DOI: 10.7672/sgjs2025070129

上软下硬砂-岩复合地层盾构镶齿滚刀磨损 规律及预测研究*

徐文礼¹,杨志超²,张 炎³,张建峰⁴,张 雷¹,闵凡路² (1.中交隧道工程局有限公司,北京 100102; 2.河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210024; 3.枣庄市城乡水务局,山东 枣庄 277800; 4.河海大学力学与材料学院,江苏 南京 211100)

[摘要]针对盾构机穿越岩层时滚刀磨损严重的问题,依托南京和燕路过江通道右线盾构隧道工程中砂-岩复合地 层与中硬岩地层掘进实例,对镶齿滚刀磨损进行实测,分析其磨损规律,并使用 BP 神经网络对实测滚刀刀齿崩落 情况进行拟合和预测。结果表明:砂-岩复合地层中对镶齿滚刀磨损影响最大的因素为贯入度与推进速度,而中硬 岩地层中为刀盘扭矩;盾构机从砂-岩复合地层逐渐掘进至中硬岩地层过程中,镶齿滚刀刀齿崩落数量逐渐增加, 刀齿缺损占比由 28%增长至 86%,同时滚刀偏磨现象逐渐严重。BP 神经网络经过训练,可以得到均方误差较小的 神经网络预测模型;模型训练数据量直接关系到 BP 神经网络模型预测刀齿崩落的精度,在训练数据(56 组)较少 的情况下,砂-岩复合地层镶齿滚刀刀齿崩落量预测误差率为 45%;而训练数据(135 组)较多的中硬岩地层刀齿崩 落量平均预测误差率 8.03%。建议在硬岩地层中掘进时,控制较小的刀盘转速以减小磨损,同时在实际预测刀具 磨损时实测更多的样本训练数据,从而提高预测精度。

[关键词] 隧道; 盾构; 镶齿滚刀; 磨损; 预测; BP 神经网络

[中图分类号] U459 [文献标识码] A [文章编号] 2097-0897(2025)07-0129-08

Research on Wear Law and Prediction of Inserted-tooth Hob of Slurry Shield in Upper-soft and Lower-hard and Rock-sandstone Composite Stratum

XU Wenli¹, YANG Zhichao², ZHANG Yan³, ZHANG Jianfeng⁴, ZHANG Lei¹, MIN Fanlu²

(1. CCCC Tunnel Engineering Co., Ltd., Beijing 100102, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 3. Zaozhuang Urban and Rural Water Bureau, Zaozhuang, Shandong 277800, China; 4. School of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: Aiming at the problem of serious cutter wear when the shield machine passes through the rock stratum, based on the excavation examples of sand-rock composite stratum and medium-hard rock stratum in the shield tunnel project of the right line of Nanjing Heyan Road Cross-River Channel, the wear of the inserted-tooth hob is measured, its wear law is analyzed, and the BP neural network is used to fit and predict the measured cutter tooth collapse. The results indicate that the most influential factors on the wear of the inserted-tooth hob in the sand-rock composite stratum are penetration and propulsion speed, while in the medium-hard rock stratum, it is the cutterhead torque. In the process of shield machine tunneling from sand-rock composite stratum to medium-hard rock stratum, the number of cutter teeth of the inserted-tooth roller cutter gradually increases, and the proportion of cutter teeth defect increases from 28% to 86%. At the same time, the eccentric wear of the roller cutter is becoming increasingly serious. After BP neural network training, a neural network prediction model with a smaller mean square error can be obtained. The amount of model training data is directly related to the accuracy of the BP neural network model in predicting cutter tooth collapse. In the case of smaller training data (56 groups), the

^{*}国家自然科学基金(52378394);中交集团重大科技项目(2022-ZJKJ-10)

[[]作者简介] 徐文礼,高级工程师,E-mail:xuwenli002@163.com

[[]收稿日期] 2024-10-20

prediction error rate of cutter tooth collapse in sand-rock composite strata is 45%. The average prediction gap of cutter tooth collapse in medium-hard rock strata with more training data (135 groups) is 8.03%. It is recommended to control a smaller cutterhead speed to reduce wear when tunneling in hard rock formations. Meanwhile, more sample training data should be measured when the tool wear is actually predicted, thereby improving the prediction accuracy.

