

中文引用格式:王睿,张讯,邓祥辉,等.爆炸作用下地铁盾构隧道韧性评估与预测[J].中国安全科学学报,2026,36(4):123-131.
英文引用格式:Wang Rui,Zhang Xun,Deng Xianghui,et al. Resilience assessment and prediction of metro shield tunnels under explosive conditions[J]. China Safety Science Journal,2026,36(4):123-131.

爆炸作用下地铁盾构隧道韧性评估与预测^{*}

王睿¹副教授,张讯¹,邓祥辉^{**1}教授,王平安²教授级高级工程师,
王旭¹,张巍³高级工程师

(1 西安工业大学 建筑工程学院,陕西 西安 710021;2 中铁二十局集团有限公司,陕西 西安 710016;
3 中铁建城建交通发展有限公司,江苏 苏州 215000)

中图分类号:X913.4;U458.1 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.0085
资助项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-YB-327);陕西省教育厅服务地方专项计划项目
(22JC040);陕西省重点研发计划(2025SF-YBXM-151);陕西省交通运输厅交通运输科研项目计划(25-56X)。

【摘要】 为保障地铁运行及结构安全,开展爆炸作用下地铁盾构隧道韧性评估。建立爆炸作用下地铁盾构隧道的韧性评估体系和韧性等级划分标准,提出基于反向传播(BP)神经网络的3输入层-5隐藏层-单输出层的地铁盾构隧道韧性预测模型,并依托西安地铁一号线完成韧性评估和预测。结果表明:爆心距减小、炸药当量增大、爆炸次数增加均会加速地铁盾构隧道韧性下降;首次爆炸后地铁盾构隧道韧性降幅最为明显,之后韧性降速较为缓慢,直至第5次爆炸后,韧性降低速度大大加快,地铁盾构隧道进入低韧性,需及时修复以满足运行要求,而第7次爆炸后降为极低韧性,已不能满足运行安全。所建立的韧性评估体系和预测模型可用于连续外爆作用下地铁盾构隧道安全状况的评估。

【关键词】 爆炸作用; 地铁盾构隧道; 韧性评估; 反向传播(BP)神经网络; 韧性预测

Resilience assessment and prediction of metro shield tunnels under explosive conditions

Wang Rui¹, Zhang Xun¹, Deng Xianghui¹, Wang Ping'an², Wang Xu¹, Zhang Wei³

(1 Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an Shaanxi 710021, China;
2 China Railway 20th Bureau Group Corporation Limited, Xi'an Shaanxi 710016, China;
3 China Railway Construction Urban Construction Transportation Development
Corporation Limited, Suzhou Jiangsu 215000, China)

Abstract: To ensure the operational and structural safety of the subway system, an assessment of the resilience of metro shield tunnels under explosive loading was conducted. A resilience assessment framework and grading criteria for shield tunnels under blast loading were established, and a resilience prediction model was developed based on a backpropagation (BP) neural network with a three-input, five-

* 文章编号:1003-3033(2026)04-0123-09; 收稿日期:2025-11-14; 修稿日期:2026-02-05

** 通信作者:邓祥辉(1976—),男,四川德阳人,博士,教授,主要从事隧道韧性安全评估等方面的研究。E-mail:xianghuideng@xatu.edu.cn。

hidden-layer, single-output architecture. This model and evaluation approach were applied in a case study on the Xi'an Metro Line 1 to assess and predict the tunnel's resilience. The results indicate that a shorter standoff distance, a higher explosive yield, and a higher number of explosions each accelerate the decline in the tunnel's resilience. The resilience exhibited the most pronounced drop after the first explosion; the subsequent rate of decline was relatively gradual until the fifth explosion, after which it increased significantly. After the fifth explosion, the tunnel entered a low-resilience state requiring prompt repairs to meet operational requirements, and by the seventh explosion, the resilience had fallen to an extremely low level that could no longer ensure operational safety. The resilience assessment framework and prediction model developed in this study can be used to assess the safety status of metro shield tunnels under repeated external explosions.

Keywords: explosions effect; metro shield tunnels; resilience assessment; back propagation (BP) neural network; resilience prediction

0 引言

城市高速发展至今,随着人口增多,地面交通承载力出现瓶颈,大城市逐步将地铁纳入基础设施网络。在初期规划中,地铁只是纯粹的交通工具,起到优化城市交通结构、推动城市发展的目的。近年来国际形势日益严峻,在“平战结合”的背景下,特殊时期城市正常运转对地铁盾构隧道抗爆防爆功能的依赖程度大大增加。而地铁盾构隧道一旦遭受较大的外爆炸作用,隧道结构性能将会大幅下降,修复难度与恢复时间也随之上升^[1]。因此,在不同程度外部冲击下,在一定的时间和资源限制下,准确评估与合理预测地铁盾构隧道韧性,对确保地铁盾构隧道结构安全具有重要意义。

地铁盾构隧道韧性主要包含3个方面:①灾害发生时,通过重组资源使地铁在最低功能水平运行^[2];②灾害发生后,原始地铁系统部分被破坏时,能够适量化解负面影响并自主转换至另一个适应新环境的稳定系统^[3];③遭受较大程度破坏后,系统在人为干预下具有恢复、甚至超过原有水平的能力,包括恢复的速度和质量^[4-5]。

