

新型盾构机刀盘结构设计及应用

肖滨

(中国铁建重工集团股份有限公司 湖南 长沙 410400)

摘要: 针对岩石抗压强度高、破碎带多、地质情况差异大的复杂隧道,结合盾构机和 TBM 刀盘的结构特点,设计一种新型盾构机刀盘。为了研究新型盾构机刀盘结构的合理性,分析了刀盘的结构受力特性。将刀盘施工作业分为标准负载工况、1/3 偏心负载工况、不均匀负载工况和脱困工况,利用 ANSYS 软件对刀盘体进行相关结构受力特性分析,得到结论如下:刀盘四种工况下的最大应力值出现在 1/3 偏心负载工况,最大应力值为 241.6MPa,位于支腿与刀盘背板交接处,此处设计钢板厚度为 90mm,其屈服强度许用应力值 $[\sigma_s] \geq 254\text{MPa}$,大于分析结果 241.6MPa;最大变形出现在 1/3 偏心负载工况,最大变形量约为 2.38mm,整体变形较小,刀盘的强度和刚度都满足设计要求。最后根据实际应用效果,为今后盾构掘进机的刀盘选型与设计提供了参考。

关键词: 盾构机;刀盘;ANSYS;有限元分析

0 引言

近年来,随着隧道建设的广泛开展,不同类型的掘进机,如盾构机、TBM(硬岩掘进机)等得到广泛的应用^[1-3]。以某矿山隧道为例,矿区隧道岩石抗压强度高、破碎带多、地质情况差异大,不同地层之间的岩层特性具有显著差异,常用的盾构掘进机、TBM 等难以满足矿区复杂多变地层的施工需求。针对矿区实际情况,决定采用双模式掘进机,该机型可根据隧道地层情况的变化,采用不同的模式进行掘进。本文详细介绍了一种新型双模式盾构机刀盘结构设计,并利用 ANSYS 软件对其进行有限元分析。

目前,双模式刀盘都是在盾构刀盘和 TBM 刀盘之间进行结构转换,综合两者特点的刀盘结构设计很少。刘伟等^[4]基于一种 EPB&TBM 双模式刀盘,详细介绍了刀盘结构组成和设计特点,并进行了有限元分析。周阳宗等^[5]对某型盾构机刀盘进行了应力变形和振动特性分析,并对刀盘结构进行优化改进。刘西科等^[6]对 TBM 刀盘在三种极限工作状态下,利用有限元进行模拟计算,得出刀盘在工作时强度与刚度的薄弱位置,并指出改进方向。现有的研究大多集中在单一的盾构刀盘结构分析或者 TBM 刀盘结构分析,缺少结合两种刀盘结构特点的新型刀盘结构设计以及静力学受力分析。

本文详细介绍新型盾构刀盘结构设计并利用 ANSYS 软件对刀盘进行有限元分析^[7,8]。将刀盘施

工工况分为标准负载工况、1/3 偏心负载工况、不均匀负载工况和脱困工况,对其进行静力学分析,验证刀盘结构的合理性和实际应用效果,为今后盾构掘进机的刀盘选型与设计提供了参考。

1 工程概况

隧道全长 15km,整体呈环线布置,隧道进、出口段,以强、中风化凝灰岩、微风化千枚岩、微风化英安岩为主,饱和抗压强度超过 60MPa,其中存在多条断层破碎带。

2 刀盘总体设计

针对长距离硬岩复合地质隧(图 1)道,首先考虑的是刀盘的破岩能力和刀盘结构的强度和刚度。针对夹杂多条断裂带的复杂地层,重点考虑的是刀盘面板能够对隧道开挖面起到有效的机械支承,减少对地层的扰动;此外,还需要避免在破碎带地层掘进时出现刀盘卡壳的风险。

因此,在设计刀盘结构时,创新性地结合盾构刀盘和 TBM 刀盘结构特点,采用整体面板+法兰支腿的结构形式。对比传统盾构的辐条结构设计形式,整体面板结构不仅能够加强刀盘体结构的整体结构强度,而且能够对隧道开挖面起到有效的支承作用,减少对地层的扰动;采用法兰支腿的结构形式,则可以配合螺旋机出渣,从而有效避免穿越破碎带地层时可能会出现刀盘卡壳、皮带机堵塞等风险。

2.1 刀盘钢结构设计

如图 2 所示，刀盘基体部分整体呈扁平式，采用整体面板 + 法兰支腿相结合的结构形式。刀盘采用厚面板整体制作，只在刀箱和外周铲斗位置进行了开孔，尽可能保证面板的整体性，提高刀盘对掌子面的支承性能。面板与大圆环之间采用圆弧过渡板连接过渡，减少对隧道周边的扰动，同时面板、大圆环与支撑筋板、辐条板等零件焊接成整体，提高刀盘基体结构的稳定性和强度。支腿为箱型焊接结构，尾端与大法兰相连，通过增加环形连接板、三角筋板等方式加强支腿与大法兰之间的强度和刚度；支腿前端直接嵌入刀盘基体与面板连接，增强支腿与刀盘基体之间的连接强度，满足刀盘在硬岩地层中掘进时对刀盘整体结构强度和刚度的要求。

