

一种新型铁垫板下的弹性垫板

宋 杨 杨冠岭 张 瑶 王 平

西南交通大学, 土木工程学院, 成都 610031

摘 要: 为降低扣件的刚度, 满足无砟轨道高弹性的要求, 设计了一种部分支承沟槽型铁垫板下橡胶垫板。运用有限元方法, 利用超弹单元 Mooney-Rivlin 本构模型, 建立了弹性垫板、铁垫板、混凝土支座计算的模型。在满足强度要求的前提下, 通过纵向、横向沟槽的数量、尺寸以及橡胶邵氏 A 硬度来调整橡胶垫板的刚度, 分析其对弹性垫板刚度和受力的影响, 最终确定垫板尺寸, 并用实测数据与计算结果进行比对。

关键词: 弹性垫板; Mooney-Rivlin 模型; 部分支承沟槽; 扣件

中图分类号: U213.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747(2011)03-0075-05

A New Kind of Tie Plate Under Iron Sheet

SONG Yang YANG Guan-lin ZHANG Yao WANG Ping

School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University,
Chengdu 610031, China

Abstract: To reduce the stiffness of the fasteners and meet the requirements of high flexibility of ballastless track, a new kind of tie plate under iron sheet, named part bearing groove tie plate, was designed. By using the finite element method and Mooney-Rivlin model of super elastic elements, a calculation model, consisted of the elastic plate, the iron pallet and the concrete bearing, was established, which was used to analyze the impact on the force of tie plates and the elastic plate stiffness. Then, the pad size was determined and the calculated results were compared with the measured data.

Key words: Tie plate, Mooney-Rivlin model, part bearing grooves, fasteners

0 概 述

为减缓高速列车运行时产生的轨道振动与噪声,

降低轨道刚度, 采用低刚度板下胶垫技术对策, 被世界公认为最简单易行又经济实惠的有效方法。作为板下胶垫的品质, 提高其弹性和耐久性及其相互协调性

收稿日期: 2010-06-22.

作者简介: 宋杨 (1988-), 男, 汉族, 河南商丘市人, 西南交通大学土木学院硕士研究生。

是非常重要的，因此，低刚度、长寿命、低成本是板下胶垫应用技术的发展趋势。由于橡胶的材料特性，调节垫板刚度的方式有限，有砟轨道采用的传统沟槽型垫板（图1）已经无法完全满足低刚度的要求，必须设计一种新型板下垫板解决无砟轨道弹性不足的问题^[1]。

部分支承沟槽型橡胶垫板（图2）在普通纵向沟槽型垫板（沟槽纵、横方向与线路相同）的基础上，添加横向沟槽，在满足扣件其它属性的前提下，增加垫板的弹性，可以实现低刚度和变刚度的目标。在规模化生产后，可以有效降低模具复杂、成本较高等问题。笔者采用有限元方法，利用超弹 Mooney-Rivlin 本构模型，在满足强度要求的前提下，通过纵向、横向沟槽的数量、尺寸以及橡胶硬度来调整橡胶垫板的刚度，分析其对刚度和受力的影响，并用试验结果与结果比对。