许多学者在地铁盾构隧道韧性评估理论研究上已取得大量成果。在选取评价指标方面,李剑^[6]认为评价指标应从结构整体功能性、安全性、耐久性出发,并辅助具体的结构指标,如曲率、沉降、管片接缝渗漏状况等;Huang Hongwei^[4]结合性能下降后的鲁棒性、后期恢复速度与隧道水平收敛,量化上海地铁隧道衬砌收敛的韧性;乔小雷^[7]基于盾构隧道的常见病害与现场调研结果,选取管片接缝变形与破损、内部结构裂缝、渗水,以及纵向不均匀沉降设置为评价指标,构建安全评估体系;Zhao Yuetang等^[8]建立

LS-DYNA 软件数值模型,说明爆炸作用下盾构隧道环管片环向、纵向的变形与破坏会对地铁隧道整体结构产生较大的影响性。在量化隧道韧性方面,Lin Xingtao^[9]通过计算隧道性能衰退曲线,提出高、中、低、无韧性4种隧道衬砌韧性等级划分标准;Huang Zhongkai^[10]通过曲线积分建立综合韧性指标,量化评估隧道脆弱性,并提出高、中、低3类韧性等级;Cen Nan^[11]建立了四阶段韧性评估曲线、综合弹性指标体系、混合多层模型,量化破坏性事件对全系统的韧性影响;Jiao Liudan^[12]构建反向传播(Back Propagation, BP)神经网络,提出城市系统对灾害冲击的韧性评价框架,确定城市或系统面对突然灾害时的应对与恢复能力。

综上,对地铁单一扰动下的韧性评估虽已较为成熟,但仍存在评价指标的选取不够全面与完整,韧性量化方面的成果较少,对特殊扰动、多次与连续扰动的研究不深入。鉴于此,笔者拟系统分析地铁盾构隧道结构遭遇连续外部爆炸冲击时的及时工况与力学性能,构建多次外爆炸作用下地铁盾构隧道结构韧性评价指标与评估体系,并在此基础上利用BP神经网络预测多次外爆炸作用后地铁隧道的韧性状态,以期战时地铁的安全状况评估提出理论支撑。

1 地铁盾构隧道韧性评估方法

1.1 地铁盾构隧道韧性的定义

爆炸作用下地铁盾构隧道韧性指地铁盾构隧道遭受爆炸荷载连续扰动后,通过自身结构机制的调整与优化,降低性能衰减速率、部分性能能够恢复或达到未受冲击前水平的能力。

为全面考虑爆炸冲击对地铁盾构隧道结构的负面影响,并得到地铁盾构隧道性能的即时状态,建立

地铁盾构隧道结构性能衰减曲线。该性能衰减曲线分为常态期和影响期。常态期内,地铁未遭遇显著的外部破坏,只产生由于地铁运营带来的自然老化与疲劳累积损伤。影响期由冲击阶段、适应阶段、恢复阶段组成。冲击阶段是爆炸发生后较短时间内地铁受冲击波影响性能急剧下降的阶段;后进入适应阶段,性能降低速率变缓; n 次爆炸结束后,在人为干预和自我修复下结构性能在一定程度上缓慢恢复为恢复阶段。影响期结束后,紧急抢修与加固措施也已结束,地铁再次进入常态期,恢复正常运行,只产生自然磨损与老化。

表 1 地铁盾构隧道韧性指标

Table 1 Resilience indicators of metro shield tunnel

指标名称	表达式	注释
直径变形	$q_1(t) = \frac{\lambda_{\max} - \lambda(t)}{\lambda_{\max}}$	$\lambda_{\max}$ 为隧道结构允许的最大直径变形率,取为 9‰; $\lambda(t)$ 为随时间隧道结构直径变形率
竖向位移	$q_2(t) = \frac{V_{\max} - V(t)}{V_{\max}}$	$V_{\max}$ 为隧道结构允许的最大竖向位移,取为 20 mm; $V(t)$ 为随时间隧道结构竖向位移量
水平位移	$q_3(t) = \frac{H_{\max} - H(t)}{H_{\max}}$	$H_{\max}$ 为隧道结构允许的最大水平位移,取为 20 mm; $H(t)$ 为随时间隧道结构水平位移
接缝张开量	$q_4(t) = \frac{\Delta L_{1\max} - \Delta L_1(t)}{2\Delta L_{1\max}} + \frac{\Delta L_{2\max} - \Delta L_2(t)}{2\Delta L_{2\max}}$	$\Delta L_{1\max}$ 为隧道结构允许的最大纵缝张开量; $\Delta L_{2\max}$ 为隧道结构允许的最大环缝张开量,均取 3 mm; $\Delta L_1(t)$ 为随时间隧道结构纵缝张开量; $\Delta L_2(t)$ 为随时间隧道结构环缝张开量
错台量	$q_5(t) = \frac{\Delta S_{1\max} - \Delta S_1(t)}{2\Delta S_{1\max}} + \frac{\Delta S_{2\max} - \Delta S_2(t)}{2\Delta S_{2\max}}$	$\Delta S_{1\max}$ 为隧道结构允许的最大纵缝错台量; $\Delta S_{2\max}$ 为隧道结构允许的最大环缝错台量,均取 10 mm; $\Delta S_1(t)$ 为随时间隧道结构纵缝错台量; $\Delta S_2(t)$ 为随时间隧道结构环缝错台量

