha_{sj} \sin(\theta_{sj} + \varphi_D) - F_{rj} \cos(\theta_{sj} + \varphi_D) + F_{ej} \sin(\theta_{sj} + \varphi_D)] \quad (10)$$

式中:  $F_{si}$  为第  $j$  号滚刀侧向力,  $N$ ;  $F_{rj}$  为第  $j$  号滚刀滚动力,  $N$ ;  $F_{ej}$  为第  $j$  号滚刀牵连惯性力,  $N$ ,  $F_{ej} = m_c \omega^2 \rho_{sj}$ ,  $m_c$  为滚刀重量,  $N$ 。

由式(9)和式(10)计算得到滚刀破岩引起的水平方向不平衡力和竖直方向不平衡力如图 10 所示, 滚刀破岩引起的水平方向不平衡力  $F_{CX}$  和竖直方向不平衡力  $F_{CY}$  最大值均为 78.12 kN, 仅为由刀盘自重产生的竖直方向不平衡力 455 kN 的 17.2%。

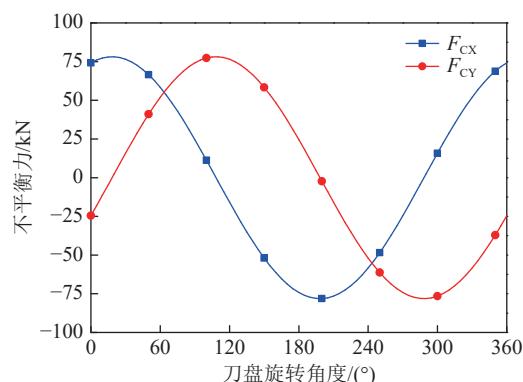


图 10 刀盘不平衡力图  
Fig.10 Diagram of cutterhead unbalance force

### 3.3 强度及刚度

在完成刀盘初始方案的倾覆力矩与不平衡力校核后, 进一步开展刀盘盘体强度及刚度校核, 刀盘盘体三维结构如图 11 所示。刀盘有限元模型划分选择 4 面体网络, 为保证网格尺寸划分的合理性, 建立 3 种网格模型, 网格划分精度依次递增, 分析标准工况下不同网络精度对最大应力的影响, 具体见表 2。

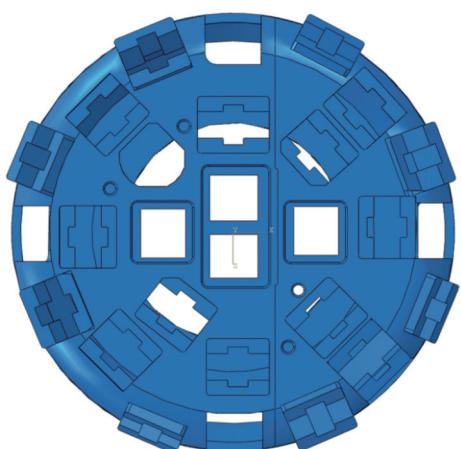


图 11 刀盘盘体三维结构  
Fig.11 Three dimensional structure of cutterhead body

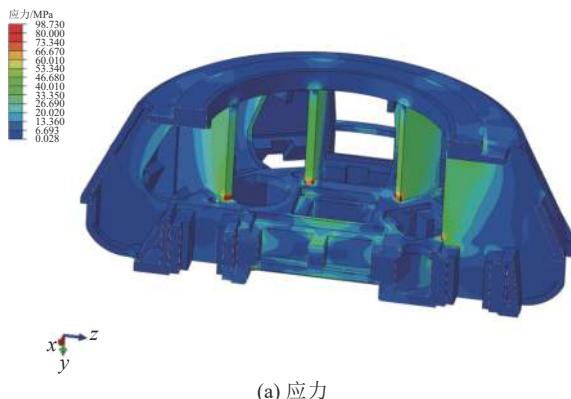
表 2 不同网格精度下刀盘最大应力  
Table 2 Maximum stress of cutterhead under different grid accuracy

网格模型	网格数量/万	最大应力/MPa
模型1	20	92.31
模型2	35	98.73
模型3	70	97.84

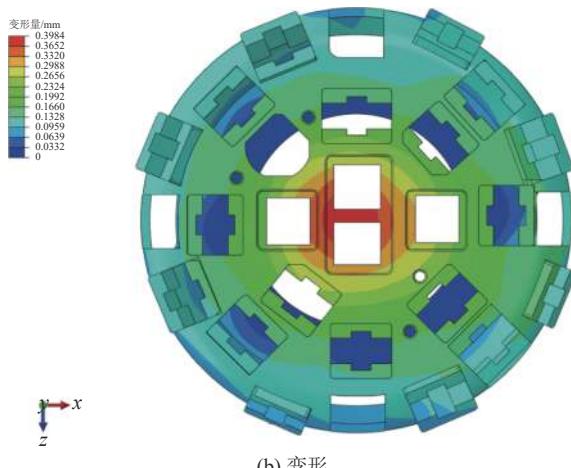
随着网格划分精度增加, 刀盘最大应力值趋于接近, 模型 2 和模型 3 计算误差是 0.9%。故在保证计算精度的情况下, 为提高计算效率, 确定刀盘有限元划分的网格数量为 35 万个单元。