2.2 刀具设计

刀盘上安装有滚刀和边缘铲刀。为了增强滚刀和铲刀的使用寿命，对滚刀轴承、刀圈、密封以及铲刀刀刃耐磨性能都作了针对性加强设计。刀盘开挖直径 $\phi 6470\text{mm}$ ，共配置有 46 把滚刀，其中 4 把中心双联滚刀（17 寸），25 把正面滚刀（19 寸），13 把边缘滚刀（19 寸）。正面滚刀刀间距为 75mm，边缘滚刀刀间距由内向外逐渐减小，合理的刀间距配置能够适应全断面硬岩的开挖。刀盘配置 19 寸的滚刀不仅可以提高刀盘的破岩能力，而且可以更好适应长距离硬岩隧道的掘进需求。

3 刀盘有限元分析

分析刀盘大圆环直径 $\phi 6240\text{mm}$ ，为了检测刀盘

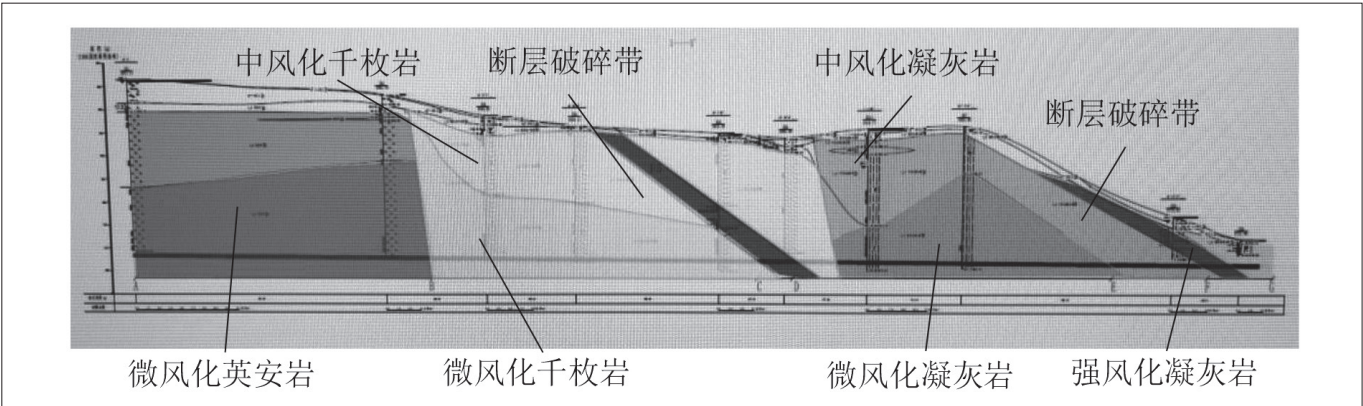


图 1 地质剖面图

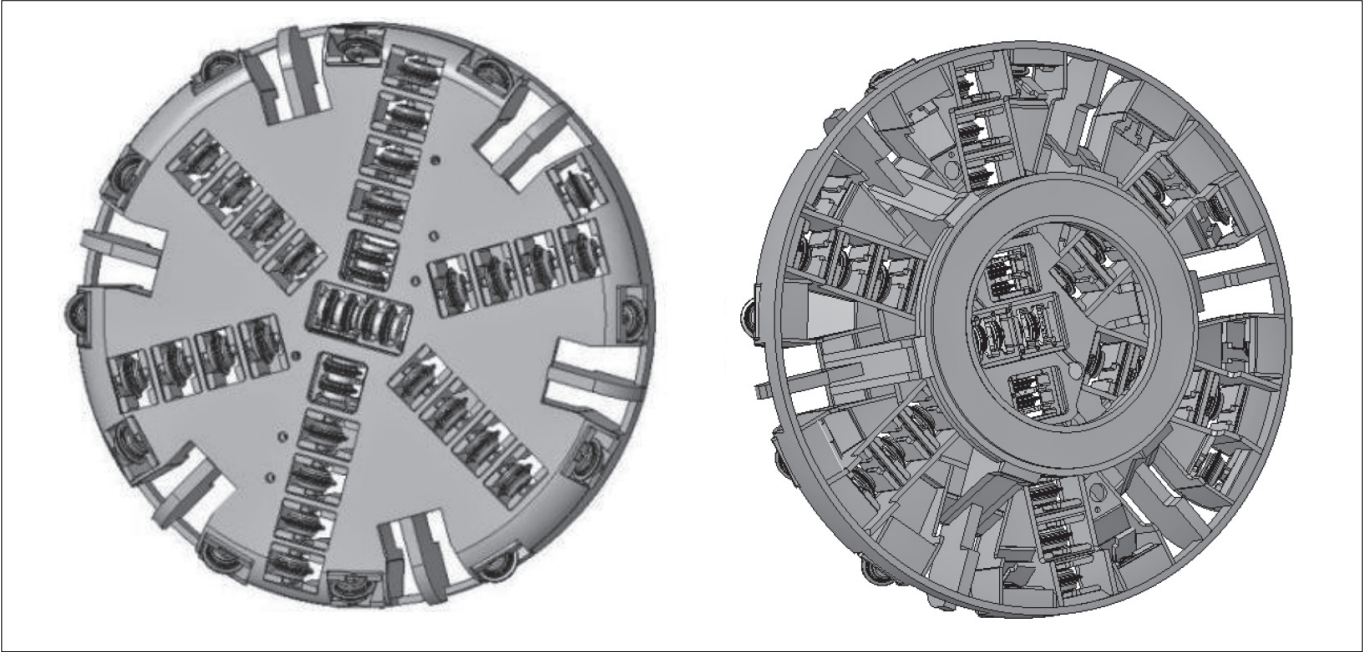


图 2 刀盘三维结构图

体结构的整体刚性和强度是否满足项目掘进需求,结合刀盘掘进过程中会遇到的四种常见情况对刀盘进行静力学分析:

(1) 标准负载工况,刀盘所有刀具均匀受到额定载荷,主驱动输出额定转矩;

(2) 1/3 偏心负载工况,刀盘约 1/3 数量的刀具(刀盘下部)承受刀盘全部额定推力,主驱动输出额定转矩;

(3) 不均匀负载工况,刀盘 1 把正面刀和 1 把中心双刃刀具承受 3 倍的额定载荷,其余刀具承受额定载荷,主驱动输出额定转矩;

(4) 脱困模式,刀盘正面和外周承受一定的岩层压力,主驱动输出脱困转矩。

3.1 输入条件

主驱动输出转矩:

额定转矩: $M=6770\text{kN}\cdot\text{m}$;

脱困转矩: $M_{\max}=1015\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

每把(刃)滚刀额定载荷为 315kN,中心双刃刀具额定载荷为 630kN,刀具载荷施加在刀座正面上,转矩施加在刀盘大圆环上。

3.2 分析

刀盘结构有限元分析网格划分如图 3 所示,网格单元数约 83 万,设置材料的弹性模量为 $2.06\times 10^{11}\text{Pa}$,泊松比为 0.3。

3.2.1 标准负载

标准负载工况即额定掘进工况,当掘进机在地质均匀稳定的隧道中掘进时,刀盘上配置的所有刀具均能有效参与破岩,每把刀具均承受推进系统施加的掘进推力以及刀盘旋转转矩。在此种工况下,在每个刀座上加载额定轴向载荷 315kN,中心双刃刀座加载额定载荷 630kN,在刀盘大圆环上施加额定转矩 $6770\text{kN}\cdot\text{m}$,固定约束施加在刀盘大法兰上。

