

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.050

# 基于疲劳寿命的 40 t 轴重重载单线隧道隧底参数优化

苗德海<sup>1</sup>, 王克金<sup>1</sup>, 余俊<sup>2</sup>, 王阳明<sup>2</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 2. 中南大学 土木工程学院)

**摘要:**基于疲劳寿命分析方法对几内亚西芒杜新建 40 t 轴重重载铁路隧道进行隧底结构参数设计优化分析。考虑不同围岩等级、轴重、结构参数以及行车速度等的多种工况,采用动力有限元方法得到列车动载作用下隧底结构疲劳危险部位的应力时程曲线即应力水平,而后根据疲劳累积损伤理论,创新性地考虑应力疲劳与材料碳化的耦合,得到了不同工况隧底混凝土结构的使用寿命。最后给出了不同围岩级别下单线有砟铁路隧底结构优化参数,探讨了轴重和行车速度对结构疲劳寿命的影响规律。

**关键词:**重载铁路隧道; 隧底结构; 疲劳寿命; 参数优化

重载铁路现已成为全球各国铁路运输发展的主要趋势之一,新建和改造重载铁路也是继客运高铁之后中国铁路建设的新重点。但是随着轴重的显著增加和行车密度的提高,重载铁路隧道结构和围岩所受的动载强度及疲劳作用加大,易发生各种形式的结构病害,特别是隧底结构病害。据朔黄铁路 2008 年统计资料显示,该铁路沿线的隧道中,翻浆冒泥病害多达 882 处,造成隧道结构丧失承载能力,严重危及行车安全。究其原因就是,国内外对重载铁路隧道的荷载效应研究尚属初级阶段,对重载作用下隧道结构的动力特性及耐久性认识不足。

中国现有的 TB 10625—2017《重载铁路设计规范》通常适用于 30 t 以下轴重的重载铁路,40 t 轴重铁路隧道世界上尚未见报道,中国也无相对应的规范,相

关结构参数的确定缺乏理论依据。因此,有必要对 40 t 轴重重载铁路隧底结构的疲劳寿命开展深入、系统的研究。一方面,重载铁路隧道的病害往往不是隧道通车瞬间发生的破坏,而是日积月累产生的损伤;另一方面,仅根据隧道结构动力响应拟定隧底结构参数缺乏具体、科学的标准,而根据设计使用年限进行隧道结构疲劳寿命设计能够很好地解决上述问题。

针对隧道结构服役寿命耐久性问题,刘宁建立了隧道一围岩的数值模型,探讨了基底条件改变对隧底结构的动力响应特性的影响规律,基于 Miner 线性累积损伤理论,分析了基底状况对重载铁路隧道服役寿命的影响情况;彭立敏根据疲劳累积损伤理论,采用 Tepfers 的混凝土单对数疲劳方程求出隧道铺底混凝土结构的使用寿命及其损伤度。

- \*\*\*\*\*
- 力学与工程学报,2012(10).
- [2] 许桂生. 大跨浅埋暗挖隧道近接桥桩施工扰动影响及控制技术[J]. 中外公路,2019(1).
- [3] 李军. 软岩偏压隧道中夹岩施工扰动效应及控制技术研究[J]. 中外公路,2020(2).
- [4] 李海莉,张陈蓉,卢恺. 隧道开挖条件下埋管管线的非线性响应分析[J]. 岩土力学,2018(S1).
- [5] Sagaseta C. Analysis of Undrained Soil Deformation due to Ground Loss[J]. Geotechnique,1987(3).
- [6] Gollegger J. Numerical and Analytical Studies of the Compensation Grouting[D]. Austria: Graz University of Technology,2001.
- [7] 唐智伟,赵成刚,张顶立. 地下工程抬升注浆设计方法及其抬升效果预测研究[J]. 土木工程学报,2007(8).
- [8] 唐智伟,赵成刚,注浆抬升地层的机制、解析解及数值模拟分析[J]. 岩土力学,2008(6).
- [9] Zhang Min, Wang Xinghua, Wang You. Mechanism of Grout Bulb Expansion and Its Effect on Ground Uplifting [J]. Journal of Central South University of Technology, 2011(6).
- [10] 张世杰,刘人太,李术才,等. 砂土层注浆引起地表隆起机制分析及试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2018(4).
- [11] 张连震. 地铁穿越砂层注浆扩散与加固机理及工程应用[D]. 山东大学博士学位论文,2017.
- [12] 刘人太. 水泥基速凝浆液地下工程动水注浆扩散封堵机理及应用研究[D]. 山东大学博士学位论文,2012.