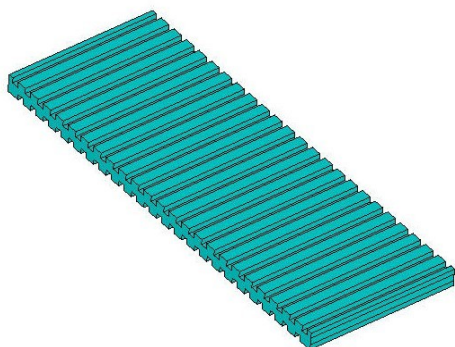


图1 普通纵向沟槽型垫板

Fig.1 The ordinary vertical groove tie plate

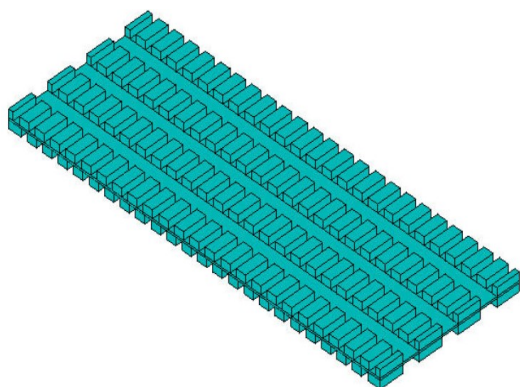


图2 部分支承沟槽型橡胶垫板

Fig.2 The part bearing groove tie plate

2 设计方法

2.1 计算模型

根据垫板构造和扣件受力特性，建立包括铁垫板、弹性垫板和混凝土底座（自上而下）的有限元模型^[2]，见图3。

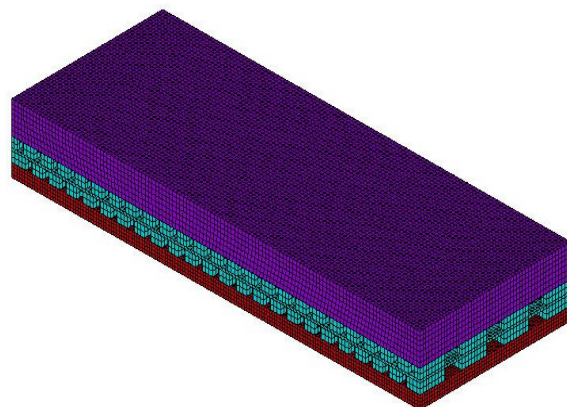


图3 弹性垫板有限元模型

Fig.3 The finite element mode of the elastic plate

由于扣件系统垂向传力是自轨下有限的面积和螺栓预压区通过铁垫板向下扩散，铁垫板将发生变形，弹性垫板承受的是一种非均匀的压力。对于轮载而言，扣件系统的刚度最终表现为荷载作用点处作用力与位移的比值。因此，胶垫的刚度值 K 计算由公式（1）决定。

$$K = \frac{P_2 - P_1}{D_2 - D_1} \quad (\text{kN/mm}) \quad (1)$$

式中：

- P_1 —— 螺栓拧紧力；
- P_2 —— 螺栓拧紧力与轨下压力之和；
- D_1 —— 螺栓拧紧力作用下弹性垫板垂向位移；
- D_2 —— 螺栓拧紧力与轨下压力作用下弹性垫板垂向位移。

2.2 计算参数

以配套无砟轨道12号道岔普通垫板为例，其扣件系统弹性垫板尺寸如图4^[3]所示。

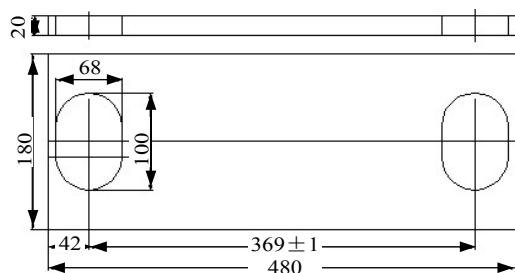


图 4 弹性垫板尺寸

Fig. 4 Sizes of the elastic plate

橡胶材料作为一种典型的超弹性材料，压缩变形很小，参考有关产品的计算参数，取胶垫的邵氏硬度 65~85，胶垫的屈服强度可取为 3 MPa，弹性模量为 8 MPa，泊松比为 0.5；铁垫板按线弹性体处理，取 $E=2.06 \times 10^{11}$ Pa， $\mu=0.3$ ；混凝土底座按线弹性体处理，取 $E=3.35 \times 10^{10}$ Pa， $\mu=0.15$ ^[4]。

橡胶本构模型：Mooney-Rivlin 认为应变能密度是主应变不变量的一个多项式函数，当材料是不可压缩时，且受压形变在 30%、受拉形变在 100%以内，采用 2 参数模型较为合适^[5]。

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (2)$$

式中， W 为应变能密度； I_1, I_2 为第 1、第 2 Green 应变不变量； C_{10} 和 C_{01} 为 Rivlin 系数，均为正定常数。

计算荷载：根据《无砟道岔用板下弹性垫板技术条件》，计算弹性垫板刚度的理论加载区间为： $P_1=15$ kN， $P_2=75$ kN。

结构细部尺寸及沟槽布置形式：为充分发挥弹性垫板的高弹性并保证垫板的刚度均匀性，弹性垫板纵向沟槽间距需相同^[6]，纵向沟槽中心须对应纵向沟槽间距中心，横向沟槽位置也须上、下对应；由于沟槽形式过多，根据经验采用以下形式，并在其基础上变动参数，寻求规律并找到合适的结构尺寸：上、下两面的纵向沟槽总数为 47，槽宽、槽深均为 8 mm，沟槽间距为 12 mm，横向沟槽共设 3 个，槽宽为 21 mm。

