doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2018.S.023

复合地层下超大直径泥水盾构刀具寿命分析及预测

孙 晗
(上海隧道工程有限公司，上海 200032)

摘 要: 在复合地层中采用盾构法进行隧道施工，由于缺少有效、直观的刀具磨损检测方法，存在着刀具使用不足或磨损严重的问题，而刀具更换是否及时合理直接关系到施工进度及工程的经济效益。结合武汉三阳路长江隧道复合地层的地质特点和所使用盾构具备常压换刀功能的特殊性，对盾构刀具寿命进行分析计算，得出各类刀具在不同工况条件下使用的环数，以此对盾构刀具更换提供合理依据。

关键词: 泥水盾构；复合地层；刀具磨损；刀具寿命；刀具更换
中图分类号: U231.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6073(2018)S-0124-05

Analysis and Prediction of Life of Super-large Diameter Slurry Shield Cutters in Composite Strata

SUN Han
(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd. Shanghai 200032)

Abstract: Because of the lack of effective and intuitive tool wear detection methods, there is a lack of tool use and serious wear and tear from using the shield method for tunnel construction in composite strata. Whether tool replacement is timely and reasonable is related directly to the construction progress and engineering economic benefits. Based on the geological characteristics of the composite strata in the Yangtze River Tunnel in Wuhan, and the particularity of a shield with the function to change the cutter under normal pressure, the life of the shield cutter is analyzed and calculated, and the number of rings used under different working conditions is obtained to provide a rational basis for the replacement of the shield tool.
Keywords: slurry shield; composite strata; tool wear; tool life; tool replacement

随着我国城市化建设的日益加快，盾构法作为隧道建设施工的一种先进技术，已广泛应用在地铁、公路、市政等工程领域。随着工程建设的需要，相继出现了一大批超大直径盾构，隧道建设正朝着大埋深、长距离、复杂地质的方向发展，由此产生盾构刀具磨损、刀具更换频繁的问题，成为制约盾构正常施工的一个重要因素[1]。

笔者依托武汉三阳路越江隧道工程，对该工程使用的盾构刀具进行寿命分析，为科学合理地进行刀具更换及刀具选型提供依据，也为今后同类型工程提供刀具寿命分析的方法。

1 工程概况

武汉三阳路长江隧道工程采用两台直径 15.76 m 的泥水气压平衡盾构进行施工，隧道外径 15.2 m，内径 13.9 m，单线隧道长 2 590 m。

盾构穿越土层主要有：③-2 粉质黏土、④-2 粉细砂、④-3 中粗砂、⑮a-1 强风化粉砂质泥岩、⑮b-1 弱胶结砾岩和⑮a-2 弱风化粉砂质泥岩(见图 1)。④2 粉细砂：饱和，渗透系数高，密实度高，胶结体强度并不高，但是主要成分为石英、长石，骨架颗粒强度高。⑮b-1 弱胶结砾岩：胶结体强度极低，但是含有大