Keywords:tunnels; shields; inserted-tooth hob; wear; prediction; BP neural network

0 引言

凭借施工周期短、对周围地层扰动小、安全性 高等优点,泥水盾构法广泛应用于公路交通、水电 管道工程等领域。盾构镶齿滚刀主要应用于盾构 岩层掘进中,其使用的合金齿金属特性优于光刃滚 刀的普通刀刃,镶齿滚刀的工作原理是:合金齿侵 入岩石后,在前方发生局部破碎或塑性变形,这一 区域称为密实核,荷载达到某一临界值后密实核附 近的岩石产生碎裂^[1]。然而在穿越复杂地层时,用 于破岩的滚刀常出现偏磨、刀齿崩落等现象,严重 的甚至导致盾构机被迫停机^[2-3],如在武汉地铁 8 号 线工程中,盾构机穿越江中段上软下硬地层时,出 现大量异常磨损现象,严重影响盾构机掘进效 率^[4]。因此,结合具体工程进行刀具磨损实测,开 展磨损量预测研究十分必要。

针对滚刀磨损问题,许多学者探究了不同工程 在硬岩地层掘进时刀具的异常磨损现象,包括偏 磨、刀圈断裂、崩刃、轴承断裂等[5-7];于方正等[8]在 分析北京市一输水隧洞刀具磨损规律时,发现在全 断面硬岩中,镶齿脱落与偏磨占异常磨损的75%, 且滚刀镶齿脱落也受平均磨损速率影响:吴俊等^[9] 利用最小二乘回归法,对穿越极硬岩地层的盾构滚 刀磨损预测,得到了效果较好的拟合与预测模型: 石超等^[10]建立了 BP 神经网络模型预测硬岩地层 中滚刀磨损量,发现网络训练数据少,得到的预测 误差偏大;陈玉坤等^[11]采集了西北某 TBM 法施工 盘型滚刀的磨损数据,将掘进机推力、滚刀安装半 径和刀盘转速作为 BP 神经网络的输入层进行预 测,得到了预测精度较高的结果。由于镶齿滚刀 的刀具构成和光刃滚刀不同,其磨损和破坏预测 与普通光刃滚刀也不同,目前研究大多集中于镶 齿滚刀的破岩机理和破岩效果影响规律分析,涉 及其磨损预测的研究较少[12-14]。因此,结合南京 和燕路过江通道右线盾构隧道工程,对砂-岩复合 地层与中硬岩地层中镶齿滚刀磨损进行实测,建 立 BP 神经网络预测镶齿滚刀刀齿崩落情况,研究 结果可对预测盾构镶齿滚刀的刀齿崩落起到一定 参考作用。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

本工程为南京和燕路过江通道南段工程隧道 盾构段 A3 标段,为穿越长江主江隧道右线盾构段, 盾构段长 2 975. 9m,盾构机开挖直径 15.02m。工程 穿越长江平均江面宽 1 170m,最高水头达 77.450m, 最大水压力达到 7.9bar。其中盾构段 770 环—850 环,通过地层主要为上软下硬的砂-岩复合地层。盾 构机穿越砂-岩复合地层时的地层截面如图 1 所示, 主要包括粉细砂、中粗砂与强风化角砾岩地层,粉 细砂、中粗砂和全风化角砾岩,粉细砂、全风化角砾 岩和强风化角砾岩,粉细砂、全风化角砾岩、强风化 角砾岩和破碎的中风化角砾岩。盾构机在 850 环后 进入风化岩层,属于中风化角砾岩,密度 6g/cm³,饱 和抗压强度在 30~60MPa,属于中硬岩。



图 1 砂-岩复合地层盾构穿越段地层截面 Fig. 1 Cross-section of shield crossing section in sand-rock composite stratum

1.2 刀盘刀具布置

本工程所使用的盾构机刀盘如图 2 所示,刀盘 采用6 辐条的结构形式,刀盘开口率为 29.7%,刀具 采用立体式布置方式,刀具类型包括滚刀、刮刀、边 刮刀等,滚刀可以实现与撕裂刀的常压互换,以适 应不同的地质条件,在砂地层(0-735 环)中掘进时 使用撕裂刀,进入砂-岩复合地层(770 环-850 环) 后,撕裂刀逐渐更换为滚刀,进入中硬岩地层(850 环以后),刀具全部更换为滚刀。中心刀位于刀盘 中心区域,共12把滚刀,编为1~12号;正面刀区域 共52把滚刀,编为13~64号;边缘刀位于刀盘最外 侧,共12把滚刀,编为64~76号。