1.3 韧性指标权重

采用主客观综合赋权法^[16]计算韧性指标权重。

1) 采用专家评价法计算主观权重。通过专家打分评价各性能指标重要程度,并通过层次分析法^[17]分别计算第*i*个指标的主观权重 w_i' 。

2) 采用标准离差法计算客观权重。计算各性能指标标准差并进行归一化处理,得到第*i*个指标的客观权重 w_i'' 。

3) 计算主客观综合权重。采用下式对主观权重与客观权重进行加权平均^[16]计算。

$$w_i = kw_i' + (1 - k)w_i'' \tag{1}$$

式中: k 为设置比例,取值范围为(0,1), k 取0.5^[18]; w_i' 为第*i*个性能指标主观权重; w_i'' 为第*i*个性能指标客观权重。

根据盾构地铁隧道性能指标值和权重,由下式得到盾构地铁隧道结构在*t*时刻的结构性能 $Q(t)$ 衰减曲线为:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n w_i q_i(t) \tag{2}$$

1.2 韧性指标体系

现有研究中,管片变形程度、管片接缝张开量、管片螺栓受力及钢筋的腐蚀状况、错台量、径向变形及变形曲率、相对刚度比、裂缝宽度等常用作评价地铁盾构隧道结构韧性^[13-15]。但实际工程中,由于测量成本高、难度大、精度低等问题,无法一一测量所有指标,为确保准确且完整地反应出地铁盾构隧道的结构性能变化,选取 5 个典型指标,建立地铁盾构隧道韧性指标体系。

各韧性指标计算公式见表 1。

式中: w_i 为第*i*个性能指标主客观综合权重; $q_i(t)$ 为*t*时刻第*i*个性能指标计算的性能值。

1.4 韧性评价

综合考虑扰动媒介、结构自衰减与决策阶段的时间对韧性的影响^[4,19],定义多次爆炸作用下地铁盾构隧道结构韧性 R_e ,如下式:

$$S_1 = \int_{t_{I1}}^{t_f} Q(t) dt \tag{3}$$

$$S_2 = Q_0(t_f - t_{I1}) \tag{4}$$

$$R_e = \frac{S_1}{S_2} \tag{5}$$

式中: S_1 为冲击阶段至恢复阶段隧道结构性能衰减曲线与坐标轴围成的面积; S_2 为冲击阶段至恢复阶段初始性能与坐标轴围成的面积; t_{I1} 为地铁盾构隧道冲击阶段 I 的初始时刻; t_f 为地铁盾构隧道恢复阶段的结束时刻; Q_0 为地铁盾构隧道结构初始性能。韧性计算如图 1 所示。

当前研究中,韧性的研究集中在鲁棒性、脆弱性、冗余性或其他自设定指标等的影响^[20],并未从

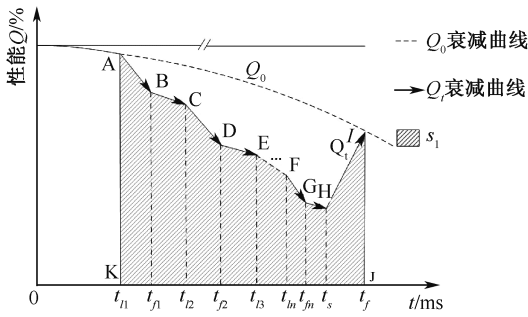


图1 韧性计算

Fig. 1 Resilience calculation

结构韧性 R_e 整体上采用量化方法进行评价^[21]。因此,综合考虑地铁盾构隧道在爆炸作用下抵抗冲击能力和修复能力^[18],将地铁盾构隧道结构韧性划分为4个等级^[22]:高韧性(Ⅰ, $R_e \geq 0.8$)、中韧性(Ⅱ, $0.6 \leq R_e < 0.8$)、低韧性(Ⅲ, $0.4 \leq R_e < 0.6$)和极低韧性(Ⅳ, $R_e < 0.4$)。

根据隧道功能完整性划分与韧性复原能力^[23],界定地铁盾构隧道韧性评级为低韧性(Ⅲ),须采取相应修复措施以保障地铁的安全运行;当评级为极低韧性(Ⅳ)时,修复措施仅能保证结构基本安全,无法提供地铁正常运行条件。

2 爆炸作用下地铁盾构隧道韧性评估

2.1 数值分析模型建立与数据采集

以西安地铁一号线区间隧道为依托,使用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立模型,分析不同当量三硝基甲苯(Trinitrotoluene, TNT)炸药(500、1 000、1 500、2 000、2 500 kg)连续爆炸后,地铁盾构隧道的韧性。

1) 采用 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)固流耦合模型模拟爆炸全过程。网格划分选用 100 mm 的 8 节点 6 面体,以满足 Lagrangian 分析的变形要求。边界条件设置为无反射边界条件。

2) 采用高精度度和高可靠性的高能炸药模型 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 进行模拟,密度为 $1\,631\text{ kg/m}^3$,爆速为 $6\,930\text{ m/s}$,爆轰压为 21 GPa 。

3) 采用 * EOS_JWL 状态方程模拟 TNT 炸药爆轰压力-体积关系,状态方式系数 M 为 351.2 GPa ,状态方式系数 N 为 3.23 GPa ,初始体积内能 E_0 为 6.73 GPa ,状态方式系数 L_1 为 4.5 , L_2 为 1.1 。