分盘有限元分析见图 4,分析

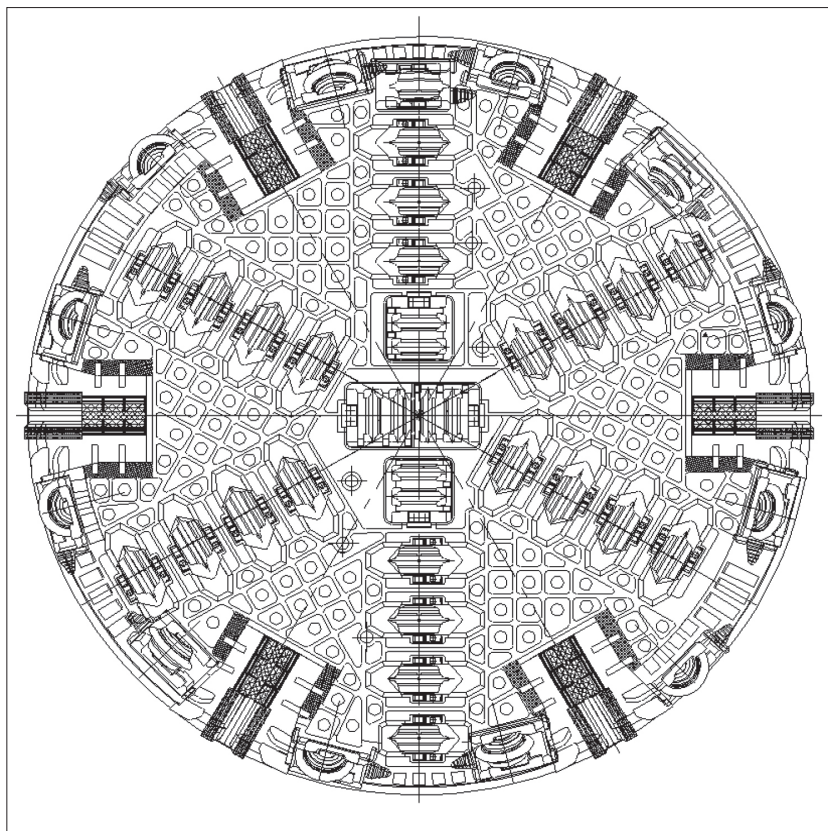


图 3 刀具方案图

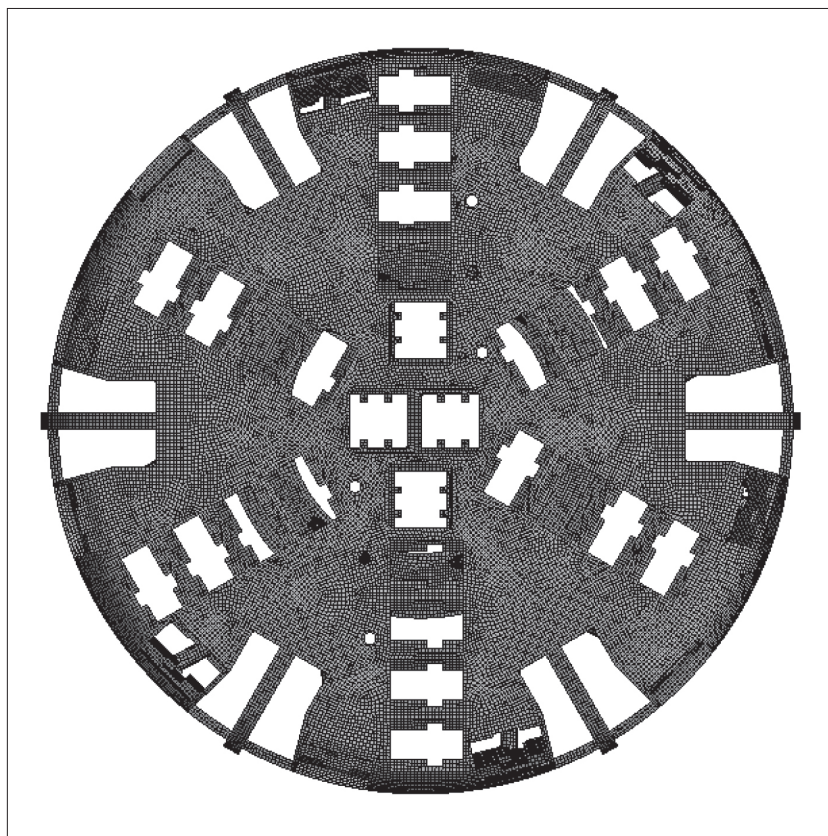


图 4 刀盘有限元分析网格划分

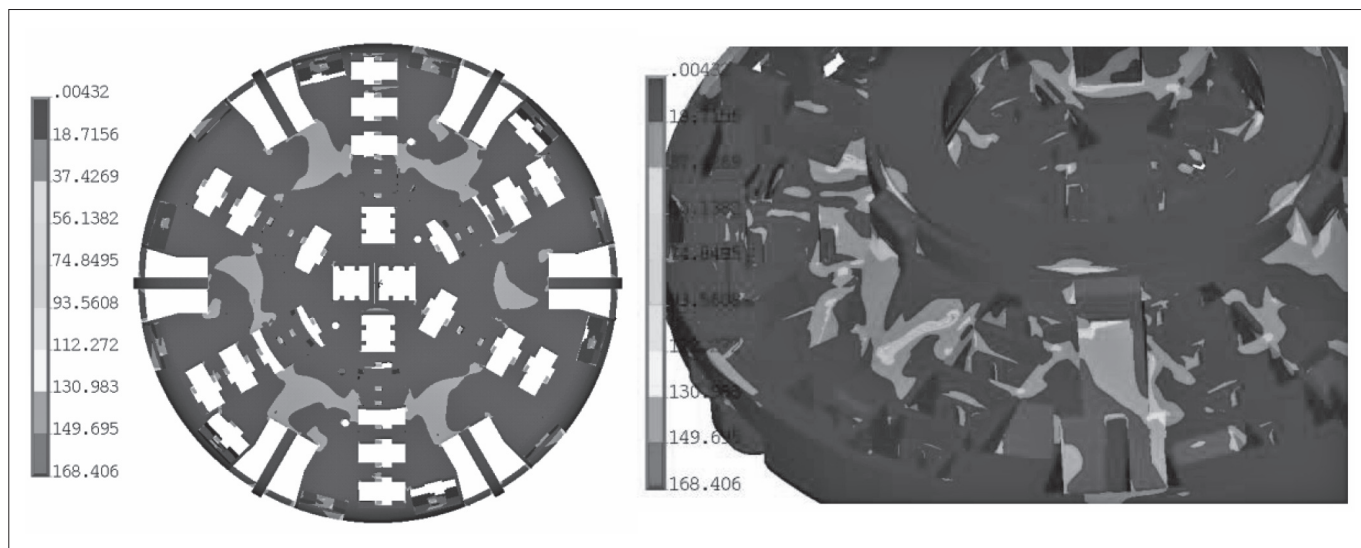


图 5 标准负载正面和背面应力云图

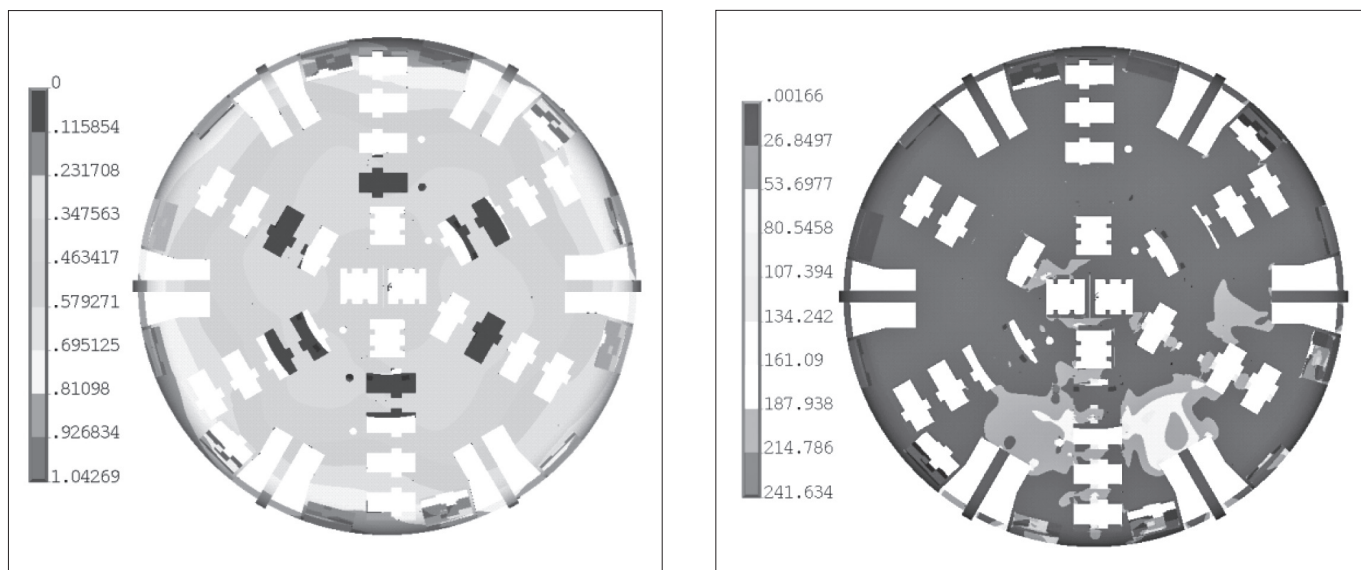


图 6 标准负载刀盘位移云图

结果应力云图见图 5。在标准负载工况下，最大应力位于刀盘支腿与刀盘背板交接处，最大应力值为 168.4MPa。如图 6 所示，刀盘整体总变形量约为 1.04mm，主要位于刀盘边缘处，相对于刀盘厚度（1590mm）的应变量为 0.654‰。

