

不同 TBM 支撑结构形式下的围岩稳定性分析

霍军周, 杨 静, 孙 伟, 凌静秀

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 针对 TBM 典型的 X 型支撑与水平支撑各自结构特点, 考虑了 II 类和 V 类两种典型围岩情况, 建立了基于 LS-DYNA 平台的两种支撑结构-围岩的接触失效仿真模型, 分析了两种支撑结构与两类围岩不同接触面积下的相互作用过程. 结果表明: 在稳定性较好的 II 类围岩下, 水平支撑仅能在接触面积为 100% 情况下保持围岩稳定; 在稳定性较差的 V 类围岩下, 无论水平支撑与围岩接触面积为多少, 岩石均极易发生坍塌现象; 对于 X 型支撑, 无论针对 II 类围岩还是 V 类围岩, 围岩都能保持较好的稳定性. 分析结果将为今后全断面掘进机支撑结构选型设计提供一定的理论依据.

关 键 词: TBM; 水平支撑; X 形支撑; LS-DYNA; 围岩稳定性

中图分类号: TP 391

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)11-1602-05

Stability Analysis of Surrounding Rock Under Different TBM Supporting Forms

HUO Jun-zhou, YANG Jing, SUN Wei, LING Jing-xiu

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China. Corresponding author: HUO Jun-zhou, E-mail: huojunzhou@dlut.edu.cn)

Abstract: The simulation models of two typical supporting structures has been established, according to the structure characteristic of X supporting and horizontal supporting, which analyzed the simulation models of different contact areas with class II and class V rock. The results show that class II rock remains stable only in 100% contact area while class V rock is difficult to maintain stable when using horizontal supporting structure. Class II and class V rock both can remain stable under X supporting structure. The above analysis conclusions will provide a theoretical basis for TBM supporting structure selection in the future.

Key words: TBM; horizontal supporting structure; X supporting structure; LS-DYNA; surrounding rock stability

全断面岩石掘进机(TBM)是目前国际上最先进的隧洞施工机械. TBM 工作时主要依靠液压系统强大的侧向支撑力支撑住岩石侧壁, 以承受推进液压缸的反作用力及回转反扭矩. 典型 TBM 的支撑形式有水平支撑和 X 支撑两种方式. 水平支撑结构简单, 每个支撑靴针对不同围岩可独立移动, 应用广泛; X 型支撑虽然结构复杂, 但在不稳定地质条件下, 由于 X 型支撑对洞壁压力小, 稳定性远高于水平支撑. 本文以 II 类及 V 类围岩为对象, 探究不同结构支撑靴在不同接触面积下

的围岩稳定性问题, 为今后 TBM 支撑形式选择及设计提供一定的理论依据.

1 支撑靴结构-围岩仿真建模

1.1 求解流程

本文使用有限元仿真软件 LS-DYNA 对模型进行仿真. 该软件具有丰富的材料库, 可准确地描述岩石力学特征及接触行为^[1-3]. 分析过程如图 1 所示.

收稿日期: 2013-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375001); 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB035400); 辽宁省科技攻关基金资助项目(2011220031); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110041110029).

作者简介: 霍军周(1979-), 男, 山西运城人, 大连理工大学副教授, 博士; 孙 伟(1967-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 大连理工大学教授, 博士生导师.

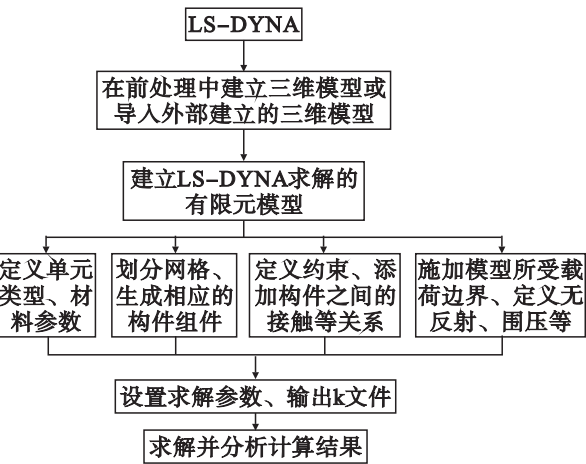


图 1 LS-DYNA 分析步骤
Fig. 1 Analysis steps of LS-DYNA

1.2 支撑结构 - 围岩三维建模

图 2 是两种支撑形式的 TBM. 水平支撑分前后两组, 每组由 4 个支撑靴组成; X 支撑也分前后两组, 每组由 8 个支撑靴组成. 支撑靴在隧道中均水平对称分布^[3-4].

