

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.07.006

某重卡橡胶悬架均衡梁球铰的改进研究

崔国罡,唐志刚,樊智敏*,王伟
(青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266042)

摘要:针对某重卡在行驶过程中出现的橡胶悬架均衡梁球铰轴向滑移脱出问题,对原橡胶悬架均衡梁球铰从结构上进行了改进,并将弹性材料由橡胶优化为聚氨酯。在台架试验台上,对改进前与改进后的均衡梁球铰垂向刚度和轴向刚度分别进行了试验,提取了改进前后均衡梁球铰的垂向刚度、轴向刚度试验值。同时结合 ABAQUS 有限元分析平台,建立了有限元分析模型,提出了利用非线性有限元法进行模拟分析的方法。通过模拟台架试验过程,对改进前、后的均衡梁球铰垂向刚度、轴向刚度有限元分析结果进行了评价。研究表明:将有限元分析结果与试验值进行了分析对比,两者最大差值为 3.55%,有限元分析结果与试验值基本一致。改进后的均衡梁球铰在垂向刚度允许变化范围内,轴向刚度提升了约 11.5 倍。

关键词:橡胶悬架;球铰;滑移脱出;有限元;刚度

中图分类号:TH122;U463.32⁺5

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)07-0719-07

Improvement on rubber suspension equalizing beam ball-joint for heavy truck

CUI Guo-gang, TANG Zhi-gang, FAN Zhi-min, WANG Wei

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: Aiming at the axial slide-out problem that appeared when the equalizing beam ball-joint of the rubber suspension was applied in a heavy truck driving, the structure of the original equalizing beam ball-joint was improved, and the elastic material was optimized from rubber to polyurethane. Experimental study on the vertical stiffness and axial stiffness of the original and the improved equalizing beam ball-joint were carried out on the bench test rig, the experimental values of the vertical stiffness and axial stiffness of the equalizing beam ball-joint were obtained. At the same time, the finite element analysis model was established based on the ABAQUS finite element analysis platform, and a method of nonlinear finite element analysis method was presented. Then the finite element analysis values of the vertical stiffness and axial stiffness about the original and the improved equalizing beam ball-joint were evaluated through the simulation of the bench test process. The results indicate that the element analysis results are compared with the experimental values, and the maximum difference between them is 3.55%, and the finite element analysis results are in good agreement with the experimental values. The improved equalizing beam ball-joint's vertical stiffness changes in permissible range, and the axial stiffness increases by about 11.5 times.

Key words: rubber suspension; ball-joint; slide-out; finite element method (FEM); stiffness

0 引言

目前,国内 95% 以上的重型汽车底盘悬架以钢板弹簧作为弹性元件,其缺点是舒适性较差,簧下质量大,无法适应重型汽车轻量化发展,并且不能同时兼顾舒适性与操纵稳定性^[1]。橡胶悬架是底盘悬架发

展的第二代产品,具有横向稳定性好、舒适性高、操纵稳定性好、维护方便等优点,与同平台的断开式平衡悬架比重量轻、成本低,相对于第三代的空气悬架具有成本低的优势。

自 2005 年开始,美国瀚瑞森公司与中国重汽开始合作,引进了 HN522 型橡胶悬架。橡胶悬架进入国内

收稿日期:2016-12-18

作者简介:崔国罡(1985-),男,山东烟台人,工程师,硕士研究生,主要从事汽车悬架减震系统方面的研究。E-mail:cuiguogang1@163.com

通信联系人:樊智敏,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:zmfan@163.com

已有十几年时间,但推广效果欠佳。存在的主要问题是橡胶弹簧等橡胶元件频繁损坏,这与国内物流运输行业现状有关,超限超载现象太多。在 2009 年,美国瀚瑞森公司与中国重汽再次联合开发了加强承载能力的 HUV 型橡胶悬架,目前已经批量生产。

近年来,随着国家法规加大治超限超的力度,推动了底盘悬架的发展。橡胶悬架因其结构简单、非簧载质量小、噪声低、免润滑、维修方便、舒适性好等优势突出,橡胶悬架将成为底盘悬架的一个重要发展方向^[2-3]。

