

# 城市轨道交通新型网孔式弹性道床垫力学性能研究<sup>\*</sup>

王志璇 和振兴 包能能 白彦博

(兰州交通大学机电工程学院, 730070, 兰州//第一作者, 硕士研究生)

**摘要** 目的: 网孔式弹性道床垫作为一种新型的道床垫, 需要对其力学性能进行研究, 以验证其应用于道床减振的可行性。方法: 以既有 USM 型弹性道床垫及新型网孔式弹性道床垫作为研究对象, 分析了这两种道床垫的结构特征, 分别建立了两种道床垫的有限元模型。基于有限元模型模拟了两种弹性道床垫的动静刚度试验, 在材料参数及其他尺寸参数不变的前提下, 依次改变内接圆直径  $R_2$  及道床垫厚度  $h_2$  的取值, 分析新型网孔式弹性道床垫应力及静刚度的变化规律。对两种弹性道床垫的综合性能(体积、最大应力、动静刚度)进行对比。结果及结论: 新型网孔式弹性道床垫应用于道床减振具有可行性。改变  $R_2$  及  $h_2$ , 可以灵活调整新型网孔式弹性道床垫的刚度。在相同受力面积、相同刚度及相同载荷的条件下, 新型网孔式弹性道床垫的体积较既有 USM 型弹性道床垫降低了 40.7%, 所用材料可大幅节省。新型网孔式弹性道床垫的最大应力值较既有 USM 型弹性道床垫降低了 43.0%, 有利于提高道床垫的使用寿命。新型网孔式弹性道床垫的动静刚度比较既有 USM 型弹性道床垫更大, 表明其具有更好的振动衰减能力。

**关键词** 城市轨道交通; 道床减振; 弹性道床垫; 有限元分析; 力学性能对比

**中图分类号** U213.2<sup>+</sup>4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.11.009

## Research on the Mechanical Properties of a New Mesh-type Slab Track Mat for Urban Rail Transit

WANG Zhixuan, HE Zhenxing, BAO Nengneng, BAI Yanbo

**Abstract** Objective: As a new type of elastic track mat, the mesh-type elastic track mat needs to be studied for its mechanical properties to verify its feasibility in applying to track bed vibration reduction. Method: Two types of elastic track mats, the existing USM-type elastic track mat and the new mesh-type elastic track mat, are taken as research objects. The structural characteristics of the two types of elastic track mats are analyzed, and finite element models are established for

each of them. Based on the models, dynamic and static stiffness tests of the two types of elastic track mats are simulated. Without varying the material parameters and other dimensional parameters, the values of the inner diameter  $R_2$  and the thickness  $h_2$  are changed sequentially, and the variation laws of stress and static stiffness of the new mesh-type elastic track mat are analyzed. The comprehensive performance (volume, maximum stress, dynamic and static stiffness) of the two types of elastic track mats is compared. Result & Conclusion: The application of the new mesh-type elastic track mat is feasible. Changing  $R_2$  and  $h_2$  can flexibly adjust the stiffness characteristics of the new mat. Under the same force area, stiffness, and load conditions, the volume of the new mesh-type elastic track mat is reduced by 40.7% compared to the existing USM-type elastic track mat, greatly saving materials. The maximum stress value of the new mesh-type slab track mat is reduced by 43.0% compared to the existing USM-type elastic ballast mat, which is beneficial to improve the service life of the ballast mat. The dynamic and static stiffness of the new mesh-type elastic track mat is greater than that of the existing USM-type elastic track mat, indicating that it has better vibration attenuation ability.

**Key words** urban rail transit; vibration reduction of ballast bed; elastic track mat; finite element analysis; comparison of mechanical properties

**Author's address** School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 730070, Lanzhou, China

## 1 概述

弹性道床垫减振轨道是一种典型的道床减振结构, 因具有结构简单、施工方便、工程造价低等优点得到广泛应用。弹性道床垫减振轨道的减振性能由设置在道床下的弹性道床垫决定, 目前我国主要采用从德国引进的 USM 型弹性道床垫减振轨道。

近年来, 国内外学者对弹性道床垫减振轨道进

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51868037); 牵引动力国家重点实验室开放课题(TPL1902); 甘肃省科技计划项目(20JR5RA393)