4) 空气采用空材料模型 * MAT_NULL,密度为 1.29 kg/m^3 。

5) 土体模型选用 * MAT_SOIL_AND_FOAM 模

拟土壤在爆炸作用下的动力响应,密度为 $1\,700\text{ kg/m}^3$,剪切模量为 70 MPa ,体积模量为 100 MPa ,塑性屈服函数常数 D_0 为 $0.003\,4$, D_1 为 0.07 , D_2 为 0.3 。

6) 管片衬砌采用钢筋混凝土结构,其中,混凝土选用 RHT(Riedel-Hiermaier-Thoma)本构模型,密度为 $2\,750\text{ kg/m}^3$,剪切模量为 14.79 GPa ,静态抗压强度为 $0.040\,2\text{ GPa}$,状态方程系数 G_0 为 1.22 ,失效面参数 H_1 为 1.6 ,失效面参数 H_2 为 0.61 ,相对抗剪强度 FS^* 为 0.18 ,相对抗拉强度 FT^* 为 1 。钢筋选用 MPK(* MAT_PLASTIC_KINEMATIC)塑性随动模型,密度为 $7\,830\text{ kg/m}^3$,杨氏模量为 200 GPa ,泊松比为 0.28 ,屈服应力为 0.395 GPa ,切线模量为 1.081 GPa ,失效应变为 0.1 。具体参数由西安地铁一号线现场测试和文献^[24]得到。

有限元模型如图 2 所示,盾构管片编号如图 3 所示。假设爆炸发生在 H6 管片与 H7 管片接缝处正上方,由于爆炸左右两侧管片受冲击状态相同,故仅取右侧管片 H1—H6 进行研究。

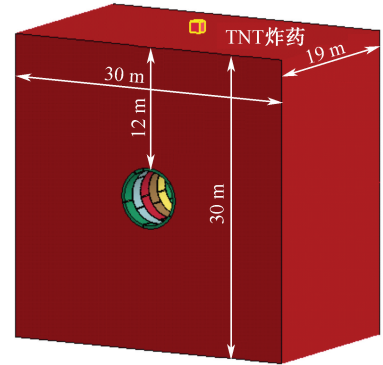


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model diagram

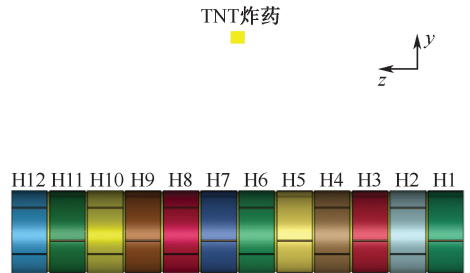


图3 管片编号

Fig. 3 Tunnel segments numbering

数据采集点如图 4 所示。以环管片侧腰 BC 之间的距离变化绝对值除以隧道外径计算 $\lambda(t)$;以环管片拱顶 A 处的竖直方向位移计算 $V(t)$;以环管片拱顶 A 处的水平方向位移计算 $H(t)$;以环管

片环中处的最大纵缝间距增加量计算 $\Delta L_1(t)$;以 A、B、C 这 3 点沿隧道走向最大环缝间距增加量计算 $\Delta L_2(t)$;以环管片 6 条纵缝环中位置的间距增加量中的最大错台量计算 $\Delta S_1(t)$;以 A、B、C 这 3 个位置处环缝最大错台量计算 $\Delta S_2(t)$ 。

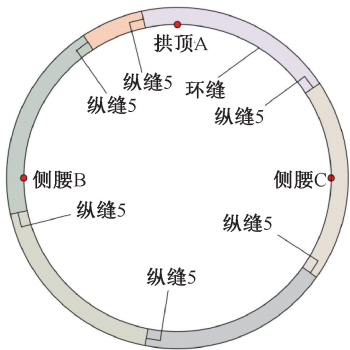


图 4 数据采集点

Fig. 4 Diagram of data collection points

2.2 模型验证

选用超压峰值经验公式^[25]计算外爆作用下土体不同位置的峰值压力与数值模拟结果,并进行对比分析,验证模型的可靠性。

计算 TNT 当量为 2 500 kg 时,各个管片比例距离 Z 为 0.2、0.4、0.6、0.8 的土单元峰值压力。提取数值模拟中对应各点峰值压力,结果见表 2。

表 2 峰值压力的经验公式预测值与数值模拟值的对比

Table 2 Comparison between empirical formula predictions and numerical simulation results for peak pressure

管片	Z	经验公式预测值/MPa	数值模拟值/MPa	误差/%
H1	0.2	23.508	21.206	-9.79
	0.4	3.494	3.169	-9.30
	0.6	1.146	1.041	-9.16
	0.8	0.519	0.468	-9.83

表 3 不同炸药当量 5 次爆炸后各管片韧性

Table 3 Statistical table of the resilience of each tunnel segment after after 5 explosions with different explosive equivalents