本研究以某重卡底盘上应用的橡胶悬架在路试 200 km 时出现均衡梁球铰轴向滑移脱出现象为背景进行讨论。为解决球铰的轴向滑移脱出问题,笔者对均衡梁球铰进行改进,在均衡梁球铰垂向刚度允许变化范围内,运用台架试验和有限元分析的手段对其改进前和改进后的垂向刚度和轴向刚度进行对比分析,并通过整车路试来验证改进后的效果。

1 橡胶悬架的结构

橡胶悬架是一种汽车底盘悬架系统,主要由鞍座、橡胶主弹簧、辅助弹簧、减振器、均衡梁以及均衡梁球铰等构成。橡胶悬架的结构如图 1 所示。

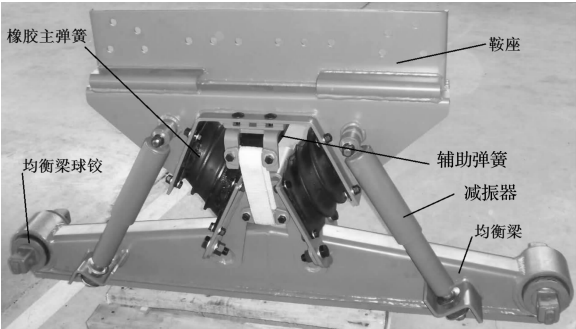


图 1 橡胶悬架结构图

2 改进前均衡梁球铰分析

2.1 改进前均衡梁球铰的结构

改进前均衡梁球铰的结构如图 2 所示。

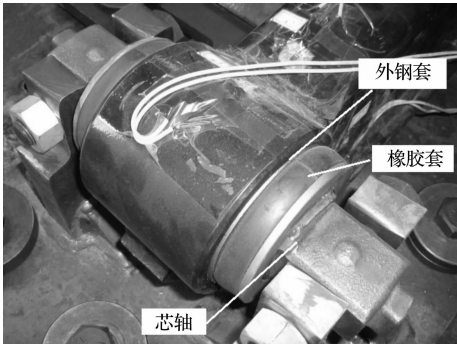


图 2 改进前均衡梁球铰结构图

其由外钢套、橡胶套、芯轴构成,外钢套材质为 45 钢,芯轴材质为 QT450-10,弹性材料是构件中的橡胶套,选用的橡胶配方型号为 R15-13-05,该橡胶配方的关键性能参数如表 1 所示。