图 2 刀盘刀具布置 Fig. 2 Cutter layout

2 镶齿滚刀磨损规律实测分析

2.1 砂-岩复合地层镶齿滚刀磨损规律分析

盾构机进入砂-岩复合地层后,共进行 5 次刀 具检查并更换,盾构机于 764 环处刀具检查时,26 把撕裂刀更换为镶齿滚刀;于 788 环处刀具检查 时,所有刀具更换为镶齿滚刀。中心刀由于滚刀 直径较小,仅镶嵌 25 颗刀齿,正面刀与边缘刀滚 刀镶嵌刀齿齿数为 30 颗。镶齿滚刀在砂-岩复合 地层的磨损主要表现为刀齿崩落、偏磨等非正常 磨损,砂-岩复合地层刀具检查时刀具的磨损与破 坏外貌如图 3 所示,图 3a 为 841 环刀具检查中 44 号刀产生的偏磨现象,偏磨造成了刀齿的破坏以 及刀齿之间刀体的破坏;图 3b 为 788 环刀具检查 中 54 号刀产生的刀齿崩落现象;图 3c 为 821 环刀 具检查中 67 号刀磨损情况,既有单独某颗刀齿的 崩落,也有偏磨造成的破坏,上述刀具位置在图 2 中标出。



图 3 部分镶齿滚刀磨损形态照片 Fig. 3 Wear performance of inserted-tooth hob

由于换刀频繁,刀具刀齿的正常磨损较小,磨 损量通常在1mm或少于1mm的范围内。在此将刀 齿正常磨损量忽略不计,只统计镶齿滚刀的刀齿崩 落情况。788环镶齿滚刀刀齿崩落检查如图4所 示,边缘刀与正面刀刀齿平均崩落量均为8.6颗,占 刀齿总量的28.7%,所有镶齿滚刀刀齿总数、使用 环数、经过地层均一致。排除部分使用环数存在差 异的刀具后,821 环镶齿滚刀刀齿崩落数量检查如 图 5 所示,边缘刀刀齿平均崩落量为 18.7 颗,正面 刀 10.8 颗,中心刀 3.5 颗,分别占刀齿总量的 62.3%,36%,14%。刀齿崩落量峰值大多集中在编 号为50号以后的刀具,而刀具是由刀盘中心向外依 次编号,越靠近刀盘外侧的镶齿滚刀刀齿崩落情况 越严重,而位于刀盘最外则的73~76号刀具刀齿崩 落量减少,是由于边缘滚刀存在一定的倾角,刀具 号较小的边缘滚刀先接触地层,因此崩落量偏大。 841 环镶齿滚刀刀齿崩落检查如图 6 所示,在排除 使用环数不一致的刀具后,边缘刀刀齿平均崩落量 为8.8颗,正面刀1.8颗,中心刀4.9颗,分别占刀 齿总量的 29.3%,6%,19.6%。



图 5 821 环刀具检查时镶齿滚刀刀齿崩落量 Fig. 5 The damage amount of the cutter teeth of the 821 ring

盾构机在砂-岩复合地层中掘进参数如表1所示,采用斯皮尔曼相关性分析法对掘进参数与磨损 量进行分析,计算见式(1)。



表1 砂-岩复合地层换刀区段盾构掘进参数

 Table 1
 Parameters of shield tunneling in tool changing section of sand-rock composite stratum

环米	扭矩/	贯入度/	推力/	转速/	推进速度/
プロ安美	$(kN \cdot m)$	$(mm\boldsymbol{\cdot}r^{-1})$	kN	$(\mathbf{r} \cdot \mathbf{mm}^{-1})$	$(\operatorname{mm} \cdot \operatorname{min}^{-1})$
735—764	9 410. 52	12.48	144 618	0.92	10.79
765—788	11 267.42	9.48	157 325	0.98	8.87
789—821	8 774.22	9.91	151 225	0.98	9.19
822-841	10 504.90	9.15	154 172	0.95	8.25

$$r_{s} = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n} d_{i}^{2}}{n(n^{2} - 1)}$$
(1)