收稿日期：2018-04-25 修回日期：2018-06-28
作者简介：孙晗，大学本科，工程师，主要从事隧道施工管理，sunshawn87@163.com

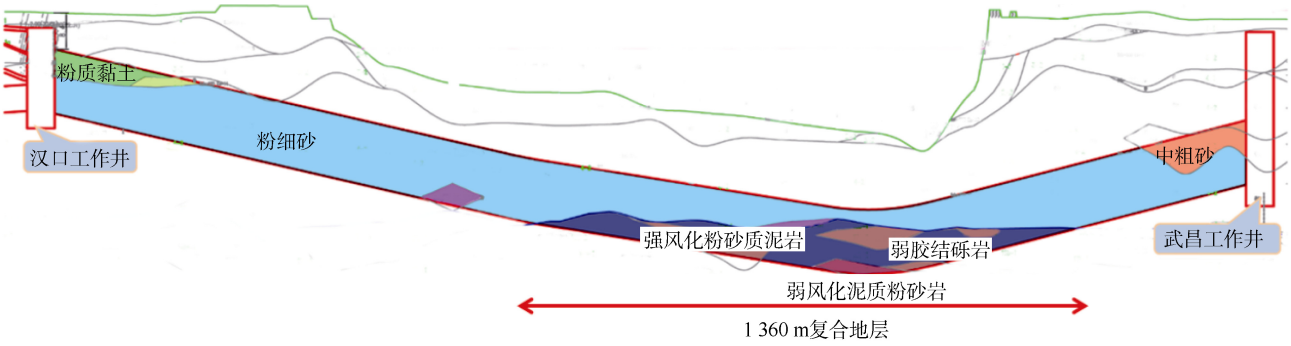


图 1　隧道地质剖面

Fig. 1　Geological profile of the tunnel

量砾石，2 cm 以上卵砾石含量达 40%～80%，最大粒径可达 20 cm 左右；卵砾石成份以灰岩、白云岩、砂岩为主，砾石坚硬，石英含量高达 93%～98%，极易造成刀盘刀具磨损。

2　刀盘刀具布置

盾构刀盘为面板式，由 6 根主刀臂及 6 根副刀臂组成，刀盘开口率 29%。主刀臂布置常压可更换刀桶，可以实现滚刀与软土刀的互换，还布置有常压可更换的刮刀及部分固定式刮刀。副刀臂布置固定式刮刀及铲刀。滚刀及软土刀的设计高度高出刀盘 225 mm，刮刀及铲刀的设计高度高出刀盘 185 mm，切削土体主要是靠滚刀及软土刀，所以将滚刀及软土刀的寿命作为研究主体。

刀盘主刀臂上布置了 41 个常压可更换刀桶，其中 38 个刀桶(76 把刀)沿切削轨迹布置，每一道轨迹布置 1 把刀具，轨迹间距 100 mm，最外圈布置 3 个刀桶(3 把 19 寸的滚刀)作为开挖保径刀，如图 2 所示。

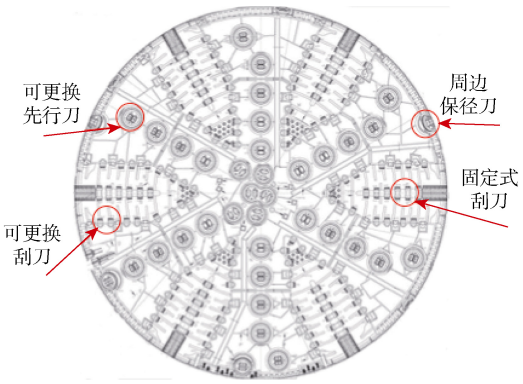


图 2　刀盘布置形式

Fig. 2　Cutter layout

3　寿命分析方法

现有盾构刀具的寿命计算，大多是通过计算限定磨损量下刀具的切削距离来获得[2]。研究人员在该刀具寿命计算的基础上，增加计算限定磨损量下刀具的土体切削量[3]。将两种刀具寿命分析的方法进行比较，得出更为符合工程实际的结论，以此指导工程后续的换刀工作。

3.1　切削距离分析

通常，盾构刀具的磨损量可计算如下：

$$\delta = K\frac{\pi DN(L/v)}{n} \tag{1}$$

式中：δ 为磨损量，mm；K 为磨损系数，mm/m；D 为刀具切削直径，m；N 为刀盘转速，r/min；L 为掘进距离，m；v 为推进速度，mm/min；n 为同轨迹刀具数量。

为了得出刀具到达限定磨损量时盾构所掘进的距离 L(即刀具使用寿命)，先要计算出磨损系数 K。将式(1)做适当变化：$K=\dfrac{n\delta}{\pi DN(L/V)}$，根据工程实际换刀数据进行分析计算，得出不同工况下的磨损系数 K(见表 1)[4-5]。

表 1　由切削距离获得的磨损系数 K 值

Tab. 1　Wear coefficient value K (cutting distance)