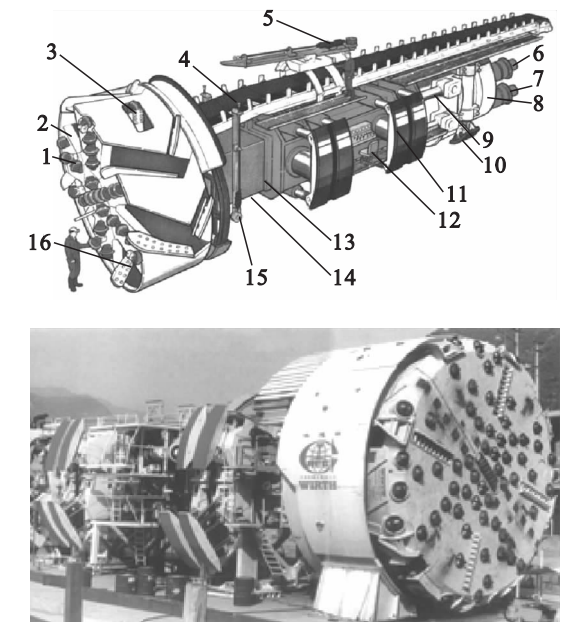


图 2 水平支撑与 X 支撑掘进机
Fig. 2 TBM of horizontal supporting and X supporting

- 1—盘形滚刀; 2—刀盘; 3—扩孔刀; 4—出碴皮带机; 5—超前钻机; 6—电动机; 7—减速器; 8—传动支撑; 9—液压缸; 10—后下支撑; 11—水平支撑; 12—控制室; 13—外机架; 14—内机架; 15—锚杆钻机; 16—铲斗.

为了减少有限元模型的计算时间, 针对水平支撑, 选取一半岩石和一个水平支撑靴进行计算; 针对 X 型支撑, 选取一半岩石和一侧的 X 型支撑进行计算. 根据相关二维图纸建立仿真模型如图 3 所示. 围岩洞壁直径取刀盘直径 8.5 m.

1.3 支撑结构 - 围岩有限元建模

隧道围岩在工程上一般分为 6 大类^[5], 本文选择具有代表性的 II 类围岩和 V 类围岩^[6]作为研究对象, 其基本参数如表 1 所示.

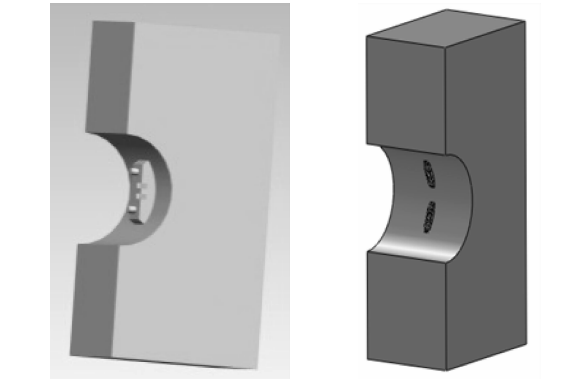


图 3 水平、X 支撑靴 - 围岩三维模型
Fig. 3 3-D model of horizontal gripper-surrounding rock

表 1 围岩主要物理参数 Table 1 The main physical parameters of rock				
岩石类型	密度 kg·m ⁻³	弹性模 量/GPa	泊松比	岩石抗压 强度/MPa
II 类	2 750	20	0.2	95
V 类	2 200	1.2	0.36	6

围岩种类多且内部力学特征复杂, 经典力学很难将其描述清楚. 因此, 本文引入含有损伤因子的岩石本构, 对岩石的挤压断裂过程进行描述, 在 LS-DYNA 中能够较为准确地描述岩石力学特征的材料本构为 111 (JHC) 动态损伤模型^[7-9]. JHC 本构模型考虑了材料损伤累积、应变率效应以及静水压力对于屈服应力的影响. JHC 模型参数如表 2 所示. 使用 SOLID164 单元分别用扫略和智能方法对围岩和支撑靴划分网格, 如图 4 所示. 将划分完网格的模型, 生成后续操作所需要的各构件组件. 在支撑靴与岩石之间添加面面侵蚀接触, 保证在模型外部的单元失效被删除后, 剩下的单元依然能够接触. 静摩擦系数取 0.4, 动摩擦系数取 0.35. 岩石在对称面应施加 3 个方向的固定约束; 岩石无限大, 岩石周围添加无反射约束; 在实际工作过程中, 支撑靴在 X 撑紧方向和 Z 前进方向存在运动, 约束 Y 方向的位移自由度和 3 个方向的旋转自由度.