3.2.2 1/3 偏心负载

当隧道中出现上软下硬地质工况时，可能会出现刀盘偏心负载工况即刀盘下部与硬岩地层接触的部分刀具承受大部分甚至全部的掘进推力和刀盘旋转转矩。假设在极端情况下，刀盘下部 1/3 数量的刀具承受 3 倍额定负载，其余刀具处于空载状态，在刀盘外周施加额定转矩，固定约束施加在刀盘大法

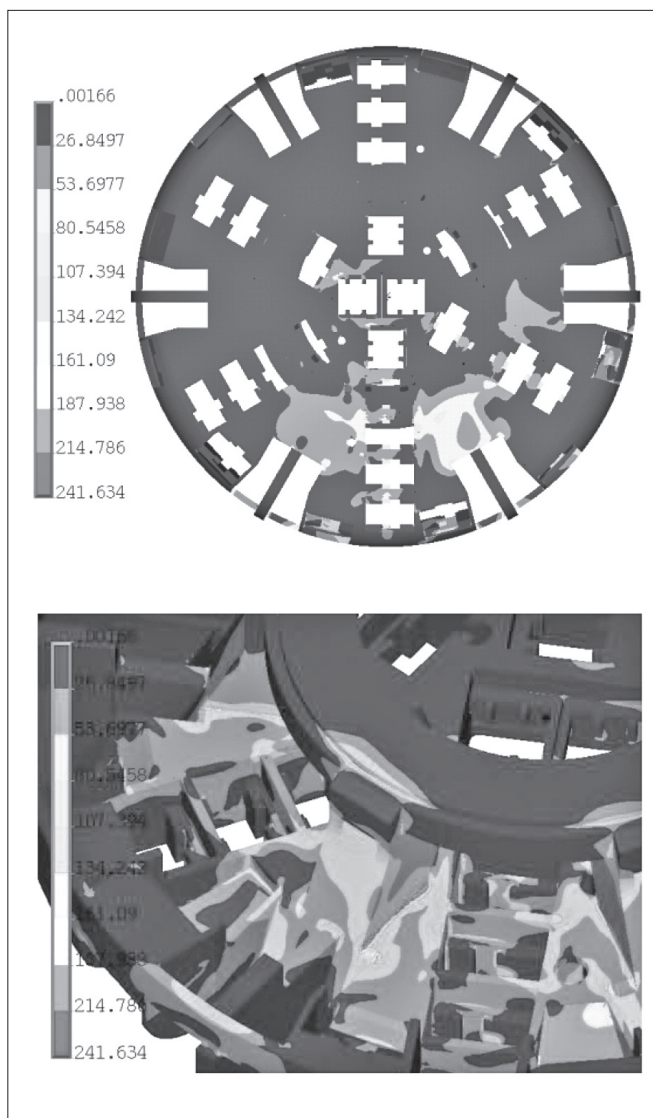


图 7 1/3 偏心负载正面和背面应力云图

兰上。

分析结果应力云图见图7。1/3 偏心负载工况下刀盘最大应力位于支腿与刀盘背板交接处,最大应力值为241.6MPa。如图8所示,刀盘整体总变形量约为2.38mm,主要位于刀盘边缘,相对于刀盘厚度(1590mm)的应变量为1.497‰。