爆炸次数	炸药当量/kg	管片编号					
		H1	H2	H3	H4	H5	H6
1	500	0.951(I)	0.952(I)	0.947(I)	0.947(I)	0.928(I)	0.937(I)
	1 000	0.942(I)	0.942(I)	0.931(I)	0.931(I)	0.907(I)	0.913(I)
	1 500	0.939(I)	0.939(I)	0.923(I)	0.908(I)	0.897(I)	0.902(I)
	2 000	0.941(I)	0.939(I)	0.921(I)	0.913(I)	0.903(I)	0.901(I)
	2 500	0.934(I)	0.928(I)	0.911(I)	0.902(I)	0.874(I)	0.881(I)
2	500	0.922(I)	0.921(I)	0.913(I)	0.914(I)	0.884(I)	0.895(I)
	1 000	0.910(I)	0.907(I)	0.889(I)	0.890(I)	0.852(I)	0.861(I)
	1 500	0.906(I)	0.904(I)	0.880(I)	0.856(I)	0.840(I)	0.847(I)
	2 000	0.909(I)	0.905(I)	0.878(I)	0.864(I)	0.852(I)	0.846(I)
	2 500	0.900(I)	0.887(I)	0.860(I)	0.845(I)	0.804(I)	0.813(I)

续表 2

管片	Z	经验公式预测值/MPa	数值模拟值/MPa	误差/%
H2	0.2	23.508	21.351	-9.18
	0.4	3.494	3.189	-8.73
	0.6	1.146	1.037	-9.51
	0.8	0.519	0.472	-9.06
H3	0.2	23.508	21.428	-8.85
	0.4	3.494	3.291	-5.81
	0.6	1.146	1.248	8.90
	0.8	0.519	0.482	-7.13
H4	0.2	23.508	21.917	-6.77
	0.4	3.494	3.765	7.76
	0.6	1.146	1.206	5.24
	0.8	0.519	0.479	-7.71
H5	0.2	23.508	25.641	9.07
	0.4	3.494	3.798	8.70
	0.6	1.146	1.247	8.81
	0.8	0.519	0.533	2.70
H6	0.2	23.508	25.846	9.95
	0.4	3.494	3.822	9.39
	0.6	1.146	1.254	9.42
	0.8	0.519	0.566	9.06

由表 2 可知:对比经验公式预测值与数值模拟,相对误差值最大仅为 9.95%,表明模型可靠。

2.3 韧性评价

由表 1 计算韧性指标参数和韧性指标 q_i ,由式(1)计算各综合权重 w_i ,由式(2)一式(5)计算得到管片的 $Q(t)$ 和 R_e 。根据上述过程,计算 500、1 000、1 500、2 000、2 500 kg 的 TNT 炸药分别爆炸 5 次时各管片的韧性,并划分韧性等级,结果见表 3。绘制不同炸药当量作用下 H1 管片结构性能衰减曲线和 2 500 kg 炸药、5 次爆炸作用下各个管片结构性能衰减曲线,如图 5、图 6 所示。

续表 3

爆炸次数	炸药当量/kg	管片编号					
		H1	H2	H3	H4	H5	H6
3	500	0.890(I)	0.887(I)	0.875(I)	0.876(I)	0.839(I)	0.848(I)
	1 000	0.875(I)	0.867(I)	0.844(I)	0.844(I)	0.797(Ⅱ)	0.804(I)
	1 500	0.870(I)	0.863(I)	0.834(I)	0.803(I)	0.782(Ⅱ)	0.787(Ⅱ)
	2 000	0.874(I)	0.863(I)	0.831(I)	0.811(I)	0.794(Ⅱ)	0.784(Ⅱ)
	2 500	0.863(I)	0.840(I)	0.805(I)	0.779(Ⅱ)	0.730(Ⅱ)	0.742(Ⅱ)
4	500	0.863(I)	0.857(I)	0.839(I)	0.839(I)	0.797(Ⅱ)	0.803(I)
	1 000	0.844(I)	0.830(I)	0.803(I)	0.799(Ⅱ)	0.745(Ⅱ)	0.751(Ⅱ)
	1 500	0.834(I)	0.822(I)	0.790(Ⅱ)	0.751(Ⅱ)	0.725(Ⅱ)	0.728(Ⅱ)
	2 000	0.833(I)	0.819(I)	0.785(Ⅱ)	0.757(Ⅱ)	0.733(Ⅱ)	0.720(Ⅱ)
	2 500	0.821(I)	0.790(Ⅱ)	0.748(Ⅱ)	0.714(Ⅱ)	0.660(Ⅱ)	0.670(Ⅱ)
5	500	0.837(I)	0.829(I)	0.806(I)	0.804(I)	0.757(Ⅱ)	0.760(Ⅱ)
	1 000	0.816(I)	0.797(Ⅱ)	0.764(Ⅱ)	0.756(Ⅱ)	0.695(Ⅱ)	0.701(Ⅱ)
	1 500	0.797(Ⅱ)	0.782(Ⅱ)	0.746(Ⅱ)	0.702(Ⅱ)	0.671(Ⅱ)	0.671(Ⅱ)
	2 000	0.789(Ⅱ)	0.774(Ⅱ)	0.738(Ⅱ)	0.704(Ⅱ)	0.670(Ⅱ)	0.655(Ⅱ)
	2 500	0.777(Ⅱ)	0.740(Ⅱ)	0.691(Ⅱ)	0.650(Ⅱ)	0.592(Ⅲ)	0.599(Ⅲ)