表 1 R15-13-05 型号橡胶配方关键材料性能参数

邵氏硬度/A	拉伸强度/MPa	拉断伸长率/%	撕裂强度/MPa	扯断永久变形/%
70	≥21	≥350	≥50	≥15

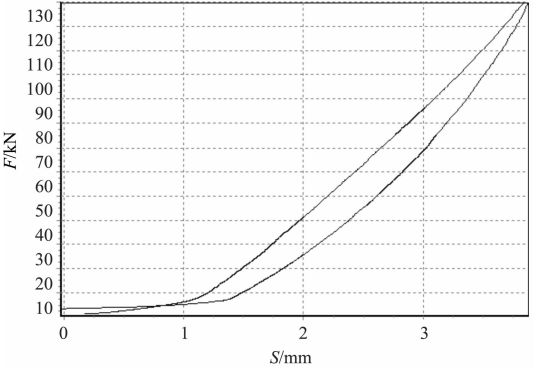
2.2 改进前均衡梁球铰刚度试验

2.2.1 垂向刚度试验

改进前均衡梁球铰垂向刚度试验及试验曲线图如图 3 所示。



(a) 改进前均衡梁球铰垂向刚度试验图



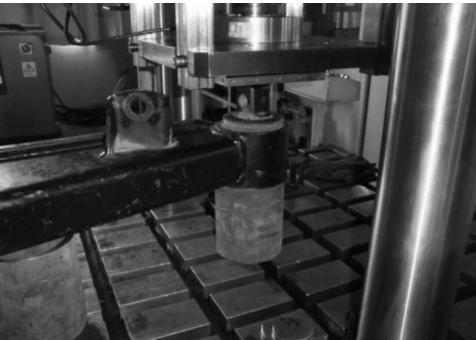
(b) 改进前均衡梁球铰垂向刚度试验曲线图

图 3 改进前均衡梁球铰垂向刚度试验及试验曲线图

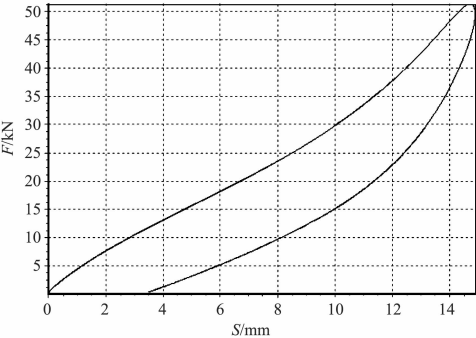
本研究将改进前均衡梁球铰模拟实际装车状态压装到均衡梁一端上。笔者在试验台上将压装均衡梁球铰的均衡梁固定,试验机作动器通过试验工装与均衡梁球铰芯轴的两端连接(试验图如图 3(a)所示)。测得改进前均衡梁球铰的垂向刚度值变化曲线如图 3(b)所示,根据所加负荷 F 随位移 S 的变化曲线可知,均衡梁球铰在 45 kN ~ 85 kN 承载范围内垂向刚度值约为 46.44 kN/mm。

2.2.2 轴向刚度试验

改进前均衡梁球铰轴向刚度试验及试验曲线图如图 4 所示。



(a)改进前均衡梁球铰轴向刚度试验图



(b)改进前均衡梁球铰轴向刚度试验曲线图

图 4 改进前均衡梁球铰轴向刚度试验及试验曲线图

本研究将压装均衡梁球铰的均衡梁翻转 90°后固定在试验工装上,试验机作动器通过试验工装压在均衡梁球铰芯轴的上端(试验图如图 4(a)所示)。测得改进前均衡梁球铰的轴向刚度值变化曲线如图 4(b)所示,根据所加负荷 F 随位移 S 的变化曲线可知,均衡梁球铰在 18 kN ~ 34 kN 承载范围内轴向刚度值约为 3.10 kN/mm。

2.3 改进前均衡梁球铰有限元分析

2.3.1 橡胶材料的本构模型

橡胶为超弹性材料,在橡胶的变形过程中存在自由能函数—应变能函数(W),该函数形式及其中所含的常数须由试验来确定。本次选用二项 Mooney-Rivlin 模型,应变能函数(W)形式为:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \tag{1}$$

式中: C_{10}, C_{01} —材料参数。

通过单轴压缩试验方法,将配方型号为 R15-13-05 的橡胶胶料试验结果导入有限元分析软件 ABAQUS 中拟合,得到: $C_{10} = 0.55, C_{01} = 0.11$ [4-8]。

2.3.2 金属材料关键属性

改进前均衡梁球铰构件中金属材料的属性如表 2 所示。

表 2 金属材料关键属性表

构件类别	材质	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/GPa
外钢套	45 钢	209	0.269	355
芯轴	QT450-10	173	0.3	310

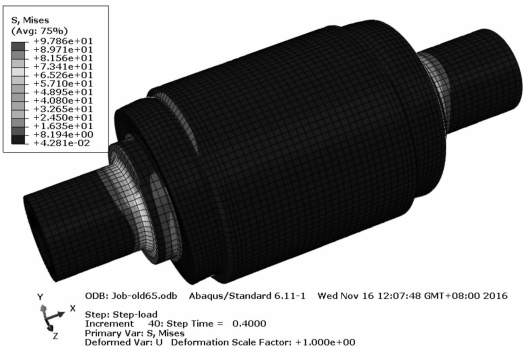
2.3.3 有限元分析

(1)简化模型及网格划分

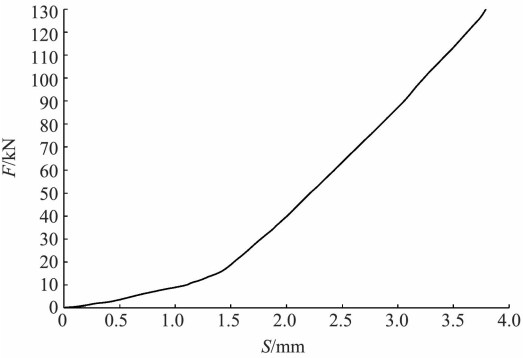
为了方便有限元分析,本研究将改进前均衡梁球铰数模尖角、倒角优化,芯轴两端的螺栓孔简化。然后笔者利用 HyperMesh 前处理软件对改进前均衡梁球铰模型进行网格划分,形成共 62 000 个 elements 和 75 250 个 nodes 的八节点六面体单元。橡胶材料采用 C3D8RH 单元类型,外钢套和芯轴均采用 C3D8I 单元类型。将划分网格后的模型导入 ABAQUS 有限元分析软件中。