了大量的理论及实测研究。文献[1]建立了橡胶隔振垫整体道床三维有限元模型,分析了单元道床板的模态特征,其结论为:单元轨道板越长,一阶主振型对应的频率越低;当单元轨道板长度大于 5 m 时,轨道板主要表现为沉浮振型。文献[2]基于考虑轮轨耦合作用有限元模型的研究发现,弹性道床垫减振轨道在 25 ~ 100 Hz 频段的减振效果较好。文献[3]分析了减振垫力学频变特性对弹性道床垫轨道结构固有频率及导纳特性的影响。文献[4]研究了弹性道床垫的温变特性及其对轮轨系统的影响,其结论为:弹性道床垫的刚度具有显著的低温敏感性。文献[5]采用多岛遗传算法对弹性道床垫减振轨道进行了参数优化,其结论为:与现有弹性道床垫减振轨道相比,优化后的弹性道床垫减振轨道 Z 振级可提高 4.92 dB。

既有研究重点关注弹性道床垫减振轨道的设计参数对其模态特征、减振效果及稳定性的影响,但对弹性道床垫自身力学特性和结构参数的研究尚未引起重视。针对弹性道床垫老化后需要更换这一技术难题,一方面应研究弹性道床垫的可行更换方法,另一方面应研究使用寿命更长的弹性道床垫。为此,文献[6]提出了一种轨道交通高阻尼、位移量可调的弹性垫板,介绍了该垫板在铁路扣件系统中的应用;文献[7]分析了网孔结构参数对网孔式弹性垫板力学性能的影响;文献[8]研究了网孔式弹性垫板的动静刚度特性;文献[9]表明了网孔式弹性垫板具有明显的低温敏感性。

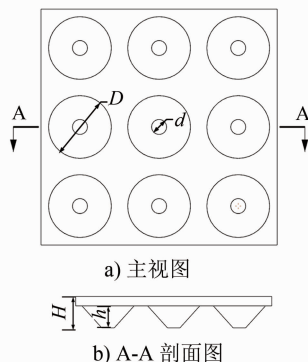
基于上述对网孔式弹性垫板的研究,本文提出了一种新型网孔式弹性道床垫。通过与既有 USM 型弹性道床垫的对比分析,研究其在道床减振中应用的可行性。

## 2 道床垫结构特征分析

### 2.1 既有 USM 型弹性道床垫的结构特征

既有 USM 型弹性道床垫减振轨道采用的是德国引进的 USM 系列圆锥截顶型弹性道床垫,其结构如图 1 所示。该弹性道床垫分为上下两层,其中:上层由纤维复合材料构成,主要用于限制变形及均匀所受压力;下层由橡胶材料制成,起到隔振减振的作用。在长期使用过程中,这种结构的弹性道床垫由于应力呈集中分布,其弹性锥体可能会产生蠕变、压缩永久变形及老化,进而导致性能下降。此

外,纤维增强层与弹性减振层间的粘合可靠度也会随着使用时长的增加而降低<sup>[10]</sup>。



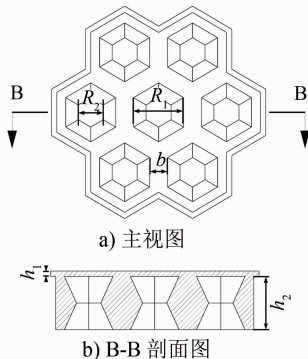
注:  $D$ —圆台的外直径;  $d$ —圆台的内直径;  $H$ —道床垫厚度;  $h$ —圆台的高度。

图 1 既有 USM 型弹性道床垫结构示意图

Fig. 1 Structural schematic diagram of existing USM type elastic track mat

### 2.2 新型网孔式弹性道床垫的结构特征

基于本文提出的新型网孔式垫板结构,设计了新型网孔式弹性道床垫,其结构如图 2 所示。该道床垫分为支撑层和减振层 2 个部分。支撑层由橡胶材料制成,主要起到 2 个作用:一是防止混凝土浇筑时混凝土进入减振层,影响减振性能;二是均布弹性道床垫受到的载荷。减振层由橡胶材料制成,是减振、隔振的关键。