2.3 计算结果

2.3.1 横向沟槽槽宽的影响分析

其他尺寸不变，橡胶邵氏 A 硬度为 75 时，横向沟槽槽宽为 6 mm、9 mm、15 mm 和 21 mm 时的弹

性垫板刚度值如表 1。

表 1 不同横向槽宽时的计算结果

Tab.1 Calculation results of different horizontal grooves

横向槽宽 /mm	刚度/ (kN/mm)	最大等效应力 /MPa
6	26.69	2.05
9	25.88	2.13
15	22.60	2.43
21	19.50	2.86

表 1 表明随着横向槽宽不断增大，弹性垫板上、下承载面减小，刚度同时不断减小，弹性垫板最大等效应力逐渐增大，需在满足屈服强度的前提下，找到合适刚度。

2.3.2 槽深影响分析

令橡胶邵氏 A 硬度为 75，其他尺寸不变，分析沟槽深度分别为 5mm、6mm、7mm 和 8mm 等 4 种规格进行有限元分析，计算结果如表 2 所示。

表 2 不同槽深时的计算结果

Tab.2 Calculation results of different groove depths

槽深/mm	刚度/ (kN/mm)	最大等效应力/MPa
5	26.60	2.82
6	24.21	2.69
7	21.19	2.55
8	19.50	2.86

由表 2 可以看出，随着沟槽槽深不断增加，弹性垫板刚度也近似呈线性减小，但是，最大应力先减小后增加。这是因为沟槽深度不足会使槽底应力集中更为严重，所以，槽深为 5mm 时，应力较大。但是，如果沟槽深度过大，弹性垫板中间厚度较小，也会对垫板受力也不利，因此，上、下面槽深取 4~8mm 较为合适。

2.3.3 纵向沟槽数目影响分析

不改变沟槽的形式，针对上、下面沟槽总数为 35、39、41、43、45、47、49 和 51 等 8 种规格进行有限元分析，计算结果如图 5 所示。

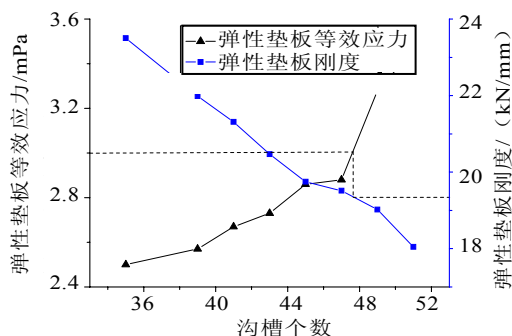


图5 纵向沟槽数目影响分析

Fig.5 Analysis of the number of the vertical grooves

图5表明,随着纵向沟槽数目的增加,弹性垫板刚度缓慢降低,最大等效应力却迅速增加,这种趋势恰好使通过增大沟槽数目,在满足橡胶屈服强度的前提下,减小纵向刚度很困难。从图中虚线可以看出,以弹性垫板等效应力为3MPa作为强度控制条件,刚度最小可以达到19.2 kN/mm。

2.3.4 橡胶硬度影响分析

令横向沟槽槽宽为21 mm,纵向沟槽间距为12 mm,分析橡胶邵氏A硬度分别为65、70、75、80和85等5种规格进行有限元分析,计算结果如表3所示。

表3 不同硬度时计算结果

Tab.3 Calculation results of different hardnesses

邵氏 A 硬度	刚度/(kN/mm)	最大等效应力/MPa
65	13.34	3.34
70	18.45	2.93
75	19.50	2.86
80	20.47	2.86
85	21.35	2.85

表3表明随着橡胶邵氏A硬度从70不断增大,弹性垫板刚度近似呈线性减小,而等效应力变化微小。橡胶邵氏硬度为65时,弹性垫板刚度有较大降低,并且最大等效应力迅速增加。这说明调整橡胶硬度是调整弹性垫板刚度的较为有效的方法,但是,橡胶硬度过小会导致垫板近乎压溃,超出材料的屈服极限,并且回弹性能不好。

2.3.5 弹性垫板强度及协调性分析

根据上述计算结果,弹性垫板橡胶邵氏A硬度

为75,细部尺寸如下较为合适:上、下两面的纵向沟槽总数为47,槽宽、槽深均为8 mm,沟槽间距为12 mm,横向沟槽共设3个,槽宽为21 mm。对其进行横、纵方向荷载受力分析,并根据其刚度对轨头进行横向位移检算,计算结果如表4所示。