1.4 支撑结构 - 围岩边界载荷确定

本文选用与水平支撑相同的工况进行分析计算. 支撑靴受力如图 5 所示.

设备初始值额定推进力为 18.6 MN, 最大允许推进力为 21 MN, 经计算得支撑靴总支撑力为

42 MN,刀盘在 5.6 r/min 时额定扭矩为 5.573 MN·m,刀盘脱困扭矩值为 10.5 MN·m. 根据支撑靴受力图和设备初始值计算得到两种支撑靴不同方向受力. 根据施工经验设置 II 类围岩水平围压为 10 MPa, 竖直围压为 20 MPa, V 类围岩相应

的围压值分别为 1.5 MPa 和 3 MPa^[10-11]. 岩石三维模型除了对称面和开挖面,在其余面上均建立单元组,在相应的单元组上添加上述数值的围压. 添加完约束的模型如图 6 所示.

表 2 围岩 JHC 本构模型参数
Table 2 Parameters of HJC constitutive model

类别	剪切模量 G/MPa	强度参数 A	强度参数 B	硬化系数 C	硬化指数 N	压实压力 P_L/MPa	损伤常数 D_1	最小塑性应变 E_{Fmin}
II 类	8330	0.79	1.6	0.007	0.71	800	0.04	0.01
V 类	4.41	0.79	1.6	0.007	0.71	800	0.24	0.01

类别	损伤常数 D_2	标准化最大 强度 S_{max}	压碎压力 P_C/MPa	压碎体积 应变 U_C	压密体积 应变 U_L	压力常数 K_1/GPa	压力常数 K_2/GPa	压力常数 K_3/GPa
II 类	1	7	32	0.002 9	0.1	85	171	208
V 类	1	7	2	0.001 4	0.1	85	171	208

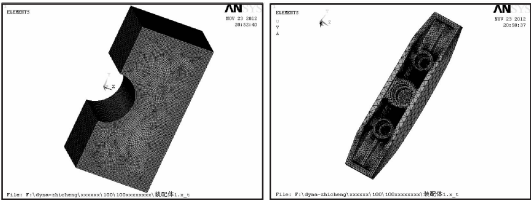


图 4 围岩、支撑靴划分网格
Fig. 4 Element mesh of surrounding rock and gripper

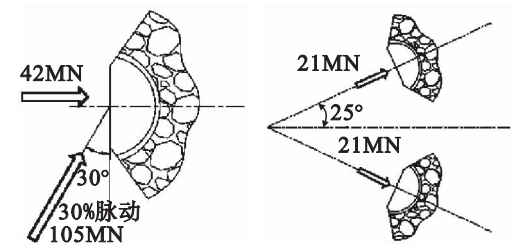


图 5 支撑靴受力分析图
Fig. 5 Mechanical analysis of gripper

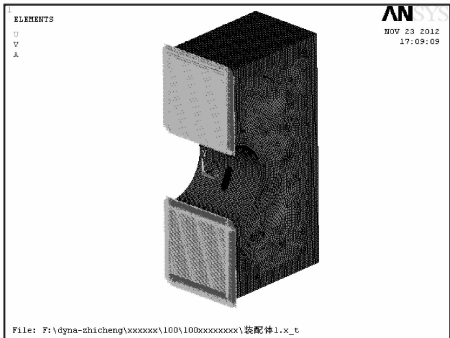


图 6 全部约束边界的模型
Fig. 6 Simulation model with all boundary conditions

1.5 计 算

对仿真模型进行相应的求解设置,求解时间

设置为 1.5 s,求解步数为 1 000 步,质量缩放为 -5×10^{-5} .