注:  $R_1$ —外正六边形内接圆直径;  $R_2$ —内正六边形内接圆直径;  $b$ —网孔间距;  $h_1$ —支撑层厚度;  $h_2$ —道床垫厚度。

图 2 新型网孔式弹性道床垫结构示意图

Fig. 2 Structural schematic diagram of new mesh type elastic track mat

## 3 建立道床垫有限元模型

本文分别建立既有 USM 型弹性道床垫、新型网孔式弹性道床垫的有限元模型。通过模拟橡胶垫的动静刚度试验,研究结构参数变化对网孔式弹性道床垫力学性能的影响,并将两种弹性道床垫的

综合性能进行对比分析。

### 3.1 计算方法

#### 3.1.1 静刚度计算方法

静刚度是物体在静载荷下抵抗变形的能力。其计算式为:

$$K_s = \frac{F_2 - F_1}{S_2 - S_1} \quad (1)$$

式中:

$K_s$ ——弹性道床垫的静刚度;

$F_1$ ——空载情况下弹性道床垫受力;

$F_2$ ——满载情况下弹性道床垫受力;

$S_1$ —— $F_1$  荷载作用下弹性道床垫的位移;

$S_2$ —— $F_2$  荷载作用下弹性道床垫的位移。

#### 3.1.2 动刚度计算方法

动刚度是物体在动载荷作用下抵抗变形的能力。当弹性道床垫承受周期性正弦变化的应力时,其应变也呈周期性正弦变化。但是,由于弹性道床垫大多由橡胶材料制成,橡胶材料具有黏弹特性,其应变滞后于应力,因此应力的正弦波与应变的正弦波之间会形成相位差,其具体表现为在力-位移曲线上形成 1 个椭圆形的迟滞曲线。由该迟滞曲线可以计算出弹性道床垫的动刚度  $K_d$  和动静刚度比  $I$ ,其计算式分别为:

$$K_d = F_T / X_0 \quad (2)$$

$$I = K_d / K_s \quad (3)$$

式中:

$F_T$ ——最大荷载与最小荷载的差值;

$X_0$ ——最大荷载产生位移与最小荷载产生位移的差值。

### 3.2 材料设置

弹性道床垫一般由橡胶材料制成,橡胶材料在小变形范围内可视为线弹性材料。为提高有限元软件的计算速度,本文默认弹性道床垫受压时属于小范围变形,弹性道床垫材料属性为线弹性。设橡胶材料的剪切模量为  $G$ ,  $G$  主要取决于橡胶材料的硬度,不会由于橡胶种类或成分的不同而呈明显变化。设橡胶材料的绍尔硬度为  $H_s$ , 橡胶材料的弹性模量为  $E$ 。  $G$  的计算式、 $G$  和  $E$  的关系式分别为:

$$G = 0.117e^{0.03H_s} \quad (4)$$

$$E = 3G \quad (5)$$

通过计算,  $E$  的取值范围为 0.45~7.05 MPa。为此,本文两种弹性道床垫的  $E$  均取 1.10 MPa。

此外,由于橡胶材料具有黏弹性,本文考虑在设置材料属性时加入黏弹性参数。黏弹性本构模型采用 Prony 模型。

### 3.3 边界条件加载方式

在实施动刚度及静刚度试验时,为保证加载面均匀受力且加载面具有足够的刚度,需要在试验橡胶垫的上、下方分别安放 1 块铁垫板。由于承载钢板受压变形后会导致弹性道床垫的局部位移不均匀,故将承载钢板与支承钢板设为刚体。模型主要承受垂向荷载,因此,弹性道床垫与承载刚体、支承刚体之间的摩擦可忽略不计,承载刚体下表面和道床垫上表面、道床垫下表面和支承刚体上表面均采用绑定接触。支承刚体下表面完全固定。静刚度试验所施加的加载力为道床垫实际工作过程中受到的最大载荷。

轨道板下弹性道床垫承受载荷  $P$  的计算式<sup>[5]</sup>为:

$$P = W_1 + W_2 \quad (6)$$

式中:

$W_1$ ——钢轨与 1 块轨道板单元的重力;