由于煤矿巷道地层通常较为均一, 刀盘出现偏载的情况较少, 因而重点校核其标准负载和脱困工况情况下结构强度及刚度性能。

标准负载工况假定所有刀具均参与掘进, 刀盘均匀承受来自主驱动施加的满推力和转矩。在每把滚刀上施加最大推力, 同时将额定扭矩转化为滚刀滚动力施加在刀座侧板上, 此时刀盘应力及变形如图 12 所示。



(a) 应力



(b) 变形

图 12 标准负载工况刀盘应力及变形云图  
Fig.12 Nephogram of cutterhead stress and deformation under standard load condition

脱困模式可视为刀盘铲斗被岩石卡住的情况,在额定扭矩输出下有可能无法转动刀盘,需要通过短时间内加大主驱动扭矩驱使刀盘转动。假设刀盘卡住不动,刀盘上的滚刀承受一定的推力,主驱动输出脱困扭矩,作用于4个铲斗上,此时刀盘应力及变形如图13所示。

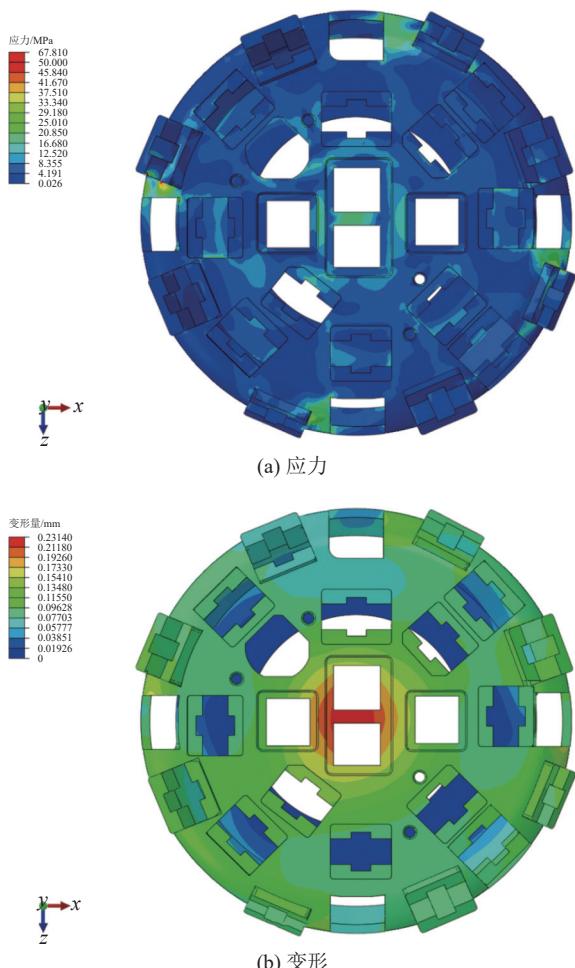


图13 脱困工况刀盘应力及变形云图

Fig.13 Nephogram of cutterhead stress and deformation under extrication condition

根据分析可知,标准负载工况下刀盘最大应力出现在刀盘支撑筋板与背板的焊接处,大小为99 MPa;主要变形方向沿刀盘掘进方向,最大变形量约为0.4 mm,相对于刀盘整体厚度(约1 500 mm)的应变量约为0.027%。在脱困工况下,刀盘最大应力为68 MPa;主要变形方向沿刀盘圆周方向,沿掘进方向变形非常小,最大变形量约为0.23 mm。由此可知,标准负载和脱困工况下,刀盘强度和刚度均有较大冗余量,满足设计要求。

经校核刀盘初始方案力学性能,均符合设计要求,故确定该方案为最终设计方案。

## 4 结 论

1)分析了煤矿瓦斯治理巷TBM刀盘设计需求,总结了刀盘一般设计流程,主要包括盘体结构、刀具布置、出渣结构3部分。盘体结构设计重点考虑结构强度性能、抗冲击性能、开挖面稳定性及煤巷巷道运输要求;刀具布置应针对煤巷岩体地质条件合理选取刀间距,考虑小直径刀盘布置空间限制,宜选取单螺旋线布置方法;出渣结构尺寸需满足排渣性能需求,均布于刀盘外周。