2 不同围岩边界下不同支撑结构仿真结果对比分析

2.1 II 类围岩不同接触面积下对比分析
图 7 为不同支撑形式与 II 类围岩相互作用仿真结果中岩石的等效应力图,该图表明,岩石最大等效应力分布基本一致,均出现在岩石边界处.

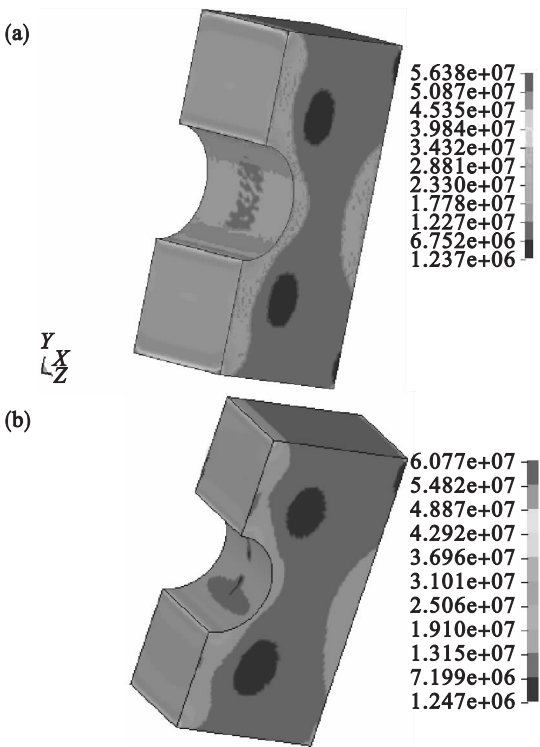


图 7 围岩等效应力
Fig. 7 Equivalent stress of surrounding rocks
(a)—水平支撑;(b)—X 支撑.

支撑靴与围岩在不同接触面积下,水平支撑时围岩最大等效力为 56 MPa, X 支撑为 61 MPa;两种支撑形式下岩石体积均未发生改变,说明两种支撑形式在 II 类围岩条件下均可保

持稳定.不同支撑形式与 II 类围岩在不同接触面积下,水平支撑下及 X 支撑下的支撑靴受力如图 8 所示.

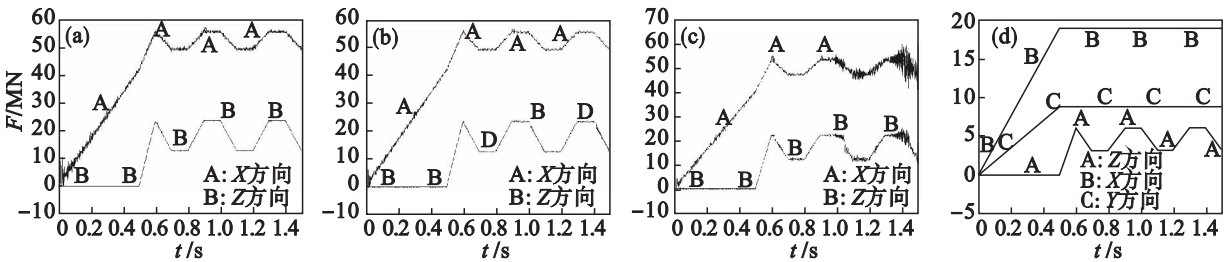


图 8 水平支撑下支撑靴受力
Fig. 8 Gripper forces of horizontal supporting
(a)—100% 接触; (b)—80% 接触; (c)—60% 接触; (d)—X 支撑.

从图 8 中可以看出,使用 X 支撑时,支撑靴受力稳定,未发生波动;使用水平支撑时,随着支撑靴与岩石接触面积减小,支撑靴受力大小不变,但在工作过程中波动逐渐增大.

2.2 V 类围岩不同接触面积下对比分析

不同支撑形式与岩石在不同接触面积下与 V 类围岩相互作用仿真结果进行统计,如表 3,表 4 所示.

表 3 V 类围岩最大等效力
Table 3 Maximum equivalent stress of type V rock
MPa

评价指标	支撑靴与围岩接触面积/%		
	100	80	60
水平支撑	8.77	9.46	9.10
X 支撑	9.94	9.94	11.5

表 4 V 类围岩岩石质量
Table 4 Mass of type V rock

评价指标	支撑靴与围岩接触面积/%		
	100	80	60
水平支撑	5.1	36.1	38.4
X 支撑	5	5	5

对比分析表 3,表 4 可以看出,水平支撑在稳定性较差的 V 类围岩下随着支撑靴与围岩接触面积的减小,岩石质量逐渐减少,说明岩石发生失稳,无法为支撑靴提供支撑力.对于 X 支撑来说,在不同接触面积下,岩石的等效力均接近岩石抗压强度,岩石质量不变,说明岩石未发生失效,围岩能保持良好的稳定性.不同支撑形式与 V 类围岩在不同接触面积下,不同支撑下的支撑靴受力如图 9 所示.