10^{-5}mm/m

	砂性地层	复合地层	刀具类型
超大直径泥水盾构	5～12	8～15	贝壳刀
		8～13	17in 滚刀
	12～20	17～23	19in 滚刀

注：1in=25.4mm

3.2　开挖量分析

用刀具参与的土体开挖量来计算分析刀具的使用寿命，盾构刀具的磨损量 δ 可计算如下：

$$\delta = K\frac{\pi(R^2-r^2)L}{n} \tag{2}$$

式中：δ 为磨损量，mm；K 为磨损系数，mm/m^3；R

为刀具切削半径外圆，m；r 为刀具切削半径内圆，m；L 为掘进距离，m；n 为同轨迹刀具数量。

式(2)中的 $\pi(R^2-r^2)L$ 为刀具参与的土体切削量。同样，为了得出刀具到达限定磨损量时盾构所掘进的距离 L(即刀具使用寿命)，先要得出磨损系数 K。将式(2)做适当变化：$K=\dfrac{n\delta}{\pi(R^2-r^2)L}$，根据工程实际换刀数据进行分析计算，得出不同工况下的磨损系数 K(见表 2)。

表 2　由开挖量获得的磨损系数 K 值

Tab. 2　Wear coefficient value K (excavation)　10^{-5}mm/m

	砂性地层	复合地层	刀具类型
大直径泥水盾构	6～10	8～12.5	贝壳刀
		9.5～12.5	17in 滚刀
	12～18	15.5～24.5	19in 滚刀

4　刀具更换预测

目前刀具的更换多以施工参数变化判断为主，辅以施工经验，但是在实际施工过程中，施工参数的变化受除刀具磨损外很多因素的影响。以武汉三阳路越江隧道工程项目为例，施工初期以刀盘扭矩增大、推进速度降低、盾构总推力变大作为刀具更换的依据，但如何判断参数变化到何种程度进行刀具更换并没有标准，导致施工初期的刀具更换会出现刀具利用不足或者磨损过多的情况。进入复合地层，受刀盘结泥饼的影响，通过施工参数来判断刀具更换就更加困难[6]。

通过对刀具的寿命分析，可以为刀具更换提供更合理、更科学的依据。仍以该项目为例，取磨损系数 K 的中值计算得出刀具的理论寿命，并根据理论寿命得出每个轨迹刀具的理论使用环数(见表 3～表 5)。

表 3　砂性地层刀具使用环数分析

Tab. 3　Analysis of ring number for tools in sand stratum

刀具情况		切削距离分析计算		开挖量分析计算	
刀具轨迹	允许磨损量/mm	刀具寿命/m	使用环数	开挖量/m^3	使用环数
中心刀具	40	470 588	134～2 700	500	140～2 270
内圈刀具	40	470 588	95～130	500	100～137
中圈刀具	40	470 588	72～100	500	77～97
外圈刀具	40	470 588	50～70	500	55～75
边缘刀具	20	235 294	25	250	26
保径刀	15	281 250	28	100	30

表 4　复合地层刀具使用环数分析(切削距离分析)

Tab. 4　Analysis of ring number for tools in composite stratum (Analysis of cutting distance)

刀具情况		切削距离分析计算					
刀具轨迹	允许磨损量/mm	刀具类型	刀具寿命/m	使用环数	刀具类型	刀具寿命/m	使用环数
中心刀具	40	贝壳刀	347 826	99～2 050	17in 滚刀 (1in=25.4mm)	380 952	108～2 246
内圈刀具	40		347 826	69～96		380 952	76～105
中圈刀具	40		347 826	53～68		380 952	58～74
外圈刀具	40		347 826	38～52		380 952	42～57
边缘刀具	20		173 913	19		190 476	20
保径刀	15		225 000	23			

表 5　复合地层刀具使用环数分析(开挖量分析)

Tab. 5　Analysis of ring number for tools in composite stratum (Analysis of excavation)

刀具情况		开挖量分析计算					
刀具轨迹	允许磨损量/mm	刀具类型	开挖量/m^3	使用环数	刀具类型	开挖量/m^3	使用环数
中心刀具	40	贝壳刀	390	111～1 769	17in 滚刀 (1in=25.4mm)	364	104～1 649
内圈刀具	40		390	78～107		364	72～100
中圈刀具	40		390	60～76		364	56～71
外圈刀具	40		390	43～59		364	40～55
边缘刀具	20		195	20		182	19
保径刀	15		75	23			