式中:r_s为相关系数;d_i为排序等级;n为数据量。 判断标准为 r_s的绝对值越接近1,则参与分析的两 个变量具有强相关性。

结合表1与砂-岩复合地层中3次刀具检查刀 具刀齿损坏量数据,使用斯皮尔曼相关性分析结果 如表2所示,贯入度、推进速度与损坏量之间的相关 系数为1.0,表明二者与镶齿滚刀的缺损齿量呈正 相关关系。掘进推力、刀盘扭矩与损坏量之间的相 关系数为-0.5,表明二者与缺损齿量呈负相关关 系。刀盘转速与每环刀齿损坏量之间的相关系数 为0.994,表明刀盘转速与每环刀齿损坏量之间是 强正相关关系。

表 2 砂-岩复合地层镶齿滚刀相关性分析结果

 Table 2
 Correlation analysis results of inserted-tooth

 hob in sand-rock composite stratum

变量	贯入度	推进 速度	掘进 推力	刀盘 扭矩	刀盘 转速
相关系数 r_s	1.0	1.0	-0.5	-0.5	0.994

2.2 中硬岩地层镶齿滚刀磨损规律分析

进入中硬岩地层后,共进行 23 次刀具检查(见 图 7),普遍使用了镶齿滚刀与光刃滚刀,其中镶齿 滚刀主要使用楔形齿滚刀。图 7a 是中心 49 号刀产 生的偏磨现象,刀圈最大偏磨处达到 6~7mm;图 7b 为边缘 67 号刀的磨损情况,刀齿全部崩落,刀盘也 有一定磨损;图 7c 为边缘 71 号刀的磨损现象,仅有 一枚刀齿残余,上述刀具位置在图 2 中标出。由于 中硬岩层镶齿滚刀不同品牌混用较多,各品牌刀具 单刀齿数不尽相同,所以镶齿滚刀刀齿的崩落,按 照每把刀崩落刀齿数量占每把刀齿数总量之比统 计,称为缺损占比。879—1 035 环共计 13 次的刀具 检查结果如表 3 所示,平均损坏量是平均每把镶齿 滚刀的刀齿崩落量,然而每次刀具检查过程中检查 的镶齿滚刀所使用的环数与镶齿滚刀刀齿数量不 同,固统计平均每环缺损占比。



图 7 中硬岩层地层镶齿滚刀磨损形态照片

Fig. 7 The wear damage performance of the insertedtooth hob in the medium hard rock stratum

表 3 中硬岩地层镶齿滚刀刀齿崩落统计

 Table 3 Statistics of teeth damage of the inserted-tooth roller cutter in medium hard rock stratum

环数	平均损坏量/颗	平均每环缺损占比/%
842—879	6. 89	0. 48
880—900	4.61	0. 54
901—926	3.17	0. 27
927—939	5.58	1.36
940—948	0	0
949—954	13.82	1.40
955—964	7.00	1.69
965—974	22. 25	4.91
975—982	18.08	1.52
983—992	1.93	0.15
993—1 001	18.85	5.15
1 002-1 023	7.80	1.09
1 024—1 035	18.94	2. 51

盾构机在中硬岩地层中掘进时掘进参数与岩 石抗压强度平均值如表4所示,由表3、表4得到的 分析结果如表5所示,贯入度、推进速度和刀盘扭矩 与刀齿缺损占比呈负相关性,掘进推力、刀盘转速 呈正相关。其中掘进推力与刀齿缺损占比间的相 关系数很小,以单因素分析,掘进推力与缺损占比 相关性较小。由表4中的掘进推力参数可以得到, 其平均环比变化率仅有0.1%,可认为掘进推力在 中硬岩层中保持一个稳定的值,当掘进推力在这个

表 4 中硬岩地层镶齿滚刀换刀区段盾构掘进参数

Table 4	Shield tunneling	parameters in cut	ter replacement	section o	f inserted-tooth	hob i	n medium	hard	rock stratum
---------	------------------	-------------------	-----------------	-----------	------------------	-------	----------	------	--------------