(2)垂向约束加载及有限元分析结果

本研究约束芯轴两端 6 个方向的自由度,在外钢套上沿 Y 轴的负方向加载。得出改进前均衡梁球铰在垂向受力 65 kN 时的 VON MISES 应力云图(如图 5(a)所示),金属部分的最大 VON MISES 应力位于图中芯轴过渡位置,数值为 97.9 MPa;橡胶的最大主应力位于橡胶中部位置,最大拉应力 6.4 MPa,最大压应力 7.7 MPa。通过有限元分析得出负荷 F 随位移 S 的变化曲线可知改进前均衡梁球铰在 45 kN-85 kN 承载范围内垂向刚度值约为 47.35 kN/mm(如图 5(b)所示),改进前均衡梁球铰有限元分析与试验结果垂向刚度差值 1.96%。



(a)改进前均衡梁球铰垂向VON MISES应力云图



(b)改进前均衡梁球铰拟合垂向刚度曲线图

图 5 改进前均衡梁球铰垂向应力云图及拟合垂向刚度曲线图

(3)轴向约束加载及有限元分析结果

本研究约束芯轴两端 6 个方向的自由度,在外钢套上沿 X 轴的正方向加载,得出改进前均衡梁球铰在

轴向受力 26 kN 时的 VON MISES 应力云图(如图6(a)所示),金属部分的最大 VON MISES 应力位于图中芯轴过渡位置,数值为 19.14 MPa;橡胶最大拉应力 2.5 MPa,位于橡胶拉伸端外钢套与橡胶套粘接位置,橡胶最大压应力 0.9 MPa,位于芯轴与橡胶套粘接位置。通过有限元分析得出负荷 F 随位移 S 的变化曲线可知改进前均衡梁球铰在 18 kN ~ 34 kN 承载范围内轴向刚度值约为 3.21 kN/mm(如图 6(b)所示)。改进前均衡梁球铰有限元分析与试验结果轴向刚度差值 3.55%。

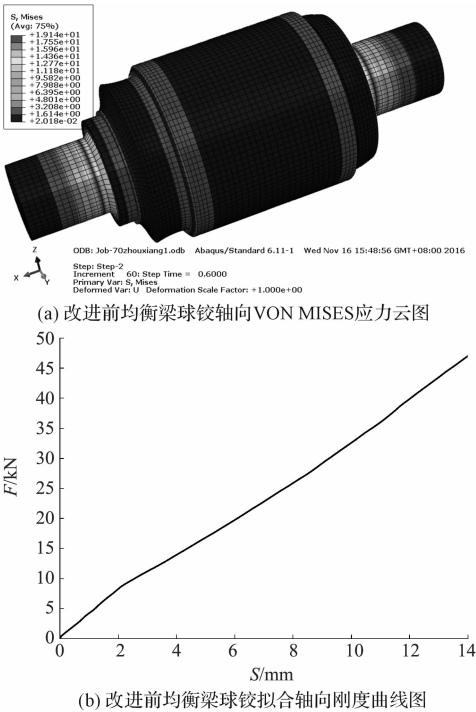


图 6 改进前均衡梁球铰轴向应力云图及拟合轴向刚度曲线图

3 改进后均衡梁球铰分析

3.1 改进后均衡梁球铰结构

改进后均衡梁球铰结构如图 7 所示。

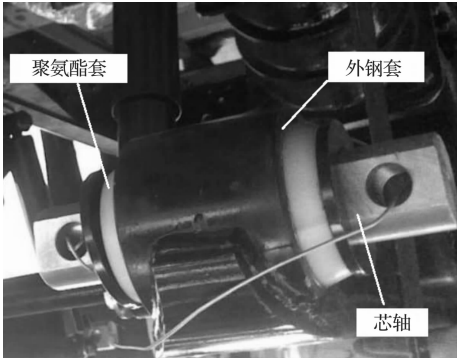


图 7 改进后均衡梁球铰结构图

球铰由外钢套、聚氨酯套、芯轴构成,外钢套和芯轴的材质均为 45 钢,弹性材料是聚氨酯套,聚氨酯配方型号为 PU15-04-01,该聚氨酯配方的关键性能参数如表 3 所示。