通过计算分析得出每个轨迹的刀具使用环数，可以对刀具更换起预警指导作用(见图 3)。例如，边缘刀具 300 环更换完成，那下一次更换时间就是 320 环，不会再发生刀具利用不足或者未及时更换的情况。

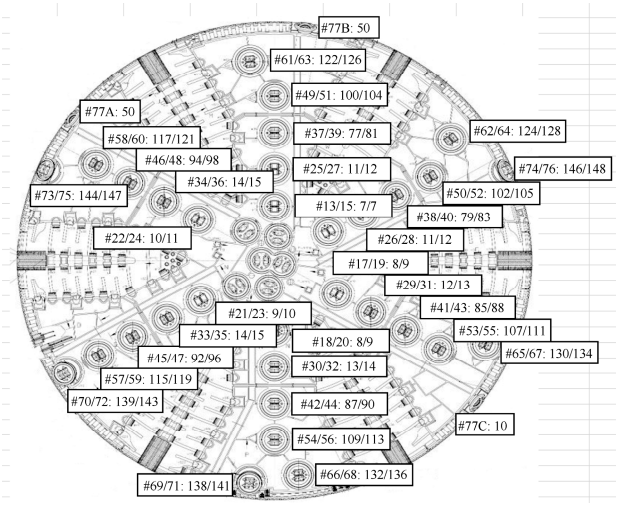


图 3　刀具更换预警

Fig. 3　Early-warning of tool replacement

5　结论

5.1　分析方式的比较

两种寿命计算的方式都有其优缺点。按切削距离计算分析，计算过程中涉及施工参数，N(转速)/v(速度)即贯入度(进刀率)，贯入度的大小直接反映了刀具切削的实际情况，做寿命分析更贴合工程实际；缺点在于实际施工过程中施工参数不是一成不变的，多变的施工参数使得分析变得非常复杂，缺乏效率，并且由于施工参数变化幅度较大，做刀具更换预测时不够准确。按开挖量计算分析，优点在于计算模型简化，规避了施工过程中的参数变化[7]。

两种刀具寿命的分析计算相对来说都比较简单，忽略了一些难以计算的磨损，如盾构底部沉渣对刀具的二次磨损、泥水冲刷对刀具的磨损、复合地层中岩面高度差异产生的磨损等[8-9]。

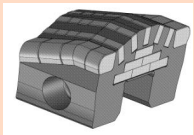
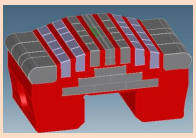
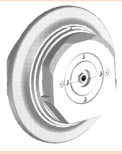
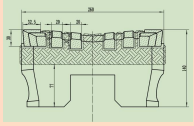
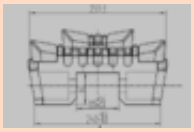
5.2　刀具的对比和选型

该工程先行刀具主要为贝壳刀及滚刀。滚刀的形式没有过多的变化，优劣主要是供应商之间的对比；而贝壳刀由于使用的形式种类繁多，需要通过对每种刀具开挖量的对比，得出多种形式之间的优劣(见表 6)，以指导后续刀具的优化工作。

从表 6 分析得出，国产贝壳刀 2 这种形式的刀具无论是在砂性地质中还是在复合地层中，都具有较好的适应性，因此后续的刀具优化可以从多层次、两端锐角、端部强化等方面进行考虑[10]。

表 6　刀具开挖量类比

Tab. 6　Tool excavation analogy　　m^3

名称	形式	砂性土开挖量	复合地层开挖量
原装贝壳刀 1		483	352
原装贝壳刀 2			287
原装 19in 滚刀		104	66
原装 17in 滚刀			385
国产贝壳刀 1		518	388
国产贝壳刀 2		565	418
国产 19in 滚刀		72	79
国产 17in 滚刀			364

参考文献

[1]　包治强. 复杂地层大直径泥水平衡盾构掘进刀具磨损分析[J]. 地下工程与隧道, 2017(2): 31-33.
BAO Zhiqiang. Analysis of cutter abrasion of large diameter slurry shield machine tunnelling[J]. Underground engineering and tunnels, 2017(2): 31-33.