3.2.3 不均匀负载

不均匀负载通常发生在软硬不均匀的地层中。在此种工况下,刀盘上个别刀具承受载荷大于刀具额定载荷。假设在极端情况下,刀盘有1把正面刀具和1把中心双刃刀具承受3倍的刀具额定载荷,其余刀具加载额定载荷,在刀盘外周施加额定转矩,固定约束施加在刀盘大法兰上。

分析结果应力云图见图9。不均匀负载工况下刀盘最大应力位于支腿与刀盘背板交接处,最大应力值为203.4MPa。如图10所示,刀盘整体总变形量约1.04mm,主要位于刀盘边缘处,相对刀盘厚度(1590mm)的应变量为0.654‰。

3.2.4 脱困模式

脱困模式类似于发生在刀盘卡住的情况,在额定转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转矩驱使刀盘转动。假设掌子面塌方岩石在刀盘正面施加4000kN的推力,在刀盘大圆环上周施加2000kN的压力,同时在刀盘外周施加脱困转矩,固定约束施加在刀盘大法兰上。

分析结果应力云图见图11。脱困模式下刀盘最大应力位于大圆环加强筋处,最大应力值为147.9MPa。如图12所示,最大变形量约为1.58mm,主要刀盘边缘处,相对于刀盘厚度(1590mm)的应变量为0.994‰。