目前对轴重达到40 t的重载铁路隧道研究十分缺乏,对不同围岩级别下的重载铁路隧道的结构参数比选的研究也甚少,因此该文开展基于疲劳寿命的40 t轴重重载铁路隧道的关键结构参数设计研究。采用有限元软件GTS NX建立列车荷载—隧道—围岩耦合二维动力数值模型,分析不同围岩、不同结构参数、不同行车速度条件下重载铁路隧道底部结构的力学特性及动力响应规律,结合Miner线性累积损伤准则,探讨不同工况下隧底结构疲劳寿命变化规律,给出重载铁路结构参数建议值。

## 1 工程概况

几内亚西芒杜矿山铁路位于几内亚南部,靠近塞拉利昂边境,起点为科纳克里(Conakry)以南60 km的Morebaya河流大西洋入口,终点至Simandou矿区。线路全长约657 km,为单线、内燃牵引40 t轴重重载铁路;其中,隧道4座28.625 km,隧线比为4.4%,设计行车速度:重车80 km/h,空车100 km/h。列车编组为2L+80W+2L+80W+2L+80W+可控列尾,列车总长度为2 823 m。

主体结构设计使用年限为75年。Ⅱ~Ⅲ级围岩采用单层喷锚衬砌(基底采用底板封闭);Ⅳ~Ⅴ级围岩采用复合式衬砌(基底采用仰拱封闭),该文主要研究Ⅳ~Ⅴ级围岩仰拱封闭的隧底结构。

## 2 动力计算原理

### 2.1 列车振动荷载

依据英国铁路中心的试验测试结果,文献[4]、[5]一方面考虑了车轮在轨道上的运动特性和作用力的叠加效应,另一方面考虑了轨道本身的分散作用、不平整,最后得到一系列激振力函数(图1)来模拟列车的振动荷载,其具体表达式为:

$$P(t) = k_1 k_2 [P_0 + P_1 \sin(\omega_1 t) + P_2 \sin(\omega_2 t) + P_3 \sin(\omega_3 t)] \quad (1)$$

式中: $k_1$ 为轮轨力叠加系数; $k_2$ 为分散系数; $k_3$ 为车辆荷载; $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 均为振动荷载; $\omega_i$ 为与不平整相关的振动圆频率。

### 2.2 结构动力计算原理

根据Hamilton原理,隧道—围岩耦合系统的振动方程为:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{P(t)\} \quad (2)$$

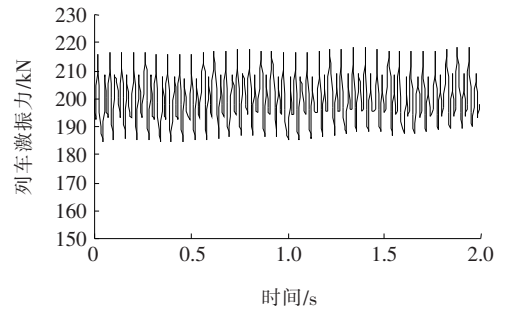


图1 列车激振力(40 t轴重, 120 km/h)

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 、 $\{P(t)\}$ 分别为总质量矩阵、总阻尼矩阵、总刚度矩阵以及时变节点力向量; $\{U\}$ 、 $\{\dot{U}\}$ 、 $\{\ddot{U}\}$ 分别为总位移向量、总速度向量和总加速度向量。