表 3 PU15-04-01 型号聚氨酯配方材料性能

邵氏硬 度/A	拉伸强 度/MPa	拉断伸长 率/(%)	撕裂强 度/MPa	扯断永久 变形/(%)
90	55	585	100	32

3.2 改进后均衡梁球铰刚度试验

3.2.1 垂向刚度试验

本研究将改进后均衡梁球铰按 2.2.1 节中改进前均衡梁球铰试验条件进行安装,试验图如图 8(a)所示。通过垂向试验得到负荷 F 随位移 S 的变化情况,曲线图如图 8(b)所示。



(a) 改进后均衡梁球铰垂向刚度试验图

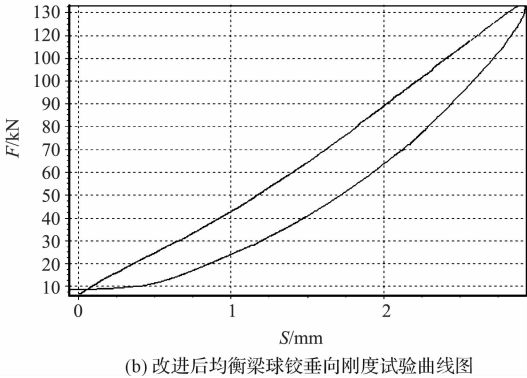


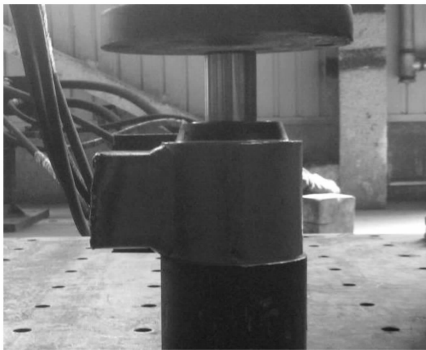
图 8 改进后均衡梁球铰垂向刚度试验及垂向刚度曲线图

由图可知,改进后均衡梁球铰在 45 kN ~ 85 kN 承载范围内垂向刚度值约为 50.58 kN/mm,与改进前均衡梁球铰试验垂向刚度值相差 8.91%。

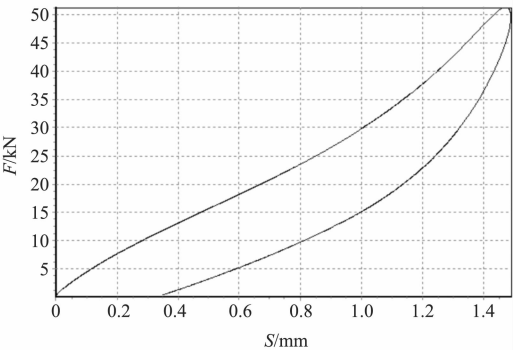
3.2.2 轴向刚度试验

本研究按 2.2.2 节中改进前均衡梁球铰轴向刚度试验条件将改进后均衡梁球铰进行试验,试验图如图 9(a)所示。通过轴向刚度试验得到改进后均衡梁球铰所加负荷 F 随位移 S 的变化曲线,曲线图如图 9(b)所示。改进后均衡梁球铰在 18 kN ~ 34 kN 承载范围内轴向刚度值约为 35.90 kN/mm。

从改进后均衡梁球铰与改进前均衡梁球铰的试验轴向刚度对比可以看出,改进后均衡梁球铰在垂向承载能力满足使用要求的基础上,轴向刚度增加了约 11.5 倍,抗侧向力能力提升显著。



(a) 改进后均衡梁球铰轴向刚度试验图



(b) 改进后均衡梁球铰轴向刚度试验曲线图

图 9 改进后均衡梁球铰轴向刚度试验及试验曲线图

3.3 改进后均衡梁球铰有限元分析

3.3.1 聚氨酯材料的本构模型

聚氨酯也选用的二项 Mooney-Rivlin 模型。通过对型号为 PU15-04-01 聚氨酯配方的材料做单轴压缩试验导入有限元分析软件 ABAQUS 中拟合,可得:
 $C_{10} = 0.096, C_{01} = -1.056^{[9-11]}$ 。