环数	扭矩/(kN・m)	贯入度/(mm•r ⁻¹)	推力/kN	转速/(r•mm ⁻¹)	推进速度/(mm·min ⁻¹)	岩石抗压强度/MPa
842—879	11 343.82	9.53	143 047.47	0.96	8.84	14
880—900	10 211.62	9.81	144 733.62	0.97	8.95	15
901—926	10 588.35	7.54	146 823.12	0.97	7.00	20
927—939	6 661.69	4.69	145 531.85	1.33	5.85	40
940—948	6 877.11	3.56	152 239.56	1.11	4.11	30
949—954	8 852.17	4.33	134 393.17	1.08	4.67	30
955—964	7 078.90	5.00	141 799.10	1.13	5.00	30
965—974	6 238.47	4.76	139 748.94	1.14	5.00	35
975—982	6 653.60	4.72	139 362.28	1.16	5.08	36
983—992	5 701.20	3.80	142 748.90	1.17	4.00	40
993—1 001	5 650.33	3.33	153 490.78	1.11	3.56	50
1 002-1 023	4 915.50	3.86	142 792.09	0.97	3.55	45
1 024—1 035	7 600.08	4.17	144 784.92	1.17	4.92	50

稳定范围内波动时,对刀齿缺损占比变化的影响非 常小。

表 5 中硬岩地层镶齿滚刀相关性分析结果

Table 5 The results of correlation analysis of inserted-tooth

变量	相关系数 r _s
贯入度、缺损占比	-0.216
推进速度、缺损占比	-0. 146
掘进推力、缺损占比	0.019
刀盘扭矩、缺损占比	-0.429
刀盘转速、缺损占比	0. 272
岩石抗压强度、缺损占比	0. 524
岩石抗压强度、掘进推力	0.078
岩石抗压强度、贯入度	-0.748
岩石抗压强度、转速	0. 498
岩石抗压强度、推进速度	-0.469
岩石抗压强度、扭矩	-0.945

岩石抗压强度与刀盘扭矩之间的相关系数为 -0.945,说明扭矩受岩石抗压强度影响非常大,且 扭矩是各掘进参数中对刀齿缺损占比影响最大的 参数。但通常认为岩石抗压强度与扭矩应是正相 关,扭矩与刀具的磨损破坏程度为正相关,但此处 结论相反。结合岩石抗压强度与其他掘进参数来 看,岩石抗压强度与推进速度呈强负相关性,与刀 盘转速呈强正相关性,与贯入度呈强正相关性,由 此可以推测,在保持推力稳定的情况下,面对岩石 抗压强度上升的情况,增大刀盘转速以增强切削能 力,降低了刀盘受到的扭矩,而推力的稳定使得盾 构掘进受到岩石抗压强度增大而阻力增大,从而使 掘进速度随之降低。随着刀盘转速的增加,虽扭矩 有所减小,但刀具受到的磨损和冲击增大,刀具的 破坏随之增大。

2.3 两种地层镶齿滚刀刀具磨损规律差异

盾构机进入中硬岩地层后存在刀齿崩落情况

的刀具占比如图 8 所示,从砂-岩复合地层进入中硬 岩地层,镶齿滚刀从帽形齿滚刀更换为楔形齿滚 刀。帽形齿滚刀的刀齿较大、排布较疏;楔形齿滚 刀刀齿较小、排布较密,刀具的更换是掘进地层改 变后镶齿滚刀刀齿崩落状况改善最主要的因素。 掘进区间在逐渐深入中硬岩地层的过程中,刀齿崩 落的现象越来越严重,从刚进入中硬岩层刀具检查 时有 26%的镶齿滚刀出现刀齿崩落现象,逐渐增长 至 86%,呈递增趋势,且由刀齿崩落为主逐渐转化 为崩落+偏磨同时出现,且偏磨越来越严重,甚至出 现少量刀圈断裂的情况。



Fig. 8 The proportion of tool teeth damage to the total number of tools inspected

这里需要说明的是,反映镶齿滚刀磨损程度的 参数除刀齿崩落数量之外,还应考虑刀具偏磨的情况。由于刀具偏磨难以准确量化,故本次磨损实测 统计数据以刀齿崩落为主,根据现场情况来看,在 盾构机逐渐深入中硬岩地层的过程中,不仅刀齿崩

误差反向传播

落数量逐渐增加,其偏磨现象也愈加严重。此外, 在中硬岩地层掘进时还使用了少量光刃滚刀作为 掘削刀具进行试验,其在偏磨程度上的表现优于镶 齿滚刀,两种刀具配合使用的效果较好。由于数量 较少,这里不再介绍光刃滚刀的磨损情况。