将隧道—围岩结构体系视为半无限域结构,采用人工动力边界以模拟半无限域对振动波的吸收作用。用于反映体系阻尼机制的瑞利(Rayleigh)阻尼表达式如下:

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为质量相关常数; $\beta$ 为刚度相关常数。基于结构体系的模态分析,数值模型参数分别取 $\alpha = 0.3$ ,  $\beta = 0.002$ 。

## 3 计算模型与计算工况

### 3.1 计算模型

采用大型有限元软件GTS NX建立隧道—围岩耦合二维计算模型,计算模型自隧道边墙左右各取50 m,竖直方向取仰拱中心以下50 m,计算模型见图2。

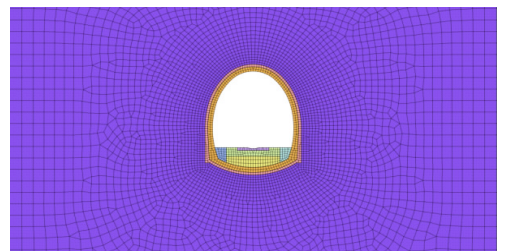


图2 二维计算模型

重载列车荷载以节点动力荷载施加在轨道结构上,进行非线性时程动力分析,计算结果取动力幅值。

### 3.2 计算工况

该文为了根据隧底结构使用寿命进行结构参数比选,首先计算了不同矢跨比(1:5, 1:6, 1:7, 1:8)和不同填充层厚度(0.9、1.1、1.3、1.5 m)下40 t轴重重

载单线有砟隧道的应力分布,根据寿命确定较优参数后计算在该参数下 21~40 t 不同轴重隧底结构寿命的分布规律,以及 40 t 轴重下不同行车速度(60、80、100、120 km/h)下寿命的变化规律。

### 3.3 计算参数

围岩及隧底参数取值见表 1、2。

表 1 围岩物理力学参数

围岩	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
V 级	20	0.6	0.35	50	25
VI 级	21	1.3	0.30	200	35

表 2 隧底结构力学参数

隧底结构	混凝土 等级	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松比	$f_t$ / MPa
二次衬砌	C35	25	31.5	0.20	1.57
初期支护	C25	25	30.0	0.20	1.27
混凝土基础	C30	25	30.0	0.20	1.43
填充层	C25	25	28.0	0.20	1.27
轨枕	C50	25	34.5	0.20	1.89
道砟	—	20	0.07	0.27	—

## 4 疲劳寿命分析与计算

### 4.1 隧底结构疲劳部位的确定

隧底主要由隧底衬砌结构和隧底围岩两部分组成,目前对隧道疲劳寿命的研究基本以隧道衬砌的疲劳损伤为控制标准。

近年来,疲劳寿命理论模型已由金属材料应用引入到混凝土结构应用中,在混凝土结构疲劳研究方面取得了一定的进展。

混凝土的疲劳分为单轴疲劳和多轴疲劳,其中单轴疲劳主要分为单轴受拉疲劳和单轴受压疲劳,需要根据结构实际受力状态选择其中最不利的疲劳类型。

由有限元分析得到的隧底结构应力变化规律见图 3。V 级围岩和 VI 级围岩下重载列车作用下有砟单线隧道的隧底结构附加应力主要表现为:

(1) 隧底结构的最大压应力水平远小于最大拉应力水平,故可判断隧底结构最终为受拉疲劳。

(2) 通过计算可知:隧底结构应力水平最大的两个部位为隧道中央二次衬砌下边缘和轨枕。其中:隧道中央二次衬砌下边缘的切向应力为拉应力,且其应

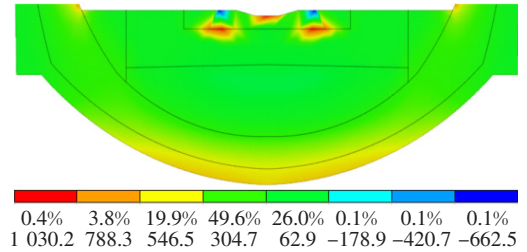


图 3 隧底应力分布(单位:kPa)