3.3 分析结果

以上分析结果汇总见表1。

刀盘四种工况下的最大应力值出现在1/3 偏心负载工况,最大应力值为241.6MPa,位于支腿与刀盘背板交接处,此处设计钢板厚度为90mm,其屈服强度

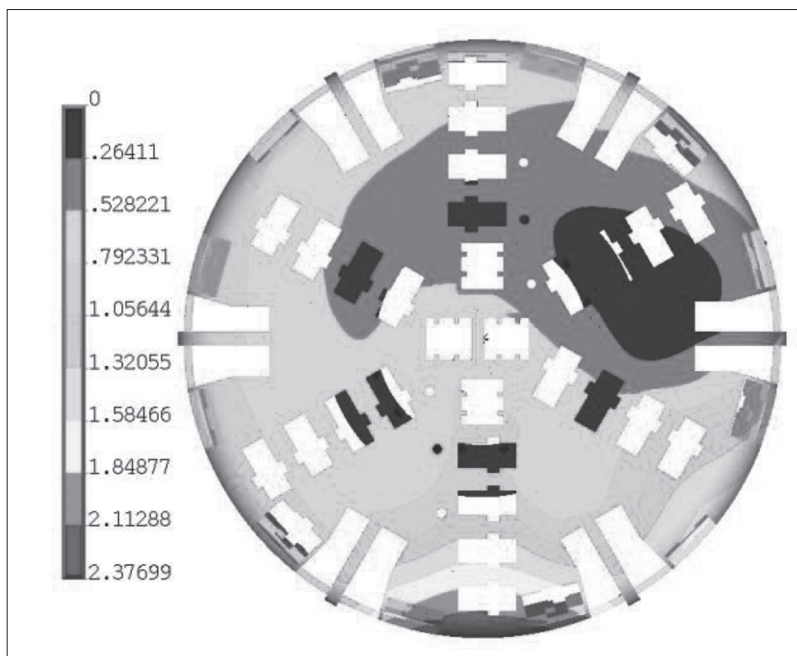


图8 1/3 偏心负载刀盘位移云图

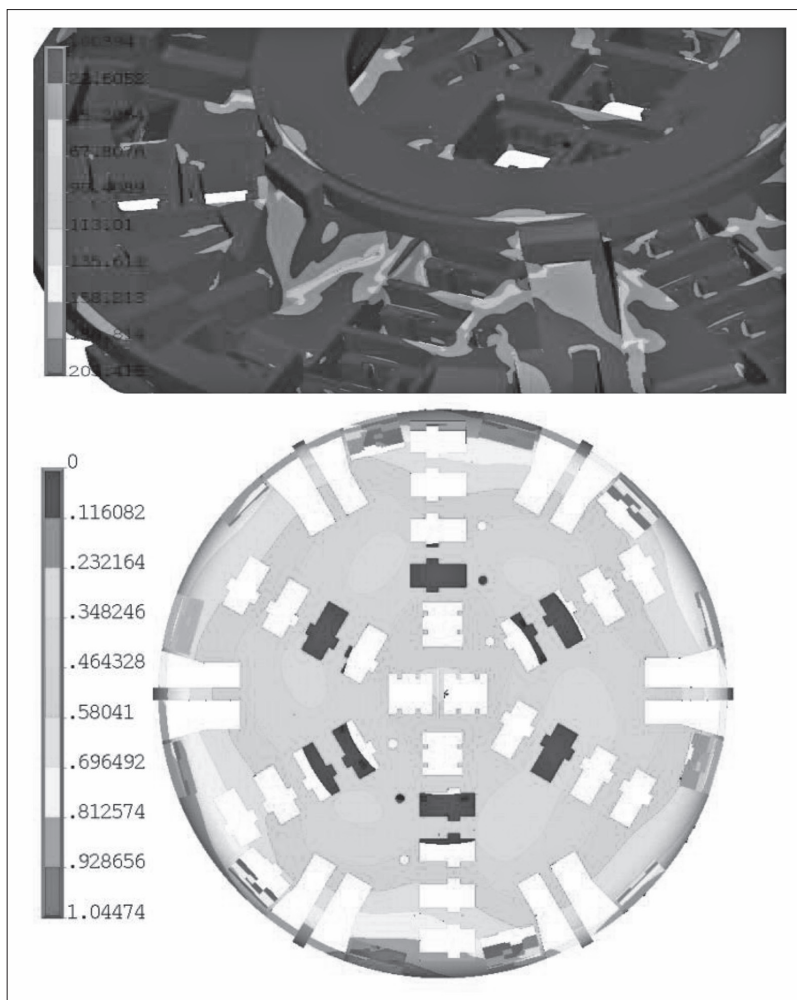


图9 不均匀负载正面和背面位移云图

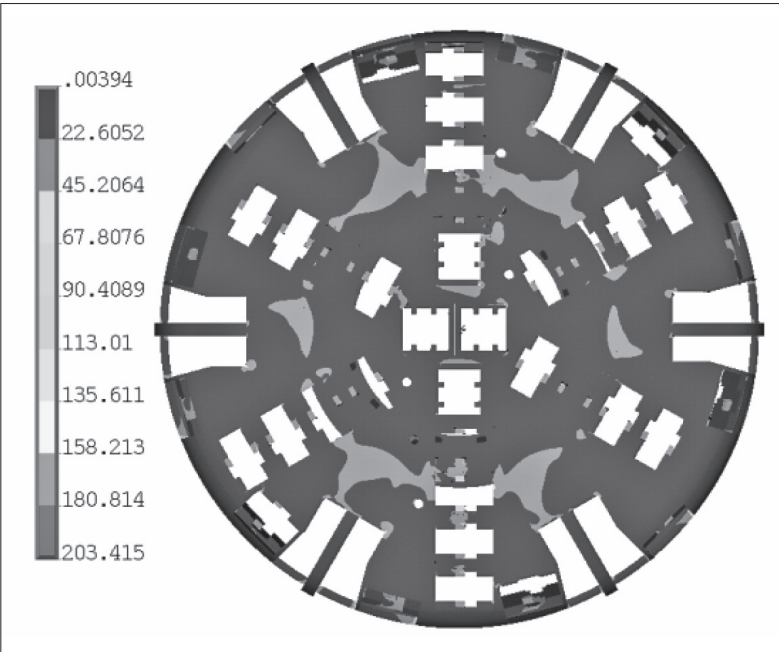


图 10 不均匀负载刀盘位移云图

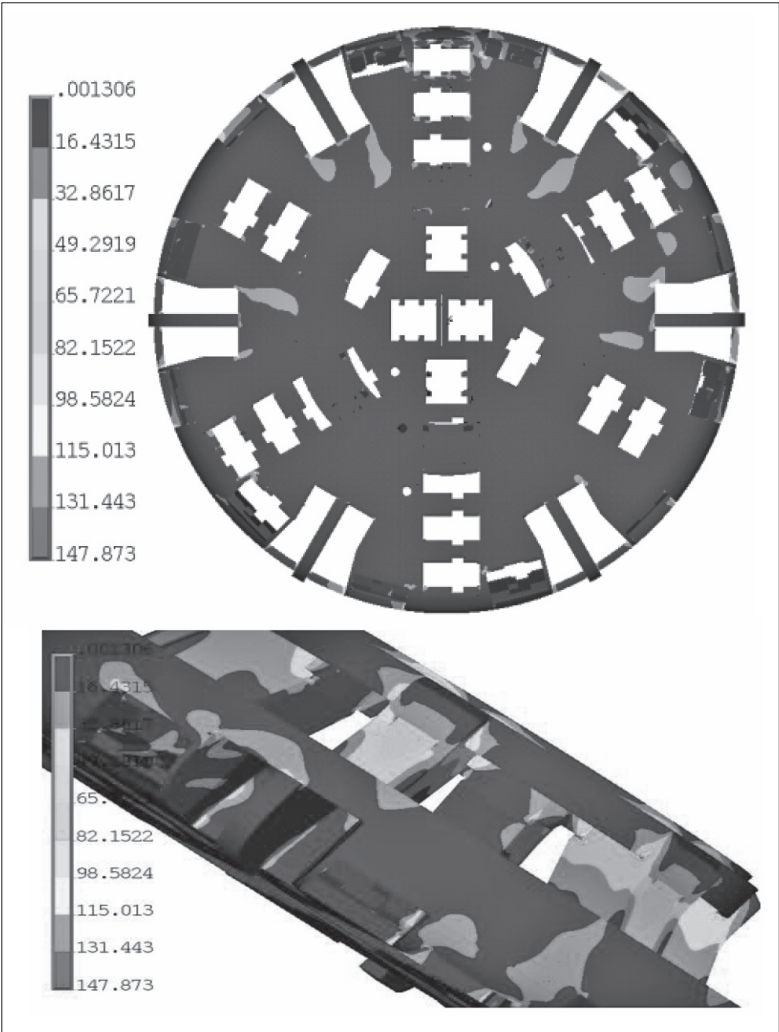


图 11 脱困模式正面和背面应力云图

表 1 刀盘有限元分析结果

参数	工况			
	标准负载工况	1/3 偏心负载工况	不均匀负载工况	脱困模式
最大应力值 /MPa	168.4	241.6	203.4	147.9
最大应力位置	支腿与刀盘背板交接处			大圆环加强筋处
总变形 /mm	1.04	2.38	1.04	1.58
变形率 /‰	0.654	1.497	0.654	0.994