3.3.2 金属材料关键属性

改进后均衡梁球铰构件中金属材料的属性如表 4 所示。

表 4 金属材料关键属性表

构件类别	材质	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
外钢套、芯轴	45 钢	209	0.269	355

3.3.3 有限元分析

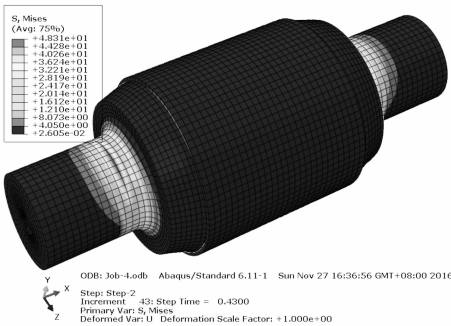
(1) 简化模型及网格划分

同改进前均衡梁球铰类似,本研究也对改进后均衡梁球铰模型进行简化,在 HyperMesh 软件中对改进后均衡梁球铰模型进行网格划分,形成共 65 430 个 elements 和 76 505 个 nodes 的八节点六面体单元。聚氨酯材料采用 C3D8RH 单元类型,外钢套和芯轴均采

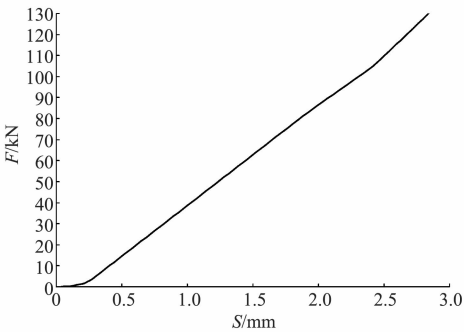
用 C3D8I 单元类型。笔者将划分网格后的模型导入 ABAQUS 有限元分析软件中。

(2) 垂向约束加载及有限元分析结果

本研究约束芯轴两端 6 个方向的自由度,在外钢套上沿 Y 轴的负方向加载。得出改进后均衡梁球铰在垂向受力 65 kN 时的 VON MISES 应力云图(如图 10(a)所示),金属部分的最大 VON MISES 应力位于图中芯轴过渡位置,数值为 48.3 MPa;聚氨酯的最大主应力位于聚氨酯套中部位置,最大拉应力 2.2 MPa,最大压应力 1.6 MPa。通过有限元分析得出负荷 F 随位移 S 的变化曲线可知改进后均衡梁球铰在 45 kN ~ 85 kN 承载范围内垂向刚度值约为 49.90 kN/mm(如图 10(b)所示)。改进后均衡梁球铰有限元分析与试验结果垂向刚度差值 1.34%。



(a) 改进后均衡梁球铰垂向 VON MISES 应力云图



(b) 改进后均衡梁球铰拟合垂向刚度曲线图

图 10 改进后均衡梁球铰垂向应力云图及拟合垂向刚度曲线图

(3) 轴向约束加载及有限元分析结果

本研究约束芯轴两端 6 个方向的自由度,在外钢套上沿 X 轴的负方向加载。得出改进后均衡梁球铰在轴向受力 26 kN 时的 VON MISES 应力云图(如图 11(a)所示),金属部分的最大 VON MISES 应力位于图中芯轴过渡位置,数值为 11.3 MPa;聚氨酯最大拉应力 1.69 MPa,位于聚氨酯拉伸端外钢套与聚氨酯套粘接位置,聚氨酯最大压应力 0.77 MPa,位于芯轴与聚氨酯套粘接位置。通过有限元分析得出负荷 F 随位移 S 的变化曲线可知改进后均衡梁球铰在 18 kN ~ 34 kN 承载范围内轴向刚度值约为 35.24 kN/mm(如