2)开展了刀盘结构详细方案设计,通过对TBM刀盘力学性能分析可知,最大倾覆力矩为946.53 kN·m,其中由刀具产生的倾覆力矩为523.28 kN·m,占比为55.3%;刀具产生的水平与竖直不平衡力最大值为78.12 kN,仅为刀盘重力产生的竖直不平衡力的17.2%;刀盘最大应力为99 MPa,最大变形为0.4 mm,相当于刀盘整体厚度应变量约为0.027%;力学性能分析结果表明该刀盘设计符合要求。

3)由于项目TBM掘进地层为粉砂质泥岩,加之地层中含水,泥岩遇水软化,风化过程快,导致泥岩糊刀盘情况出现,进而引发刀盘扭矩增加、刀具异常损坏、开挖面温度增加等问题。针对TBM刀盘喷水(泡沫)系统注入口数量配置和布置设计还有待进一步研究,以防止掘进时刀盘“结泥饼”。

## 参考文献(References):

- [1] 徐腾飞,王学兵.近十年我国低瓦斯煤矿瓦斯爆炸事故统计与规律分析[J].矿业安全与环保,2021,48(3):126-130.  
XU Tengfei, WANG Xuebing. Statistics and regularity analysis of gas explosion accidents in domestic low-gas coal mines in recent ten years[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(3): 126-130.
- [2] 王杜娟,贺飞,王勇,等.煤矿岩巷全断面掘进机(TBM)及智能化关键技术[J].煤炭学报,2020,45(6):2031-2044.  
WANG Dujuan, HE Fei, WANG Yong, et al. Tunnel boring machine (TBM) in coal mine and its intelligent key technology[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2031-2044.
- [3] 刘泉声,黄兴,潘玉丛,等.TBM在煤矿巷道掘进中的技术应用和研究进展[J].煤炭科学技术,2023,51(1):242-260.  
LIU Quansheng, HUANG Xing, PAN Yucong, et al. Application and research progress of TBM tunneling in coal mine roadway[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 242-260.
- [4] 代恩虎,王勇,鲁义强,等.云贵地区煤矿建设中TBM施工技术应用研究[J].煤炭科学技术,2022,50(10):10-18.  
DAI Enhu, WANG Yong, LU Yiqiang, et al. Application and study of TBM construction technology for coal mine construction in Yunnan and Guizhou Provinces[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(10): 10-18.
- [5] GENG Qi, ZHANG Huijian, LIU Xiaohui, et al. Numerical study on the rock muck transfer process of TBM cutterhead with clump