表 2 刀盘掘进参数

贯入度 / (mm/r)	刀盘转速 / (r/min)	掘进速度 / (mm/min)	刀盘推力 /kN	刀盘转矩 / kN·m
3 ~ 7	5 ~ 6	20 ~ 35	9000 ~ 13000	1000 ~ 4500

许用应力值 $[\sigma_s] \geq 254\text{MPa}$ ，大于分析结果 241.6MPa；最大变形出现在 1/3 偏心负载工况，最大变形量约为 2.38mm，整体变形较小。

综上所述可得出该刀盘的强度和刚度都满足设计要求。

4 工程应用及验证

矿区隧道岩石抗压强度高、破碎带多、地质情况差异大，不同地层之间的岩层特性具有显著差异，采用新型盾构掘进机刀盘施工效果良好，掘进机施工最大日进尺为 30m，平均日进尺约 18m。掘进参数如表 2 所示。

5 结语

本文针对以硬岩地质为主，其中夹杂多条断裂带的复杂地层设计了一种新型盾构掘进机刀盘，结合常规土压平衡盾构机和 TBM 的刀盘结构特点，采用“整体面板 + 法兰支腿”的组合方式不仅提高刀盘结构的强度和刚度，减少对地层的扰动，而且避免了穿越断裂带地层可能遭遇的卡机等难题。通过实际矿区隧道掘进验证刀盘结

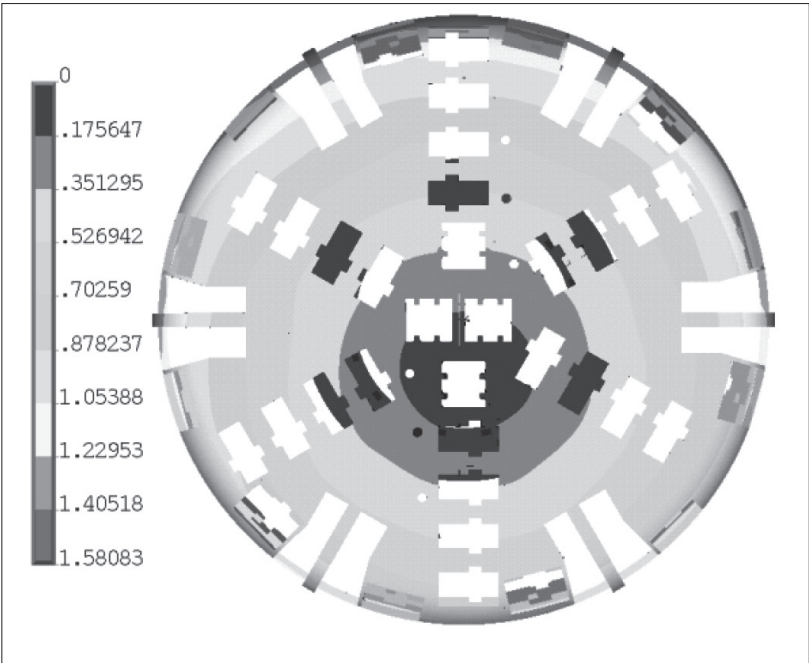


图 12 脱困模式刀盘位移云图

构的合理性，并根据实际应用效果为今后盾构掘进机的刀盘选型与设计提供了参考。

参考文献：

[1] 刘小刚. TBM 在岩石城市轨道交通建设中的应用研究 [J].

现代隧道技术, 2012(5):15-22.

[2] 刘冀山, 肖晓春, 杨洪杰, 等. 超长隧洞 TBM 施工关键技术研究 [J]. 现代隧道技术, 2005(4):37-43.

[3] 孙金泽. 盾构法施工技术的研究现状与发展前景 [J]. 建筑技术开发, 2015(3):15-20.

[4] 刘伟, 罗鸿, 罗怀钱. 一种 EPB&TBM 双模盾构机刀盘结构设计及有限元分析 [J]. 中国设备工程, 2022(4):145-148.

[5] 周阳宗, 聂羽飞, 李杰, 等. 某型复合盾构刀盘的有限元静动态特性分析与优化 [J]. 现代隧道技术, 2015(3):144-149+159.

[6] 刘西科, 张林, 靳党鹏, 等. 高寒高海拔地区 TBM 刀盘设计及有限元分析 [J]. 建筑机械, 2019(7):98-101.

[7] 陈馈, 苏翠侠, 王燕群. 盾构刀盘的有限元参数化建模及其分析 [J]. 建筑机械化, 2010(12):57-60.

[8] 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(8):1136-1142.

作者简介: 肖滨 (1989.07-), 男, 汉族, 湖南湘潭人, 本科, 工程师, 研究方向: 盾构, TBM。