图 11(b)所示)。改进后均衡梁球铰有限元分析与试验结果轴向刚度差值 1.84%。

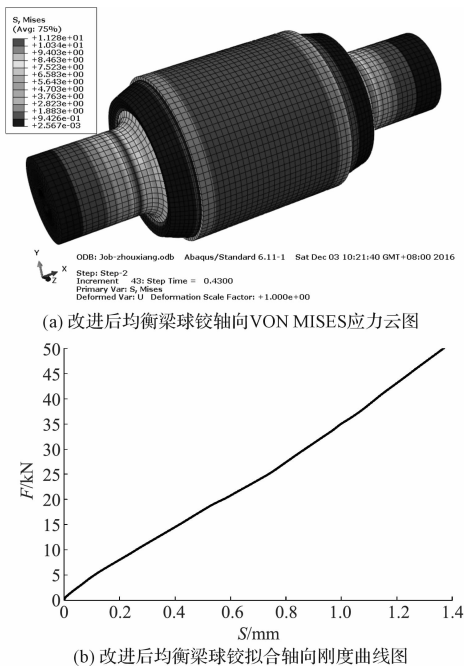


图 11 改进后均衡梁球铰轴向应力云图及拟合轴向刚度曲线图

3.4 改进后均衡梁球铰路试试验

本研究安装改进后均衡梁球铰的橡胶悬架装车后在试验场进行整车路试试验,在路试车辆行驶了5 000 km

后未出现均衡梁球铰轴向滑移脱出现象,如图 12 所示。

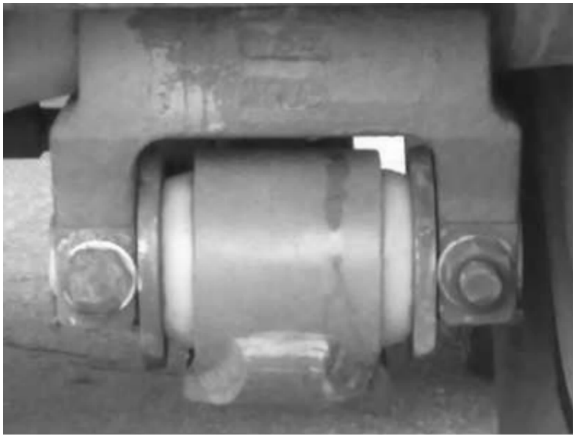


图 12 改进后均衡梁球铰路试

4 改进前、后均衡梁球铰试验及结果分析

本研究通过第 2、3 节中运用试验和有限元分析的手段对改进前和改进后均衡梁球铰垂向刚度和轴向刚度进行对比分析,对比结果如表 5 所示。

改进后的均衡梁球铰在垂向刚度允许变化范围内,轴向刚度提升了约 11.5 倍,大大提升了橡胶悬架均衡梁球铰处的抗侧向力能力。

表 5 改进前后均衡梁球铰刚度值对比

加载方向	改进前			改进后		
	试验刚度值/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	有限元分析刚度值/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	有限元分析与试 验刚度差值/(%)	试验刚度值/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	有限元分析刚度值/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	有限元分析与试 验刚度差值/(%)
垂向	46.44	47.35	1.96	50.58	49.90	1.34
轴向	3.10	3.21	3.55	35.90	35.24	1.84

5 结束语

本研究介绍了某重卡橡胶悬架的结构,为了解决该重卡行车时出现的橡胶悬架均衡梁球铰轴向滑移脱出问题,对原均衡梁球铰从结构和材料上进行了改进。笔者通过台架试验测试了改进前后的均衡梁球铰垂向、轴向刚度值。再利用非线性有限元分析法对台架试验过程进行模拟分析,并对改进前后的均衡梁球铰垂向、轴向刚度的有限元分析结果进行评价。结果表明,对改进前后均衡梁球铰的垂向、轴向刚度试验及有

限元分析结果分析对比,有限元分析结果与试验值最大差值为 3.55%,有限元分析结果与试验值基本吻合。改进后均衡梁球铰的垂向刚度在允许变化范围内的基础上,轴向刚度提升了约 11.5 倍。

本研究为解决该重卡橡胶悬架均衡梁球铰路试中出现的轴向滑移脱出问题提供了理论与试验支持。通过对安装改进后均衡梁球铰橡胶悬架的车辆进行路试,轴向滑移脱出问题改善明显。由于车辆的实际使用路况非常复杂,后续还需要通过用户实车使用继续验证改进的有效性。

(下转第 762 页)

本文引用格式:

崔国罡,唐志刚,樊智敏,等. 某重卡橡胶悬架均衡梁球铰的改进研究[J]. 机电工程,2017,34(7):719-724,762.
CUI Guo-gang, TANG Zhi-gang, FAN Zhi-min, et al. Improvement on rubber suspension equalizing beam ball-joint for heavy truck[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(7):719-724,762.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>