- strategy based on discrete element method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 91: 103000.
- [6] 刘志杰, 滕弘飞, 史彦军, 等. TBM 刀盘设计若干关键技术[J]. *中国机械工程*, 2008(16): 1980–1985.
- LIU Zhijie, TENG Hongfei, SHI Yanjun, *et al.* Cutterhead design key issues of a full face rock tunnel boring machine(TBM) [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008(16): 1980–1985.
- [7] ROSTAMI Jamal, CHANG Soo-Ho. A closer look at the design of cutterheads for hard rock tunnel-boring machines[J]. *Engineering*, 2017, 3(6): 892–904.
- [8] 程永亮, 钟掘, 暨智勇, 等. TBM 刀盘地质适应性设计方法及其应用[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(1): 1–9.
- CHENG Yongliang, ZHONG Jue, JI Zhiyong, *et al.* Geological adaptative design method and application of TBM cutterhead[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(1): 1–9.
- [9] 霍军周, 史彦军, 滕弘飞, 等. 全断面岩石掘进机刀具布置设计方法[J]. *中国机械工程*, 2008(15): 1832–1836.
- HUO Junzhou, SHI Yanjun, TENG Hongfei, *et al.* Cutter layout design of full-face rock tunnel boring machine(TBM) [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008(15): 1832–1836.
- [10] 郭伟, 孙红艳, 刘建琴, 等. 基于 TBM 刀盘剖面轮廓的滚刀极径优化布置设计[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2016, 49(12): 1303–1311.
- GUO Wei, SUN Hongyan, LIU Jianqin, *et al.* Optimal layout design for disc cutters' assembled radii based on TBM cutterhead profile[J]. *Journal of Tianjin University( Science and Technology)*, 2016, 49(12): 1303–1311.
- [11] 郭伟, 刘小庆, 刘建琴, 等. 基于破岩比能的刀盘滚刀优化布置设计[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(2): 242–247, 253.
- GUO Wei, LIU Xiaoqing, LIU Jianqin, *et al.* Optimized layout design for cutterhead's disc cutters based on rock-breaking specific energy[J]. *Journal of Northeastern University( Natural Science)*, 2018, 39(2): 242–247, 253.
- [12] 刘建琴, 邢振华, 宾怀成, 等. 复合岩层地质下硬岩隧道掘进机滚刀布局方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(1): 166–173.
- LIU Jianqin, XING Zhenhua, BIN Huaicheng, *et al.* Cutters' layout method of tunnel boring machine cutter-head under mixed-face rock ground[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2019, 53(1): 166–173.
- [13] 刘亚迪, 齐文聪, 刘浩飞, 等. 多滚刀协同破岩过程数值模拟与滚刀布置规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(5): 232–244.
- LIU Yadi, QI Wencong, LIU Haofei, *et al.* Numerical simulation of cooperative breaking rock by multi-cutter and research on the layout law of disc cutter on cutterhead[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(5): 232–244.
- [14] 谭青, 李建芳, 夏毅敏, 等. 盘形滚刀破岩过程的数值研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(9): 2707–2714.
- TAN Qing, LI Jianfang, XIA Yimin, *et al.* Numerical research on rock fragmentation process by disc cutter[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(9): 2707–2714.
- [15] 谭青, 易念恩, 夏毅敏, 等. TBM 滚刀破岩动态特性与最优刀间距研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(12): 2453–2464.
- TAN Qing, YI Nianen, XIA Yimin, *et al.* Research on rock dynamic fragmentation characteristics by TBM cutters and cutter spacing optimization[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(12): 2453–2464.
- [16] 林赉帆, 夏毅敏, 贾连辉, 等. TBM 边缘滚刀组合破岩特性及其影响因素敏感性评价[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(1): 18–26.
- LIN Laikuang, XIA Yimin, JIA Lianhui, *et al.* Rock-breaking characteristics of TBM gage disc cutters and sensitivity analysis of their influencing factors[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(1): 18–26.
- [17] 刘立鹏, 汪小刚, 刘海舰, 等. TBM 滚刀破岩机理与影响因素数值模拟研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2017, 15(5): 346–353, 359.
- LIU Lipeng, WANG Xiaogang, LIU Haijian, *et al.* Numerical simulation research on rock Breakage mechanism and influence TBM cutters[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2017, 15(5): 346–353, 359.
- [18] 赵振威, 郑康泰, 李楠, 等. 不同几何结构的 TBM 刀盘静力学性能对比分析[J]. *隧道建设*, 2016, 36(1): 102–107.
- ZHAO Zhenwei, ZHENG Kangtai, LI Nan, *et al.* Analysis on static mechanical performances of TBM cutterhead with different geometries[J]. *Tunnel Construction*, 2016, 36(1): 102–107.
- [19] 曾文宇, 管会生, 宋颖鹏, 等. 煤矿斜井双模式盾构刀盘的受力特性研究[J]. *工程设计学报*, 2017, 24(1): 77–82.
- ZENG Wenyu, GUAN Huisheng, SONG Yingpeng, *et al.* Study on stress characteristics of cutter head of dual-mode shield machine used for inclined shaft of colliery[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2017, 24(1): 77–82.
- [20] 荆留杰, 张娜, 杨晨, 等. 基于最小破碎比能 TBM 滚刀间距设计方法研究[J]. *铁道学报*, 2018, 40(12): 123–129.
- JING Liujie, ZHANG Na, YANG Chen, *et al.* A design method research on TBM face cutter spacing layout based on minimum specific energy[J]. *Journal of The China Railway Society*, 2018, 40(12): 123–129.
- [21] 石崇, 张强, 王盛年. 颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 262–286.
- SHI Chong, ZHANG Qiang, WANG Shengnian. Numerical simulation technology and application with particle flow code(PFC5.0) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018: 262–286.
- [22] YANG Mei, XIA Yimin, LIN Laikuang, *et al.* Optimal design for buckets layout based on muck removal analysis of TBM cutterhead[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(6): 1729–1741.
- [23] 吕建乐. TBM 扩挖方式及其对比分析[J]. *隧道建设(中英文)*, 2021, 41(6): 1058–1064.
- LYU Jianle. Comparison and analysis of tunnel boring machine overcutting methods[J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(6): 1058–1064.
- [24] XIA Yimin, TIAN Yanchao, TAN Qing, *et al.* Side force formation mechanism and change law of TBM center cutter[J]. *Journal of Central South University*, 2016, 23: 1115–1122.
- [25] 夏毅敏, 吴才章, 兰浩, 等. 典型 TBM 刀盘力学性能分析与对比[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(8): 1136–1142.
- XIA Yimin, WU Caizhang, LAN Hao, *et al.* Mechanical performance analysis and comparison of typical TBM cutterhead[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(8): 1136–1142.