$W_2$ ——列车 1 个转向架作用于轨道板中心处时的重力,即列车重力的 1/2。

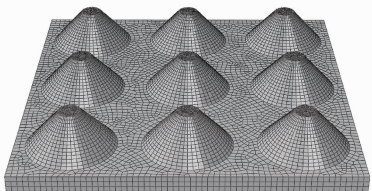
本文采用的钢轨类型为 60 kg/m,钢轨密度为 7 850 kg/m<sup>3</sup>。轨道板采用 C50 混凝土,其尺寸为 3.6 m(长)×2.3 m(宽)×0.3 m(高),密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>。地铁车辆采用 B 型车,车体质量为 37.0 t,转向架质量为 3.6 t,轮对质量为 1.7 t,车辆定距为 12.66 m<sup>[11]</sup>。由此可得轨道板下弹性道床垫承受载荷  $P=3.21 \times 10^5$  N。

根据本文所建立道床垫模型的面积与轨道板的面积比值,在静刚度试验时对弹性道床垫施加 1 206 N 的载荷,动刚度试验时对弹性道床垫施加 0~800 N 的周期正弦载荷(频率为 5 Hz)。

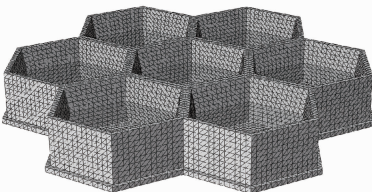
### 3.4 弹性道床垫有限元模型

图 3 为本文构建的既有 USM 型弹性道床垫及新型网孔式弹性道床垫的有限元模型。

1) 建立的既有 USM 型弹性道床垫有限元模型如图 3 a) 所示。为保证两种弹性道床垫受力面积一致,既有 USM 型弹性道床垫的尺寸参数如下:长度为 188 mm,宽度为 188 mm;面积为 35 344 mm<sup>2</sup>;  $H=30$  mm;  $h=21$  mm;  $d=12$  mm;  $D=50$  mm; 2 个圆台中心的间距为 63 mm。模型网格采用 C3D8R 单元,单元总数为 55 419 个。



a) 既有 USM 型弹性道床垫



b) 新型网孔式弹性道床垫

图3 弹性道床垫有限元模型

Fig. 3 Finite element model of elastic track mat

2) 综合考虑弹性道床垫的受力特性,建立的网孔式弹性道床垫有限元模型如图 3 b) 所示。其参数如下: $h_1=3\text{ mm}$ ;面积为 $35\,386\text{ mm}^2$ ; $R_1=35\text{ mm}$ ; $R_2=32\text{ mm}$ ; $b=3\text{ mm}$ ; $h_2=36\text{ mm}$ 。模型网格划分采用 C3D10M 单元,单元总数为 63 535 个。

4 参数变化对新型网孔式弹性道床垫力学性能的影响

在各材料参数,以及  $R_1$  和  $b$  均不变的条件下,依次改变  $R_2$  及  $h_2$  的取值,分析新型网孔式弹性道床垫应力及静刚度的变化规律。

4.1 内接圆直径  $R_2$  的影响

在橡胶的其他参数不变的前提下,选取  $R_2$  等于 30 mm、31 mm、32 mm 及 33 mm 四种情况,得到新型网孔式弹性道床垫的载荷-位移响应曲线如图 4 所示。

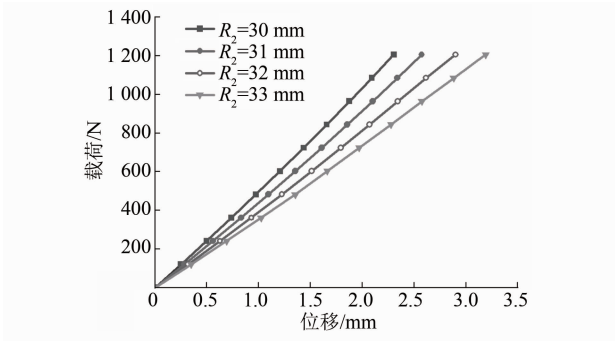


图4 不同内接圆直径  $R_2$  下的载荷-位移响应曲线

Fig. 4 Load displacement curve under different inner circle diameters  $R_2$  values