3 BP 神经网络预测镶齿滚刀磨损

3.1 BP 神经网络建立

滚刀磨损预测,难点在于刀具的磨损受地层参数、盾构机掘进参数等多方面影响,已有研究表明, BP 神经网络具有多元非线性分析能力,能够综合考 虑多种因素对刀具磨损的影响^[15-17]。下面主要介 绍采用 BP 神经网络进行刀具磨损情况的预测与 分析。

本工程砂-岩复合地层绝大部分刀具采用帽形 齿镶齿滚刀,帽形齿滚刀均为30齿,本文仅对刀齿 崩落数量进行预测。完整的 BP 神经网络由输入 层、隐含层、输出层三部分组成,建立砂-岩复合地层 下 BP 神经网络的刀齿崩落数量模型,首先考虑与 刀齿崩落相关的因素以确定 BP 神经网络的输入层 (见图9)。将贯入度、推进速度、掘进推力、刀盘扭 矩和刀盘转速 5 项参数作为 BP 神经网络的输入层 参数:刀齿的崩落还与盾构机掘进距离有关,固将 掘进环数也作为输入层参数:在掘进相同环数的情 况下,距刀盘位置中心远的刀具滚动距离比中心位 置刀具长,刀具被磨损的程度越重,且刀具是由刀 盘中心向外依次编号,因此刀具号也应作为输入层 参数之一。同时将中心刀区域刀具编号为1,正面 刀区域刀具编号为2.边缘刀区域刀具编号为3.区 域编号作为 BP 神经网络输入层参数之一。最终网 络输入层的8个节点确定为贯入度、推进速度、掘进 推力、刀盘扭矩、刀盘转速、掘进环数、刀具号、刀具 所在区域编号。

由于中硬岩地层中镶齿滚刀种类混用,不同种 类镶齿滚刀的刀齿数量不同,于是以刀具缺损占比 作为预测目标进行预测。首先将贯入度、推进速 度、掘进推力、刀盘扭矩、刀盘转速、刀具号、掘进环 数纳入输入层;在中硬岩地层中掘进岩石抗压强度 随地层变化,也应作为输入层节点之一;镶齿滚刀 的刀齿总量对磨损也可能会产生影响,故将镶齿滚 刀刀齿量也作为输入层节点之一,共9个输入层 节点。

3.2 BP 神经网络拟合与预测效果

1)砂-岩复合地层

将砂-岩复合地层对应的刀齿崩落数据与相关 参数共56组进行网络模型训练,另有1组数据作为



模型顶侧的效果检验。模型切综结果较好, 所得均 方误差小于 0.001, 模型计算数据与实测数据的对 比如图 10 所示, 二者几乎一致。使用 BP 神经网络 训练得到的模型对 788 环检查的 76 号刀齿崩落数 据进行预测, 实测有 8 颗刀齿崩落, 而预测数据为 11.6 颗, 误差率 45.00%。虽然 BP 神经网络拟合效 果较好, 模型计算数据与导入的实测数据之间误差 很小, 但使用该模型进行刀齿崩落数量的预测, 预 测模型的精确度低于网络的结构精度。



wear in sand-rock composite stratum

2) 中硬岩地层

将中硬岩地层对应的刀齿崩落数量与相关参数共 135 组进行网络模型训练,另有 10 组数据作为 模型预测的效果检验。模型训练所得均方误差小 于 0.003,模型计算数据与实测数据的对比如图 11 所示,54,51,49 号刀具拟合误差较大,其他镶齿滚 刀拟合结果几乎一致,整体吻合程度较高。表 6 是 利用模型预测得到的结果与实测结果对比,对于 50 号刀具,实测缺损占比为 91.3%,但预测值达到了 279.1%,缺损占比的上限为 100%,但此处 BP 神经 网络的预测超出了合理范围。排除非正常结果后, 得到平均预测误差率为 8.03%。



图 11 中硬岩地层神经网络拟合与实测磨损对比

Fig. 11 Comparison of network fitting and measurement in medium hard rock stratum