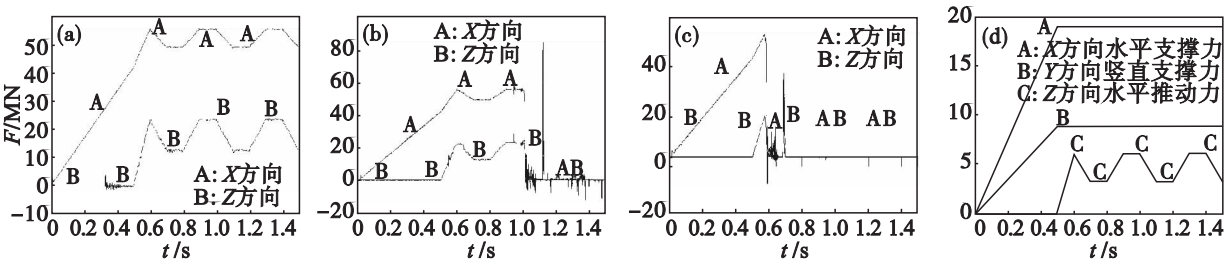


图 9 水平支撑下支撑靴受力
Fig. 9 Gripper forces of horizontal supporting
(a)—100% 接触; (b)—80% 接触; (c)—60% 接触; (d)—X 支撑.

从图 9 可以看出,在 V 类围岩下,X 型支撑工作时支撑靴受力稳定,V 类围岩能够为支撑靴提供足够的支撑力.

随着支撑靴与岩石接触面积的减小,当支撑靴与围岩之间的接触面积减小为原来的 80% 时,

工作时间达到 1.1s 时,支撑力几乎减小到 0,说明此时的围岩发生大面积失效,甚至坍塌,不能够继续为支撑靴提供支撑力;当支撑靴与围岩之间的接触面积减小为原来的 60% 时,工作时间达到 0.6s 时,支撑力已经发生较大幅度的波动,然后

骤减为 0,说明此时的围岩发生大面积失效,甚至发生了围岩的坍塌.

3 结 论

1) 水平支撑在 II 类围岩下,与岩石 100% 面积接触时,围岩稳定;随接触面积的减小,围岩发生失稳,水平支撑将不能继续工作.

2) 水平支撑在 V 类围岩下,无论接触面积为多少,水平支撑都无法保持围岩稳定,极易发生围岩坍塌现象.

3) X 型支撑在 II 类围岩和 V 类围岩下,与岩石接触面积从 100% 到 60% ,岩石均能够为支撑靴提供足够的支撑力,围岩保持较好的稳定性,均未发生坍塌现象.

参考文献:

[1] Tai Y S, Tang C C. The dynamic behavior of reinforced concrete plates under normal impact [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2006, 45 (3) : 117 – 127.

[2] 张魁,夏毅敏,谭青,等. 不同围压条件下 TBM 刀具破岩模式的数值研究 [J]. *岩土工程学报*, 2010, 32 (11) : 1780 – 1787.

(Zhang Kui, Xia Yi-min, Tan Qing, *et al.* Numerical study on modes of breaking rock by TBM cutter under different on fining pressures [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32 (11) : 1780 – 1787.)

[3] Cho J W, Jeon S, Yu S H, *et al.* Optimum spacing of TBM disc cutters: a numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2010, 25 (3) : 230 – 244.

[4] Andrea E S, Donald W W, Roberto T L. Direct analysis for design evaluation of partially restrained steel framing systems

[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131 (9) : 1376 – 1389.

[5] 王雁军. TB880E 型掘进机支撑的控制 [J]. *建设机械技术与管理*, 2006, 19 (5) : 71 – 73.

(Wang Yan-jun. Control of type TB880E tunnel boring machine strut [J]. *Construction Machinery Technology & Management*, 2006, 19 (5) : 71 – 73.)

[6] Barton N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 2002, 39 : 185 – 216.

[7] 苏翠侠,王燕群,蔡宗熙,等. 盾构刀盘掘进载荷的数值模拟 [J]. *天津大学学报*, 2011, 44 (6) : 522 – 528.

(Su Cui-xia, Wang Yan-qun, Cai Zong-xi, *et al.* Numerical simulation of excavation load on cutterhead in shield tunneling machine [J]. *Journal of Tianjin University*, 2011, 44 (6) : 522 – 528.)

[8] Blaier S C, Cook N G W. Analysis of compressive fracture in rock using statistical techniques: a non-linear rule-based model [J]. *International Journal Rock Mechanical Miner Science*, 1998, 35 (7) : 837 – 848.

[9] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains [C] // *High Strain Rates and High Pressures*. Quebec City, 1993 : 561 – 600.

[10] Pouya A, Ghoreychi M. Determination of rock mass strength properties by homogenization [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2001, 25 (13) : 1285 – 1303.

[11] 孙伟,凌静秀,霍军周,等. TBM 水平支撑不同接触面积下的围岩稳定性分析. [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2013, 34 (7) : 899 – 906.

(Sun Wei, Ling Jing-xiu, Huo Jun-zhou, *et al.* Stability analysis of surrounding rock of TBM gripper under different contact area [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34 (7) : 899 – 906.)