根据式(1)计算出不同  $R_2$  对应的静刚度,得到新型网孔式弹性道床垫最大应力及静刚度的计算结果,如表 1 所示。由表 1 可知:随着  $R_2$  的增大,最大应力随之逐渐增大,而静刚度的变化趋势则与最大应力相反。通过计算可得, $R_2$  由 30 mm 增至 33 mm,最大应力增加了 14.7%,静刚度降低了 29.0%。这是由于  $R_2$  的增大使得道床垫弹性阻尼层的支撑范围有所减少,故其静刚度减小。新型网孔式弹性道床垫的最大应力主要集中于网孔单元整体 1/3 高度位置,这是由于道床垫在受压过程中主要承受剪切应力。增大  $R_2$  会使网孔内壁斜率增大,进而使得网孔单元抗剪切能力降低。因此,新型网孔式弹性道床垫的最大应力随  $R_2$  增大而增大。

表 1 不同内接圆直径  $R_2$  下新型网孔式弹性道床垫的最大应力及静刚度

Tab. 1 Maximum stress and static stiffness of new mesh type elastic track mat with different inner circle diameters  $R_2$  values

$R_2/\text{mm}$	最大应力/MPa	静刚度/(N/mm)
30	0.448	509.5
31	0.469	462.1
32	0.476	414.1
33	0.514	361.5

4.2 道床垫厚度  $h_2$  的影响

保持材料参数和其他参数不变,选取  $h_2$  等于 34 mm、35 mm、36 mm 及 37 mm 四种情况,得到新型网孔式弹性道床垫的载荷-位移响应曲线如图 5 所示。

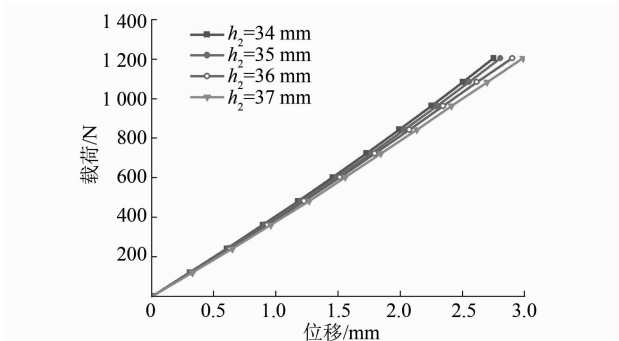


图5 不同道床垫厚度  $h_2$  下的载荷-位移响应曲线

Fig. 5 Load-displacement curves under different mat thicknesses  $h_2$  values

根据式(1)计算出不同  $h_2$  对应的静刚度,得到新型网孔式弹性道床垫最大应力及静刚度的计算



结果,如表 2 所示。由表 2 可知:增加  $h_2$  对最大应力及静刚度的影响均较小, $h_2$  从 34 mm 增至 37 mm,最大应力仅增加 3.2%,静刚度仅降低了 8.4%。因此,改变  $h_2$  能够调节网孔式弹性道床垫的力学性能,但对调整后的力学性能影响较小。

表 2 不同道床垫厚度  $h_2$  下新型网孔式弹性道床垫的最大应力及静刚度

Tab. 2 Maximum stress and static stiffness of new mesh type elastic track mat with different thickness  $h_2$  values

$h_2/\text{mm}$	最大应力/MPa	静刚度/(N/mm)
34	0.472	438.4
35	0.478	423.6
36	0.482	412.4
37	0.487	401.5

## 5 两种弹性道床垫的综合性能对比

根据 3.1.1 所述计算方法,对既有 USM 型弹性道床垫进行静刚度试验,得到既有 USM 型弹性道床垫的静刚度为 403.0 N/mm。选择尺寸为  $R_1=35\text{ mm}$ 、 $R_2=32\text{ mm}$ 、 $b=3\text{ mm}$  及  $h_2=36\text{ mm}$  的新型网孔式弹性道床垫,其静刚度为 413.0 N/mm。将新型网孔式弹性道床垫与既有 USM 型弹性道床垫进行综合性能对比。

### 5.1 体积对比

经过计算,新型网孔型弹性道床垫的体积为  $2.84\times10^5\text{ mm}^3$ ,既有 USM 型弹性道床垫的体积为  $4.79\times10^5\text{ mm}^3$ 。两种道床垫在受力面积几乎完全相同的情况下,新型网孔型弹性道床垫的体积与既有 USM 型弹性道床垫体积相比减少了 40.7%,这表明了新型网孔型弹性道床垫在制造时更加节省材料,可有效降低道床垫的生产成本。