力水平绝对值大小和变化幅度都是轨枕以下隧底结构中最大的,可以判断隧底轨枕以下疲劳最危险部位为隧道中央二次衬砌;轨枕中间段上部、轨下段底部受拉,轨下段上部受压,应力水平最大处为轨下段底部。

### 4.2 危险部位疲劳寿命计算方法

Miner 线性疲劳累积损伤准则适用于高周疲劳荷载下的结构疲劳寿命分析,目前对隧道混凝土结构的疲劳寿命的研究普遍在 Miner 线性累积损伤准则的基础上,利用疲劳试验得到的混凝土 S-N 曲线进行隧道结构寿命的计算。

但是上述计算方法仅仅考虑应力造成的疲劳,忽略了很多对混凝土结构服役寿命有显著影响的环境因素,由此导致隧道结构寿命的计算结果与实际情况偏差较大。混凝土材料的碳化就是影响最大的环境因素之一,蒋金洋提出了疲劳载荷与碳化耦合作用下结构混凝土寿命预测模型,更加全面地分析了载荷与环境因素作用下的损伤劣化。

$$X(T) = \sqrt{365 \times 24 \times 3600} \times \sqrt{2c_s D_0 T k_{curing} k_{RH} k_{\theta} k_{load}} \quad (4)$$

式中: $X(T)$ 为混凝土结构服役  $T$  年的碳化深度(m);当其达到二衬保护层厚度  $a_s$  时可认为隧底结构耐久性失效; $c_s$  为混凝土结构服役环境  $\text{CO}_2$  浓度(%); $T$  为混凝土结构服役寿命(年); $k_{curing}$  为混凝土养护龄期系数; $D_0$  为  $\text{CO}_2$  在混凝土中的基准扩散速度( $\text{m}^2/\text{s}$ ); $k_{RH}$  为混凝土服役环境中相对湿度影响系数; $k_{\theta}$  为混凝土服役环境中温度影响系数; $k_{load}$  为疲劳载荷影响系数,计算式如下:

$$k_{load} = 1 + \frac{0.785 \times 365 n_d T \epsilon_B^P}{365 n_d T \epsilon_B^P + 1.8 \times 10^{(a-S)/b}} \cdot \frac{D_c}{D_0} \quad (5)$$

式中: $n_d$  为每日疲劳载荷作用次数; $\epsilon_B^P$  为混凝土疲劳损伤过程中第二发展阶段结束时对应的残余应变; $D_c$  为  $\text{CO}_2$  在混凝土裂缝中的扩散速度( $\text{m}^2/\text{s}$ ); $a$ 、 $b$  为混凝土疲劳 S-N 曲线参数。式中参数的计算详见文献[8],取值见表 3。

表 3 疲劳载荷与碳化耦合模型参数

$c_s / \%$	$k_{curing}$	$k_{RH}$	$k_\theta$	$\epsilon_B^p$	$n_d$	$D_c / (m^2 \cdot s^{-1})$	$D_0 / (m^2 \cdot s^{-1})$
20	1.0	0.465	1.68	$120 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^4$	$8.85 \times 10^{-6}$	$3.71 \times 10^{-11}$

4.3 不同工况的局部应力谱

应用有限元计算软件可计算出不同工况在列车动载通过隧道时,在隧底结构最危险位置产生的拉应力、压应力的变化。图 4 为 V 级围岩下单线有砟隧道(轴重 40 t,行车速度 120 km/h)的隧底拉应力的应力谱。

求得隧底结构在列车动载作用下的应力谱后,可根据式(4)求得隧底混凝土在列车荷载作用下的疲劳寿命如表 4 所示。

由表 4 可知:

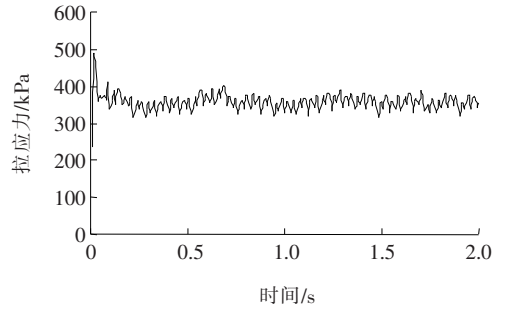


图 4 隧底拉应力谱

表 4 不同工况下单线有砟铁路隧道结构寿命

围岩等级	不同轴重(t)时寿命/年								不同矢跨比(轴重 40 t, 行车速度 120 km/h)时寿命/年				不同填充层厚度(m) (轴重 40 t, 行车速度 120 km/h)时寿命/年				不同行车速度(km/h)时寿命/年			
	21	24	27	30	33	36	40		1:5	1:6	1:7	1:8	0.9	1.1	1.3	1.5	60	80	100	120
V	194.92	178.38	161.83	145.29	126.49	106.13	78.98	99.50	78.98	63.95	57.17	39.99	78.98	126.16	165.70	98.65	92.60	92.26	78.98	
VI	175.95	161.71	147.47	133.22	129.47	111.95	88.58	108.52	95.51	85.75	74.12	61.24	85.75	111.01	135.72	98.90	94.75	94.75	85.75	

注: V 级围岩矢跨比为 1:6, 填充层厚为 1.1 m; VI 级围岩矢跨比为 1:7, 填充层厚为 1.1 m。

(1) 对于 V 级、VI 级围岩,单线隧道和双线隧道的隧底结构的疲劳寿命随着矢跨比的减小而减小。对于 40 t 轴重 V 级有砟隧道矢跨比为 1:7~1:8 时,使用寿命为 63.95~57.17 年;矢跨比为 1:6 时,使用寿命为 78.98 年,矢跨比建议取值为 1:6 或以上。对于 40 t 轴重 VI 级有砟隧道矢跨比为 1:8 时,使用寿命为 74.12 年,矢跨比为 1:7 时,使用寿命为 85.75 年,矢跨比建议取值为 1:7 或以上。

在满足服役寿命的前提下,建议选择使用材料更少即矢跨比更小的结构参数。

(2) 对于 V 级、VI 级围岩,有砟隧道的隧底结构的疲劳寿命随着填充层厚度的增大而增大。对于 40 t 轴重 V 级有砟隧道填充层厚度为 0.9 m 时,使用寿命为 39.99 年;填充层厚度为 1.1 m 时,使用寿命为 78.98 年,填充层厚度建议取值为 1.1 m 或以上。VI 级围岩同理。

在满足服役寿命的前提下,建议选择使用材料更少即填充层厚度更小的结构参数。

5 规律分析及参数比选

(1) V、VI 级围岩条件下隧底结构疲劳寿命关系见图 5。

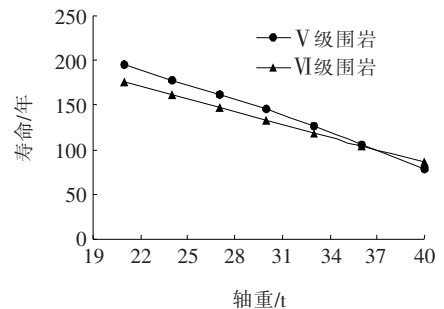


图 5 轴重-寿命曲线

由图 5 可见:

对于 V 级、VI 级围岩,单线有砟隧道隧底结构的疲劳寿命随着轴重的增加而减小,在轴重接近 40 t 时,寿命也接近几内亚重载铁路隧道设计使用年限 75 年,



表明轴重接近 40 t 时隧道结构参数的选取会非常关键。

(2) 对于 V 级和 VI 级围岩,有砟隧道隧底结构的疲劳寿命随着行车速度的变化关系见图 6。

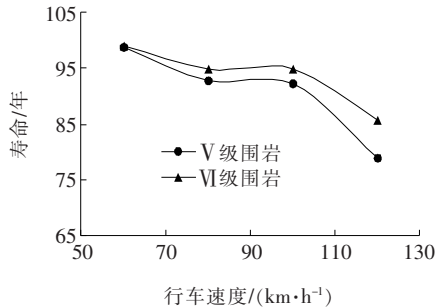


图 6 行车速度—寿命曲线

由图 6 可知:疲劳寿命随行车速度的增加而减小,且在 100~120 km/h 区间寿命减小最快。

(3) 建议隧底结构参数见表 5。

表 5 建议结构参数取值

V 级围岩		VI 级围岩	
矢跨比	填充层厚度/m	矢跨比	填充层厚度/m
≥1:6	≥1.1	≥1:7	≥1.1

## 6 结论

(1) 在有限元分析计算的基础上,采用线性疲劳累积损伤理论对隧底混凝土结构的使用寿命进行了计算分析,该文给出的重载铁路隧道寿命随轴重、结构参数和行车速度变化的演变规律为 40 t 轴重重载铁路隧道设计提供了参考,40 t 以上轴重的重载铁路隧道结构设计也可以按照相应的研究方法进行研究。

(2) 根据计算结果,重载铁路轴重变化引起的隧底结构应力变化规律接近线性,而考虑碳化的服役寿命变化规律也接近线性,当轴重达到 40 t 时 V 级、VI 级围岩的单线有砟铁路隧道使用寿命已经比较接近几内亚隧道使用年限 75 年。对于 40 t 轴重重载铁路隧道,行车速度成为结构参数选择的控制因素,结构参数(矢跨比、填充层厚度)成为隧道耐久性能否满足要求的关键因素。

(3) 计算结果表明:增大矢跨比和增大填充层厚度都能延长隧底结构使用寿命;该文的研究即是希望在满足服役寿命的前提下,选择矢跨比较优的或填充层厚度较小的结构参数,选取造价及结构受力状态较为合理的下限设计参数。

## 参考文献:

- [1] 苗雷强,岳祖润,冯怀平.既有重载铁路路基翻浆冒泥成因及防治措施[J].安徽建筑,2014(1).
- [2] 刘宁,彭立敏,施成华,等.基底条件对重载铁路隧底结构动力响应的影响及服役寿命分析[J].现代隧道技术,2016(5).
- [3] 彭立敏,施成华,黄娟,等.列车荷载作用下隧道铺底结构疲劳寿命分析[J].铁道学报,2007(1).
- [4] 丁祖德,杜永刚,彭立敏,等.基底围岩性状对高速铁路隧道结构动力响应的影响分析[J].现代隧道技术,2015(3).
- [5] 克拉夫,彭津.结构动力学[M].北京:科学出版社,1981.
- [6] 姚卫星.结构疲劳寿命分析[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [7] 蒋金洋,孙伟,金祖权,等.疲劳载荷与碳化耦合作用下结构混凝土寿命预测[J].建筑材料学报,2010(3).
- [8] 蒋金洋.超高程泵送钢纤维混凝土的服役性能研究[D].东南大学博士学位论文,2008.
- [9] 尹成斐,付兵先,马伟斌.重载列车作用下隧道结构的动应力分析[J].中国铁道科学,2013(3).
- [10] 林越翔,彭立敏,施成华,等.重载作用下铁路隧道底部结构动力响应特征及合理设计参数研究[J].现代隧道技术,2017(5).
- [11] 李自强,王明年,于丽,等.重载铁路隧道基底结构的动压力响应[J].中国铁道科学,2016(1).
- [12] 黄娟,彭立敏,施成华.基底富水条件下隧道铺底结构疲劳寿命的试验研究[J].铁道学报,2009(1).
- [13] 娄会彬.重载车辆作用下无砟轨道结构力学分析[D].西南交通大学硕士学位论文,2014.
- [14] 邓伟,葛允雷,杨果林,等.基于新奥法浅埋隧道的围岩压力计算方法[J].中外公路,2018(5).
- [15] 黄娟.基于损伤理论的高速铁路隧道结构振动响应分析及疲劳寿命研究[D].中南大学博士学位论文,2010.
- [16] 刘聪,彭立敏,雷明锋,等.重载铁路隧道底部结构疲劳性能及累积损伤试验研究[J].中国铁道科学,2019(4).