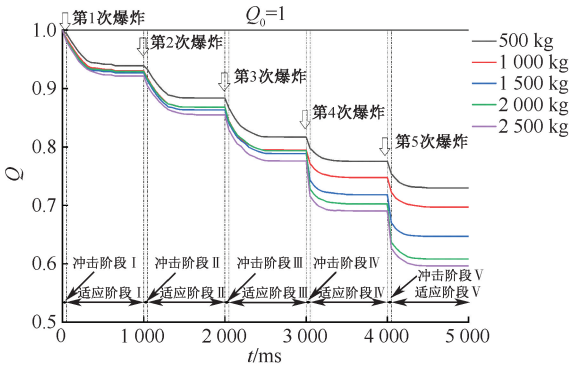


图 5 不同炸药当量下 H1 管片的结构性能衰减曲线
Fig. 5 Structural performance decay curves of H1 tunnel segments at different explosive equivalents

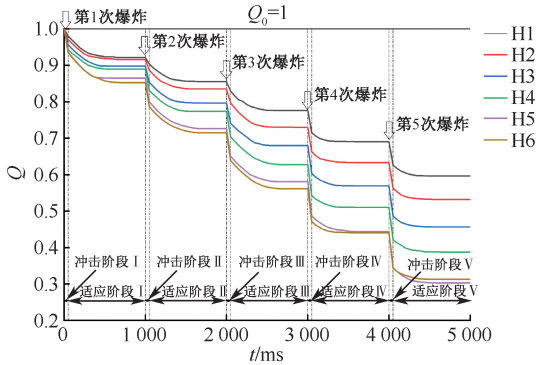


图 6 2 500 kg 炸药作用下地铁盾构隧道结构性能衰减曲线
Fig. 6 Structural performance decay curves of subway shield tunnel under the action of 2 500 kg explosives

由表 3 和图 5、图 6 可知：

1) 地铁盾构隧道管片爆心距越小、炸药当量越大，爆炸冲击作用越大，地铁盾构隧道韧性越小。

2) 随着爆炸次数的增加，地铁盾构隧道管片韧性持续降低，且降速不断增加。

3) H1、H2、H3、H4 管片在 5 种炸药当量 5 次爆炸后，韧性仍保持在中韧性及以上，不需修复；H5、H6 管片在 2 500 kg 炸药当量第 5 次爆炸后韧性降为低韧性，应采取一定的修复措施提高韧性等级。

3 基于 BP 神经网络地铁盾构隧道韧性预测

3.1 地铁盾构隧道预测模型建立

在 Matlab 中选取 newff 函数创建 BP 神经网络设置相关参数，构建前向传播神经网络^[26]，以炸药当量、管片编号和爆炸次数为输入层，隐藏层拟定为 1—6 层，输出层为管片韧性，建立多输入层—多隐藏层—单输出层的地铁盾构隧道韧性预测模型。

3.2 预测模型测试训练

由表 3 可知：5 种不同炸药当量（500、1 000、1 500、2 000、2 500 kg）在地铁隧道 H1—H6 管片上 5 次爆炸后的韧性量化数据共计 150 组，按照 2：1 将 150 组数据分为训练集（100 组）、测试集（50 组）以测试 BP 神经网络的学习能力。

隐藏层设置为 1—6 层，进行计算对比拟合优度 R^2 ， R^2 越接近 1，表明拟合度越好。结果显示，设为 5 层时，训练集与测试集的 R^2 分别为 0.975 5 和 0.977 5，高于其他隐藏层层数的 R^2 。综合考虑训练集与测试集的计算结果，隐藏层选用 5 层最优。

建立基于 BP 神经网络的 3 输入层—5 隐藏层—

单输出层的地铁盾构隧道韧性预测模型,并计算 150 组数据的真实值与训练值、测试值的拟合优度 R^2 、均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)、平均偏差误差 (Mean Bias Error, MBE)、均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE),结果见表 4。

表 4 评价指标统计

Table 4 Statistical table of evaluation indicators				
数据集	R^2	MAE	MBE	RMSE
训练集	0.975 5	0.009 113 2	0.000 678 49	0.011 486
测试集	0.977 5	0.011 143	0.002 151 6	0.013 799

由表 4 可知:训练集与测试集的 R^2 值均超过 0.95,MAE 值均低于 0.015,RMSE 值均低于 0.1,MBE 值均接近于 0,说明这些评价指标拟合准确程度高,可用于地铁盾构隧道韧性预测工作。

3.3 韧性预测与分析

基于 BP 神经网络的 3 输入层-5 隐藏层-单输出层的地铁盾构隧道韧性预测模型,预测 2 500 kg 炸药第 6 至第 8 次爆炸作用下各管片的韧性,预测结果见表 5 和图 7,韧性等级见表 6。

表 5 2500kg 炸药当量作用下各管片的韧性预测结果

Table 5 Predicted resilience of each tunnel segment under 2 500 kg explosive equivalents						
管片标号	爆炸次数	预测韧性	爆炸次数	预测韧性	爆炸次数	预测韧性
1	6	0.713	7	0.608	8	0.494
2	6	0.661	7	0.557	8	0.444
3	6	0.619	7	0.491	8	0.382
4	6	0.555	7	0.426	8	0.309
5	6	0.490	7	0.352	8	0.248
6	6	0.504	7	0.361	8	0.255