表4 弹性垫板强度及协调性分析

Tab.4 Analysis of the strength and coordination of the elastic plate

项目	横向作用 /MPa	纵向作用 /MPa	钢轨小反角 /rad	轨头横向位移/mm
计算结果	2.0	2.1	0.024 6	3.9
指标要求	≤3.0	≤3.0	—	≤6.0

3 试验验证

为确定计算的准确性,采取试验与计算比对的方法,对计算结果进行检算。试验采取千斤顶施压,百分表读数的方法对垫板刚度进行测试,试验步骤为,先对垫板按照螺栓拧紧力 P_1 进行预压,然后再按螺栓拧紧力与轨下压力之和 P_2 施压,通过百分表得到垫板位移,最后按照公式(1)计算垫板刚度。

试验垫板尺寸。选取2.3.5节所选弹性垫板尺寸与计算结果进行对比,其加载曲线如图6所示;经计算得到的弹性垫板刚度为19.5 kN/mm,试验得到的刚度为20.6 kN/mm,误差为6%,试验数据与计算结果较为相近。

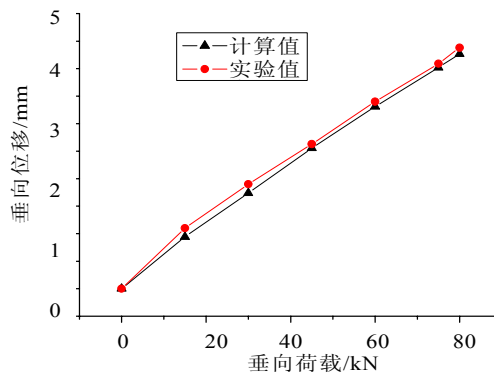


图6 弹性垫板位移-荷载图

Fig.6 The figure of displacement vs load of the elastic plate

参考文献

- [1] Van de Vooren. F. W. C. J. Modelling transportation interaction with the economy [J]. Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review, 2004, 40(5):417-437.
- [2] 刘庆珍. 论交通运输功能的多重性与综合性[J]. 上海海运学院学报, 1995, 16(2): 27-32.
- [3] 赵 坚, 杨 佚. 交通运输业与经济增长的关系[J]. 交通运输系统工程与信息, 2003, 3(2): 65-71.
- [4] 刘建强. 交通运输业与国民经济发展的实证研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2002, 2(1): 82-86.
- [5] 周 伟, 马书红. 基于木桶理论的公路交通与经济发展适应性研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(3): 77-82.
- [6] 李卫东, 王稼琼. 我国公路交通与社会经济发展的适应性刍议[J]. 交通运输系统工程与信息, 2005, 5(3): 9-12.
- [7] 葛 亮, 信红喜, 马 俊. 公路交通可持续发展评价指标体系及评价方法研究[J]. 公路, 2006(6): 20-23.
- [8] 陈毕伍, 廖晓锋. 公路交通可持续发展评价指标体系研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 111-117.
- [9] 山东省公路建设与社会经济适应性的研究课题组. 山东省公路建设与社会经济的适应性研究[R]. 山东省交通科学研究所, 1999.
- [10] 青海省公路科研勘测设计院, 重庆交通科研设计院. 青海省公路建设与国民经济发展的适应性研究[R]. 青海省公路科研勘测设计院, 2002.
- [11] 交通部规划研究院. “十五”末公路交通与社会经济发展综合评价[R]. 交通部规划研究院, 2004.

(中文编辑: 吴继屏)

上接第 78 页

4 结束语

部分支承沟槽型橡胶垫板是一类新型板下弹性垫板, 理论分析和室内试验均表明, 此类垫板能有效降低扣件刚度, 通过其多变的尺寸可以大大降低弹性

垫板的刚度, 并且能够保证其相互协调性, 它的应用将大大改善无砟轨道弹性不足的状况, 为实现客专轨道低刚度要求提供了良好的条件。当然, 部分支承沟槽型橡胶垫板的成功应用还有待于实践的进一步检验。

参考文献

- [1] 王其昌. 无砟轨道钢轨扣件[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.
- [2] 王其昌, 韩启孟. 板式轨道设计与施工[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2002.
- [3] 赵国堂. 高速铁路无砟轨道结构[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [4] 练松良. 轨道工程[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006.
- [5] 郑明君, 谢基龙. 压缩状态下橡胶件大变形有限元分析[J]. 北京交通大学学报, 2001, (9): 87-90.
- [6] 佐藤吉彦. 新轨道力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.

(中文编辑: 吴继屏)