### 5.2 最大应力对比

取弹性道床垫的中心单元进行应力分析。新型网孔型弹性道床垫的网孔单元、既有 USM 型弹性道床垫锥体单元的应力分布如图 6 所示。由图 6 可知:新型网孔式弹性道床垫最大应力点位于网孔单元壁上,最大应力为 0.482 6 MPa;既有 USM 型弹性道床垫最大应力点位于锥体单元的内部,最大应力为 0.846 4 MPa;相比于既有 USM 型弹性道床垫,新型网孔式弹性道床垫的最大应力下降了 43.0%,这说明新型网孔式弹性道床垫的应力明显小于既有 USM 型弹性道床垫。

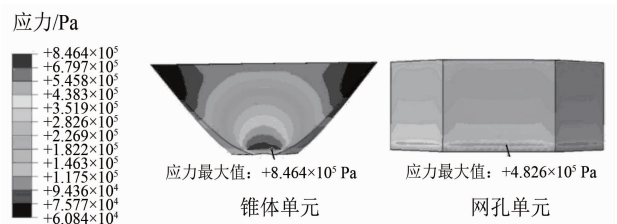


图 6 新型网孔型弹性道床垫的网孔单元与既有 USM 型弹性道床垫锥体单元的应力分布对比截图

Fig. 6 Comparison screenshot of stress distribution between the mesh unit of new mesh type elastic track mat and the cone unit of existing USM type elastic track mat

## 5.3 动静刚度对比

橡胶材料的动静刚度比对振动传递和减振效果有较大影响。由于橡胶弹性体存在黏弹滞后性,动静刚度比越大,其滞后性越强,衰减振动的能力越强。动静刚度比越小,橡胶材料的回弹性越好,振动传递效果越好。根据式(2)计算得到两种弹性道床垫的动刚度曲线如图 7 所示。

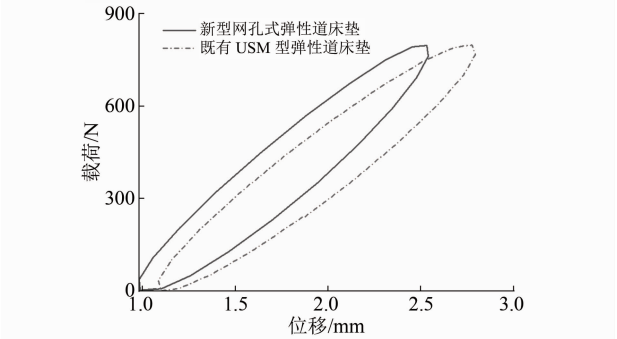


图 7 两种弹性道床垫的动刚度曲线对比

Fig. 7 Dynamic stiffness curves of two elastic track mats

由图 7 可知:在相同频率的正弦载荷作用下,既有 USM 型弹性道床垫的位移略大于新型网孔式弹性道床垫。根据式(2)及式(3)计算得出两种弹性道床垫的动刚度及动静刚度比,其结果如表 3 所示。因此,在静刚度相近的条件下,既有 USM 型弹性道床垫的动刚度和动静刚度均小于新型网孔式弹性道床垫。

表 3 两种弹性道床垫的动刚度及动静刚度比

Tab. 3 The dynamic stiffness and dynamic to static stiffness ratio of two elastic track mats

类型	动刚度/(N/mm)	动静刚度比
新型网孔式弹性道床垫	489.8	1.19
既有 USM 型弹性道床垫	445.8	1.11

## 6 结语

本文建立了新型网孔式弹性道床垫和既有

USM 型弹性道床垫的有限元模型,模拟了弹性道床垫的动静刚度试验。试验结果表明:

1) 随着  $R_2$  的增大,新型网孔式弹性道床垫的最大应力逐渐增大,但其静刚度却呈现大幅减少的趋势。改变  $h_2$  可以改变网孔式弹性道床垫的最大应力和静刚度,但影响较小。因此,改变  $R_2$  和  $h_2$ ,可以灵活调整新型网孔式弹性道床垫的力学特性。