表 6 中硬岩地层镶齿滚刀刀齿缺损占比 预测与实测差距统计

Table 6 Statistical of gap between prediction and measurement of teeth defect proportion of the inserted-tooth hob in medium

h	ard 1	ock	stratum	

				/-
刀具号	实测值	预测值	预测差距	
76	0	9.4	9.4	
74	0	-0.9	0.9	
62	0	0.4	0.4	
52	0	-13.7	13.7	
50	91.3	279.1	187.8	
28	0	0.1	0.1	
27	43.4	10.3	33.1	
25	0	8.5	8.5	
15	6.5	3.2	3.3	
13	0	-2.9	2.9	

此外,还需说明的是,在实际工程中,由于地层 复杂多变、掘进参数浮动等多方面因素,刀齿的碰 撞具有随机性,BP 神经网络模型训练数据较少时会 出现预测值与实测值偏差较大的现象。如本研究 中,砂-岩复合地层中刀齿崩落数量的预测误差率达 到了45%,而在数据样本量较多的中硬岩地层中, 其预测误差率仅为8.03%,预测精度大大提高了。 由此可见,BP 神经网络的预测精度与训练数据量密 切相关。因此,建议进行刀具磨损预测时,应尽可 能多收集和提供样本数据,以提高预测精度。

4 结语

1)砂-岩复合地层中对镶齿滚刀磨损影响最大的因素为贯入度与推进速度,呈正相关;在中硬岩地层中,由于刀盘转速的增加使刀盘扭矩与刀齿磨损呈负相关,且为影响最大的因素。

2)从砂-岩复合地层逐渐掘进至中硬岩地层中, 滚刀磨损形式由单一的刀齿崩落或偏磨转变为刀 齿崩落与偏磨普遍存在的情况,镶齿滚刀刀齿崩落 数量逐渐增加,刀齿缺损占比由 26%增长至 86%, 且偏磨现象逐渐严重。

3) 通过 BP 神经网络对刀齿崩落数量实测数据 进行拟合,可以得到拟合效果较好的网络模型,利 用该模型进行预测,砂-岩复合地层训练数据量共 56 组,预测误差率为 45%;中硬岩地层训练数据共 135 组,平均预测误差率为 8.03%。由于地层、掘进 参数等各方面的因素复杂多变,刀齿崩落具有很大 的随机性,利用 BP 神经网络进行预测,预测精度与 训练数据样本数量密切相关,

4)建议在岩石抗压强度较高的地层中掘进时, 控制较小的刀盘转速以减小磨损;同时在实际工程 预测盾构刀具磨损时,实测更多刀具以获取更多的 样本训练数据,从而使预测精度得到提高。

参考文献:

%

- [1] 李志,刘志强,胡敬东,等. 镶齿滚刀的破岩机理及分形研究
 [J].煤矿机械,2007,28(2):31-33.
 LI Z, LIU Z Q, HU J D, et al. Fraqmentation principle and grading research of tungstem-carbide-tipped cutter [J]. Coal
- [2] 郭信君,闵凡路,钟小春,等.南京长江隧道工程难点分析及 关键技术总结[J].岩石力学与工程学报,2012,31(10): 2154-2160.

mine machinery, 2007,28(2):31-33.

GUO X J, MIN F L, ZHONG X C, et al. Summaries of key technologies and difficulties in Nanjing Yangtze River Tunnel project[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2012, 31(10):2154-2160.

 [3] 牛占威,张文新,李云涛,等.海洋环境下软硬不均地层超大 直径盾构掘进方案比选[J].施工技术(中英文),2023,52
 (6):94-98.

NIU Z W, ZHANG W X, LI Y T, et al. Comparison of super large diameter shield boring schemes in soft and hard uneven formations in marine environment[J]. Construction technology, 2023,52(6): 94-98.

- [4] 庄绪良. 粉细砂-砾岩复合地层条件下大直径越江盾构刀具 磨损[J]. 科学技术与工程,2022,22(31):13980-13987.
 ZHUANG X L. Cutter wear of large diameter cross-river shield tunneling in silty sand-conglomerate composite stratum [J].
 Science technology and engineering, 2022, 22 (31): 13980-13987.
- [5] 常佳奇,黄宏伟,张东明,等. 基于聚类与 Transformer 算法的

上软下硬地层盾构滚刀正常磨损预测[J]. 施工技术(中英 文),2024,53(1):107-115.

CHANG J Q, HUANG H W, ZHANG D M, et al. Normal wear prediction of disc tool based on clustering and transformer algorithm for tunneling in upper soft and lower hard strata [J]. Construction technology,2024,53(1):107-115.