管片标号	爆炸次数	预测韧性	爆炸次数	预测韧性	爆炸次数	预测韧性
1	6	0.713	7	0.608	8	0.494
2	6	0.661	7	0.557	8	0.444
3	6	0.619	7	0.491	8	0.382
4	6	0.555	7	0.426	8	0.309
5	6	0.490	7	0.352	8	0.248
6	6	0.504	7	0.361	8	0.255

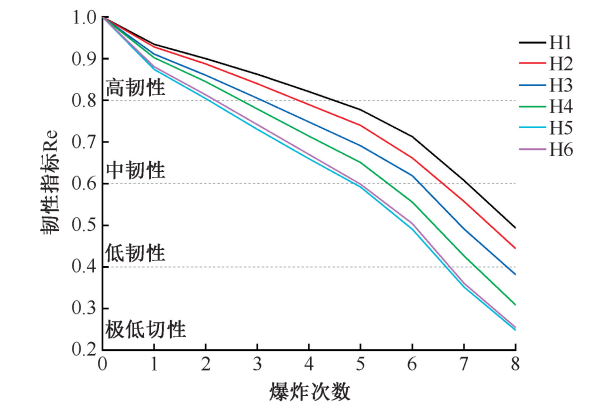


图 7 2 500 kg 炸药当量作用下各管片韧性

Fig. 7 Resilience of each tunnel segment under 2 500 kg explosive equivalents

表 6 2 500 kg 炸药当量下不同爆炸次数后各管片韧性等级

Table 6 Resilience grades for each tunnel segment after different numbers of explosions at 2 500 kg explosive equivalent								
管片编号	爆炸次数							
H1	I	I	I	I	II	II	II	III
H2	I	I	I	II	II	II	III	III
H3	I	I	I	II	II	II	III	IV
H4	I	I	II	II	II	III	III	IV
H5	I	I	II	II	III	III	IV	IV
H6	I	I	II	II	III	III	IV	IV

管片编号	爆炸次数							
H1	I	I	I	I	II	II	II	III
H2	I	I	I	II	II	II	III	III
H3	I	I	I	II	II	II	III	IV
H4	I	I	II	II	II	III	III	IV
H5	I	I	II	II	III	III	IV	IV
H6	I	I	II	II	III	III	IV	IV

由图 7、表 5、表 6 可知:

1) H1 管片在第 8 次爆炸后降为低韧性,H2 管片在第 7 次爆炸后降为低韧性;H3 管片在第 7 次爆炸后降为低韧性,第 8 次爆炸后降为极低韧性;H4 管片在第 6 次爆炸后降为低韧性,第 8 次爆炸后降为极低韧性;H5、H6 管片在第 5 次爆炸后降为低韧性,第 7 次爆炸后降为极低韧性。

2) 首次爆炸地铁盾构隧道韧性降低幅度最为明显,之后韧性降速较为缓慢;直至第 5 次爆炸后,韧性降低速度大大加快,地铁盾构隧道进入低韧性,需及时修复以满足运行要求;而第 7 次爆炸后降为极低韧性,已不能满足运行安全。

4 结 论

1) 根据爆炸作用下地铁盾构隧道韧性的定义,选取直径变形率、水平位移、竖向位移、接缝张开量和错台量为韧性评价指标,通过主客观权重法确定各指标权重,提出地铁盾构隧道结构性能衰减曲线和韧性 R_e 的计算公式,进而建立爆炸作用下地铁盾构隧道韧性评价体系和等级划分标准。

2) 以西安市地铁一号线为依托,分析不同炸药当量下 5 次外爆时地铁盾构隧道的韧性,结果表明:爆心距减小、炸药当量增大、爆炸次数增加均会致使地铁盾构隧道韧性下降。

3) 基于 BP 神经网络模型建立 3 输入层-5 隐藏层-单输出层的地铁盾构隧道韧性预测模型,预测第 6 次至第 8 次爆炸后的韧性,得到第 5 次爆炸后,韧性降低速度大大加快,地铁盾构隧道进入低韧性,需及时修复以满足运行要求,而第 7 次爆炸后降为极低韧性,已不能满足运行安全。