[2]　杨俊哲, 邱承有. 盾构刀具磨损速率预测研究[J]. 施工

技术, 2016, 45(22): 25-30.
YANG Junzhe, QIU Chengyou. Prediction of cutting tool wear rate[J]. Construction technology, 2016, 45(22): 25-30.
[3] 赵峻. 全断面砂性地层泥水平衡盾构刀具磨损理论分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(3): 124-130.
ZHAO Jun. Theoretical analysis of the cutter wear of a slurry shield driving in full-face sandy strata[J]. Modern tunnelling technology, 2016, 53(3): 124-130.
[4] 管会生, 高波. 盾构切削刀具寿命的计算[J]. 工程机械, 2006, 37(1): 25-28.
GUAN Huisheng, GAO Bo. Calculation for service life of cutting tools of shields[J]. Construction machinery and equipment, 2006, 37(1): 25-28.
[5] 李雪, 周顺华, 周俊宏. 复杂地层大直径泥水盾构刀具磨损规律分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015(4): 868-873.
LI Xue, ZHOU Shunhua, ZHOU Junhong. Cutter wearing analysis of large diameter slurry shield in complex stratum[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015(4): 868-873.
[6] 俱攀武, 陈惠贤, 王刚. 超大直径盾构机刀具磨损规律及布置方法研究[J]. 机械制造, 2014, 52(8): 67-70.
[7] 陈志宁, 夏沅谱, 施烨辉, 等. 泥水盾构刀具磨损机理研究[J]. 现代城市轨道交通, 2014(4): 25-28.
CHEN Zhining, XIA Yuanpu, SHI Yehui, et al. Study on wear mechanism of slurry shield cutter[J]. Modern urban transit, 2014(4): 25-28.
[8] 李刚, 彭建成. 复合地层盾构刀具磨损分析及优化配置技术[C]// 2010 城市轨道交通关键技术论坛论文集. 2010.
[9] 王瑶, 杨新安. 复合地层大直径盾构刀盘刀具磨损分析[J]. 交通科技与经济, 2009, 11(6): 80-82.
WANG Yao, YANG Xin'an. The analysis of abrasion cutter head of large diameter TBM in complex ground[J]. Technology & economy in areas of communications, 2009, 11(6): 80-82.
[10] 陈馈. 盾构刀具关键技术及其最新发展[J]. 隧道建设, 2015, 35(3): 197-203.
CHEN Kui. Key technologies for cutting tool soft shield and their latest development[J]. Tunnel construction, 2015, 35(3): 197-203.

(编辑：郝京红)

(上接第 117 页)

[6] 高峰, 梅乐胜. 盾构隧道衬砌结构的抗震分析[J]. 交通标准化, 2012(3): 115-118.
GAO Feng, MEI Lesheng. Seismic analysis on lining structure of shield tunnel[J]. Transportation standardization, 2012(3): 115-118.
[7] 赵武胜, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 高性能泡沫混凝土隧道隔震材料研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1544-1552.
ZHAO Wusheng, CHEN Weizhong, TAN Xianjun, et al. High-performance foam concrete for seismic-isolation materials of tunnels[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2013, 35(8): 1544-1552.
[8] 姚超凡, 晏启祥, 何川, 等. 一种改进的盾构隧道双层衬砌分析模型及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 80-89.
YAO Chaofan, YAN Qixiang, HE Chuan, et al. An improved analysis model for shield tunnel with double-layer lining and its applications[J]. Chinese journal of rock mechanics & engineering, 2014, 33(1): 80-89.
[9] 谢冰冰, 刘琳. 水工隧洞设置柔性垫层作用机理与效果分析[J]. 水力发电, 2017, 43(12): 28-33.
[10] 刘瑛. 泡沫塑料可压缩的塑性力学性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
[11] 耿皓. 聚乙烯泡沫塑料的静态压缩性能研究[J]. 应用科技, 2006(1): 62-64.
[12] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014[S]. 中国计划出版社, 2014.
[13] SCHNABEL P B. Shake a computer program for earthquake response analysisi of horizontally layered sites[J]. Eerc report, 1972: 72.

(编辑：王艳菊)