[6] 黄和平. 上软下硬花岗岩地层盾构刀具减磨措施研究[J]. 施 工技术(中英文),2021,50(15):18-21.

HUANG H P. Research on wear reducing measures for shield tools in upper-soft and lower-hard granite stratum [J]. Construction technology, 2021,50(15):18-21.

[7] 王银坤.全断面硬岩及上软下硬复杂地层盾构掘进技术应用
 [J].中国市政工程,2023(1):75-77,82,97.
 WANG Y K. Application of shield tunneling technology in full

section hard rock & upper soft lower hard complex strata [J]. China municipal engineering, 2023(1): 75-77,82,97.

[8] 于方正,乔浩利,朱荣辉,等.软硬混合地层盾构滚刀磨损规 律研究——以北京市团城湖——第九水厂输水隧洞为例
[J].隧道建设(中英文),2022,42(S1):536-543.
YUFZ, QIAOHL, ZHURH, et al. Wear law of shield disc cutter of shield tunneling in hard-soft mixed strata of water

conveyance tunnel of Tuancheng Lake No. 9 Water Plant in Beijing[J]. Tunnel construction, 2022,42(S1): 536-543.

- [9] 吴俊,袁大军.大连极硬岩地层复合盾构刀具磨损的分析与 预测[J]. 土木工程学报,2015,48(S1):250-255.
 WU J, YUAN D J. Analysis and prediction on composite shield cutters wear in extremely hard rock in Dalian metro[J]. China civil engineering journal, 2015,48(S1): 250-255.
- [10] 石超,薛皓文,丁小彬. 基于 BP 神经网络的硬岩地层盾构滚 刀磨损预测[J]. 现代隧道技术,2020,57(S1):217-225.
 SHI C, XUE H W, DING X B. Prediction of cutter wear of shield machine in hard rock stratum based on BP neural network
 [J]. Modern tunnelling technology, 2020,57(S1): 217-225.
- [11] 陈玉坤,管会生,周磊,等.基于 BP 神经网络的盘形滚刀磨损 预测研究[J].现代隧道技术,2021,58(5):78-84.

CHEN Y K, GUAN H S, ZHOU L, et al. Research on the wear prediction of disc cutters based on BP neural network [J]. Modern tunnelling technology, 2021,58(5):78-84.

- [12] 黄森涌,欧阳涌,余村,等. 盾构镶齿滚刀破岩过程机理分析
 [J].中国水运,2017(16):161-162.
 HUANG S Y, OUYANG Y, YU C, et al. Mechanism analysis of rock breaking process of shield inserted hob [J]. China water transport,2017(16):161-162.
- [13] 董汉军,谭啸峰,杨钊,等.广州"红层"地质盾构机滚刀磨损 与掘进参数特性分析[J].中国港湾建设,2013,33(4):
 11-14.

DONG H J, TAN X F, YANG Z, et al. Characteristic analysis of wear of cutters and excavation parameters of shield tunneling machine in red beds in Guangzhou [J]. China harbour engineering, 2013,33(4):11-14.

[14] 胡修坤.反井钻机镶齿滚刀破岩机理及性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,2019.

> HU X K. Research on rock breaking mechanism and performance of tipped hob for raise boring machine [D]. Xuzhou; China University of Mining and Technology, 2019.

 [15] 丁小彬,谢宇轩,薛皓文,等.基于神经网络算法的滚刀磨损 量预测方法[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(1):83-88,95.

DING X B, XIE Y X, XUE H W, et al. A method for disc cutter wear prediction based on neural network [J]. Journal of Zhengzhou University (engineering science), 2023, 44(1): 83-88,95.

- [16] 王义盛,杨志超,张炎,等.砂性地层盾构掘进撕裂刀磨损规 律分析[J].城市轨道交通研究,2023,26(8):82-88.
 WANG Y S, YANG Z C, ZHANG Y, et al. Tearing cutter wear law analysis of shield excavation in sandy stratum[J]. Urban mass transit, 2023, 26(8): 82-88.
- [17] YU H G, TAO J F, HUANG S, et al. A field parameters-based method for real-time wear estimation of disc cutter on TBM cutterhead[J]. Automation in construction, 2021, 124:103603.