参考文献

- [1] 张建设, 黄艳龙, 李瑚均, 等. 基于改进 N-K 模型的地铁盾构掘进安全风险耦合研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(2): 67–75.
Zhang Jianshe, Huang Yanlong, Li Hujun, et al. Study on coupling of subway shield tunneling safety risk based on improved N-K model[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(2): 67–75.
- [2] Gao Jianxi, Barzel B, Barabási A. Universal resilience patterns in complex networks[J]. Nature, 2016, 530(7590): 307–312.
- [3] Meerow S, Newell J P, Stults M. Defining urban resilience: a review[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 147: 38–49.
- [4] Huang Hongwei, Zhang Dongming. Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: characterization and field application[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 301–312.
- [5] Henry D, Emmanuel R M J. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2012, 99: 114–122.
- [6] 李剑. 盾构公路隧道结构性能检测评估指标及应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(3): 549–556, 665.
Li Jian. Applied Research of index of the investigation and evaluation of the serviceability of the road shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(3): 549–556, 665.
- [7] 乔小雷, 董飞, 李奥, 等. 地铁大直径盾构隧道运营期结构安全状态评价研究[J]. 铁道勘察, 2023, 49(1): 119–125.
Qiao Xiaolei, Dong Fei, Li Ao, et al. Structural safety state evaluation of metro large diameter shield tunnel during operation[J]. Railway Investigation and Surveying, 2023, 49(1): 119–125.
- [8] Zhao Yuetang, Chu Cheng, Yi Yijun. Study on an engineering measure to improve internal explosion resistance capacity of segmental tunnel lining structures[J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(5): 2 997–3 009.
- [9] Lin Xingtao, Chen Xiangsheng, Su Dong, et al. An analytical model to evaluate the resilience of shield tunnel linings considering multistage disturbances and recoveries[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 127(2): DOI:10.1016/j.tust.2022.104581.
- [10] Huang Zhongkai, Zhang Dongmei, Pitilakis K, et al. Resilience assessment of tunnels: framework and application for tunnels in alluvial deposits exposed to seismic hazard[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 162: DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107456.
- [11] Cen Nan, Sansavini G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 157: 35–53.
- [12] Jiao Liudan, Wang Lyuwen, Lu Hao, et al. An assessment model for urban resilience based on the pressure-state-response framework and BP-GA neural network [J]. Urban Climate, 2023, 49 (10): DOI: 10.1016/j.uclim.2023.101543.
- [13] 路德春, 马超, 杜修力, 等. 城市地下结构抗震韧性研究进展[J]. 中国科学(技术科学), 2022, 52(10): 1 469–1 483.
Lu Dechun, Ma Chao, Du Xiuli, et al. Earthquake resilience of urban underground structures: state of the art[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022, 52(10): 1 469–1 483.
- [14] Penzien J. Seismically inciced racking of tunnel linings[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2000, 29(5): 683–691.
- [15] Zhao Tingsheng, Liu Wen, Ye Zhi. Effects of water intrush from tunnel excavation face on the deformation and mechanical performance of shield tunnel segment joints[J]. Advances in Civil Engineering, 2017, 2017(6): DOI:10.1155/2017/5913640.
- [16] 魏琳, 李丽华, 秦立强, 等. 城市地铁恐怖袭击事件应急能力综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 213–221.
Wei Lin, Li Lihua, Qin Liqiang, et al. Comprehensive evaluation of emergency response capability of urban subway terrorist attacks[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7): 213–221.
- [17] 朱旻, 陈湘生, 夏长青, 等. 地面堆载下盾构隧道结构韧性演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1):

35-44.

Zhu Min, Chen Xiangsheng, Xia Changqing, et al. Resilience evolution of shield tunnel structures under ground surcharge[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 46(1): 35-44.

- [18] 林星涛, 陈湘生, 苏栋, 等. 考虑多次扰动影响的盾构隧道结构韧性评估方法及其应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(4): 591-601.

Lin Xingtao, Chen Xiangsheng, Su Dong, et al. Evaluation method for resilience of shield tunnel linings considering multiple disturbances and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(4): 591-601.

- [19] Xu Min, Li Guoyuan, Chen Anthony. Resilience-driven post-disaster restoration of interdependent infrastructure systems under different decision-making environments[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2023, 241(6): DOI: 10.1016/j.ress.2023.109599.

- [20] Du Ao, Wang Xiaowei, Xie Yazhou, et al. Regional seismic risk and resilience assessment: methodological development, applicability, and future research needs: an earthquake engineering perspective[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 233: DOI:10.1016/j.ress.2023.109104.

- [21] 樊燕燕, 韩诗雨, 江旭, 等. 基于组合赋权-欧氏距离的高原铁路运营期安全系统韧性评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(9): 3 536-3 546.

Fan Yanyan, Han Shiyu, Jiang Xu, et al. Highland railway operational safety system resilience evaluation based on combined weighting-Euclid distance[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(9): 3 536-3 546.

- [22] 李心熙, 禹海涛. 沉管隧道纵向抗震韧性评价方法研究[J]. 震灾防御技术, 2023, 18(1): 37-43.

Li Xinxu, Yu Haitao. Seismic resilience assessment for longitudinal response of immersed[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2023, 18(1): 37-43.

- [23] Cheng Ruishan, Chen Wensu, Hao Hong, et al. A state-of-the-art review of road tunnel subjected to blast loads[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 112(4): DOI:10.1016/j.tust.2021.103911.

- [24] 邓鹏, 杨文涛, 胡世君, 等. 二次内爆作用下钢筋混凝土结构累积毁伤研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2025, 52(3): 119-128.

Deng Peng, Yang Wenxi, Hu Shijun, et al. Study on cumulative damage effects of reinforced concrete structure under double internal explosions[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2025, 52(3): 119-128.

- [25] 杨广栋, 王高辉, 卢文波, 等. 地表爆炸荷载作用下大型输水箱涵的毁伤评估及防护效应分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(5): 28-37.

Yang Guangdong, Wang Gaohui, Lu Wenbo, et al. Damage evaluation and protective effect analysis for a large-scale water transmission box culvert under action of ground surface blast loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(5): 28-37.

- [26] Liu Chenyang, Wang Yong, Hu X M, et al. Application of GA-BP neural network optimized by grey verhulst model around settlement prediction of foundation pit[J]. Geofluids, 2021, 3(9): 1-16.



作者简介: 王睿 (1981—),男,河北饶阳人,博士,副教授,主要从事隧道与城市地下工程施工技术及风险评估方面的研究。E-mail:wangrui@xatu.edu.cn。