2) 在相同受力面积、相同刚度及相同荷载条件下,新型网孔式弹性道床垫的体积比既有 USM 型弹性道床垫减少了 40.7%,这说明新型网孔式弹性道床垫更节省材料。

3) 新型网孔式弹性道床垫的最大应力位于网孔单元壁上,既有 USM 型弹性道床垫最大应力位于锥体单元的内部。新型网孔式弹性道床垫的最大应力比既有 USM 型弹性道床垫降低了 43.0%,新型网孔式弹性道床垫的耐久性更好,使用寿命更长。

4) 新型网孔型弹性道床垫的动静刚度比略高于既有 USM 型弹性道床垫的动静刚度比。这表明新型网孔式弹性道床垫衰减振动的能力更强,但是其回弹性略低于 USM 型弹性道床垫。

综上所述,新型网孔式弹性道床垫是一种具有良好力学性能的新型弹性道床垫。相较于既有 USM 型弹性道床垫,新型网孔式弹性道床垫具有应力低、刚度可调、节省材料、减振性能好等优势。将新型网孔式弹性道床垫应用于道床减振,具有可行性。

## 参考文献

- [1] 陈鹏, 辛涛. 橡胶垫浮置板轨道变形控制及减振分析[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(1): 34.  
CHEN Peng, XIN Tao. Deformation control and vibration reduction analysis of rubber floating slab track[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(1): 34.
- [2] 于鹏, 蔡向辉, 蔡小培, 等. 不同减振垫刚度下板式轨道减振特性研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(4): 1.  
YU Peng, CAI Xianghui, CAI Xiaopei, et al. Study on vibration reduction characteristic of slab track with different rubber absorber stiffness [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(4): 1.
- [3] 韦凯, 赵泽明, 王显, 等. 浮置板轨道减振垫的刚度测试与评价[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(4): 848.
- WEI Kai, ZHAO Zeming, WANG Xian, et al. Stiffness test and evaluation method of floating slab track damping pad[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(4): 848.
- [4] 何鉴辞, 王平, 唐剑, 等. 聚氨酯减振垫与橡胶减振垫浮置板轨道振动控制效果分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(2): 57.  
HE Jianci, WANG Ping, TANG Jian, et al. Analysis of vibration control effects of floating slabs with polyurethane damping pad and rubber damping pad[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(2): 57.
- [5] JIN H, ZHOU S, LIU W. Optimization of vibration reduction of the rubber floating-slab tracks[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(2): 1214.
- [6] 和振兴, 石广田, 翟婉明. 一种轨道交通高阻尼位移量可调弹性垫板: 201820499714.5[P]. 2018-11-27.  
HE Zhenxing, SHI Guangtian, ZHAI Wanming. Adjustable resilient sleeper-bearing of high damping displacement of track traffic volume: 201820499714.5[P]. 2018-11-27.
- [7] 翟志浩, 和振兴, 李斌, 等. 轨下新型网孔式弹性垫板力学性能影响研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(4): 32.  
ZHAI Zhihao, HE Zhenxing, LI Bin, et al. Study on the influence of mechanical properties of new mesh-type elastic under-rail pad[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(4): 32.
- [8] 赵峰, 和振兴, 石广田, 等. 网孔式弹性垫板动静刚度特性研究[J]. 机械强度, 2020, 42(5): 1243.  
ZHAO Feng, HE Zhenxing, SHI Guangtian, et al. Research on dynamic and static stiffness characteristics of mesh elastic pad [J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(5): 1243.
- [9] 翟志浩, 和振兴. 极寒环境下铁路扣件新型网孔式弹性垫板动力性能及影响研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(2): 235.  
ZHAI Zhihao, HE Zhenxing. Research on dynamic performance and influence of new mesh-hole elastic pads for railway fasteners in an extremely cold environment[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2020, 50(2): 235.
- [10] 吴结义. 橡胶隔振垫疲劳寿命及耐久性研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.  
WU Jieyi. Study on fatigue life and durability of rubber vibration isolation pad[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2016.
- [11] 李兴华. 橡胶减振垫式浮置板整体道床减振性能与施工关键技术[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2015.  
LI Xinghua. Rubber damping pad floating slab solid bed damping performance and construction of key technology [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2015.

(收稿日期: 2021-05-11)