

减振与降噪

LS1210 型高弹性联轴器疲劳寿命预测

曲佳辉, 谢华银, 侯天柱, 褚洪森

(七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 为降低高弹性联轴器疲劳寿命研究成本及缩短其开发周期, 基于一型广泛应用的成熟产品, 通过 FE-SAFE/ABAQUS 联合仿真预测其疲劳寿命, 并以实际使用寿命来验证疲劳寿命预测的可靠性。首先通过橡胶材料的单轴拉伸、平面拉伸力学试验拟合出能准确描述其力学性能的二次多项式本构模型, 计算获得了该产品橡胶块在工作载荷下的应力、应变分布, 最后通过疲劳寿命分析, 得出了该产品无限寿命的结论, 这与其实际使用寿命相符合。表明该疲劳寿命预测方法切实可行, 并可用于同类产品的设计、开发。

关键词: 高弹性联轴器; 疲劳寿命; 预测

中图分类号: TH133.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)03-0036-04

Fatigue Life Prediction of the LS1210 High Elastic Coupling

Qu Jiahui, Xie Huayin, Hou Tianzhu, Chu Hongsen

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: In order to reduce the research cost of high elastic couplings' fatigue life and shorten the development cycle, research was carried out on a mature product which had been widely used in the market. Its fatigue life was predicted by FE-SAFE/ABAQUS combined simulation, and the reliability of fatigue life prediction was verified by actual service life. The quadratic polynomial constitutive model which can accurately describe the mechanical properties of rubber material is fitted through uniaxial and plane tensile tests. The stress and strain distribution of the rubber block under working load was calculated and obtained. Finally, the conclusion of the product's infinite life was obtained through fatigue life analysis, which was consistent with its actual life. The accurate prediction indicates that this fatigue life prediction method is feasible, and can be used in the design and development of similar products.

Key words: high elastic coupling; fatigue life; prediction

0 引言

高弹性联轴器由具有明显扭转弹性的阻尼元件构成, 可用来调整传动装置轴系的扭转振动特性, 补偿由振动、冲击所引起的主、从动设备的位移, 并持续地传递转矩和旋转运动。其性能主要取决于所采用的弹性元件。弹性元件主要分为两种: 金属弹性元件和非金属弹性元件。金属弹性元件的优点

是传递扭矩大, 受温度的影响较小, 因此工作寿命较长。高强度的弹性钢如 60Si2Mn 和 50CrVA 等, 是生产金属弹性元件常用的材料。但金属弹性元件的缺点是其生产成本较高。非金属弹性元件主要指硫化橡胶, 相对于金属弹性元件, 橡胶具有更好的阻尼性能, 位移补偿能力大, 可以补偿轴线的径向位移、轴向位移和角度位移, 且经济性好。

高弹性联轴器随着使用时间的增加, 其性能必

收稿日期: 2019-03-07

基金项目: 2017 年工业转型升级 (中国制造 2025) 资金 (Z135060009002)。

作者简介: 曲佳辉(1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为轮机工程, 814249991@qq.com。

然会产生一定程度的下降,尤其是其中的橡胶弹性元件,相对金属元件来说,性能下降得更为明显。当某性能下降到某一程度可能就不符合该场合下的使用要求;使用时间继续增加还可能发生裂纹甚至断裂。为降低开发成本、缩短开发周期,对高弹性联轴器的橡胶弹性元件进行寿命评估与预测就显得尤为重要^[1-3]。本文以 LS1210 高弹性联轴器为研究对象,旨在基于 FE-SAFE/ABAQUS 开发出可靠的疲劳寿命预测方法,并将预测结果与实用寿命进行比较,验证此方法的准确性。

1 联轴器橡胶材料拉伸力学试验

为能够较为精确地描述橡胶材料的力学行为^[4-5],对其进行单轴拉伸试验和平面剪切试验。本文所研究的 LS1210 型高弹性联轴器是一种剪切型高弹性联轴器,其设计特点:传递扭矩时橡胶元件内部各点受到相同的切应力。

1.1 橡胶平面剪切试验

为准确测定橡胶材料的力学剪切性能,采用四板剪切试样进行平面剪切(纯剪切)试验。试样按照 GB/T12830-2008/ISO 1827:2007《硫化橡胶或热塑性橡胶与刚性板剪切模量和粘合强度的测定——四板剪切法》制备,由四个长度为 $25\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ 、宽度为 $20\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ 、厚度为 $4\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ 的尺寸相同的橡胶片组成。每个橡胶片的两个相对最大面分别与四块宽度相同、长度适宜的刚性板对应面直接硫化接合,形成一个对称的双夹层结构,如图 1 所示。平面剪切试验过程中的试件变形情况如图 2 所示。

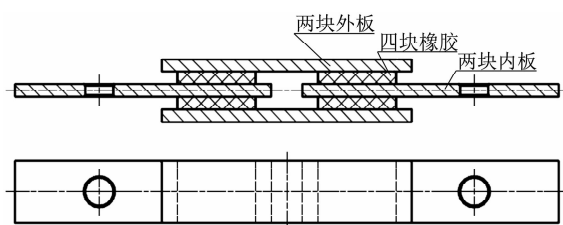


图 1 平面剪切试件二维图

试验得到其应力-应变关系曲线如图 3 所示,最终得到橡胶材料剪切变形下的力学特性。

1.2 橡胶单轴拉伸试验

单轴拉伸试验的试样,按照 GB/T 528-2009 标准中规定,制备成 I 型哑铃状,厚度 $2.0\text{ mm} \pm 0.2\text{ mm}$,长度 $25.0\text{ mm} \pm 0.5\text{ mm}$,形状、尺寸如图 4 所示。试件单轴拉伸力学试验过程如图 5 所示。

试验得到其应力-应变关系曲线如图 6 所示。最终得到橡胶材料拉伸变形下的力学特性。



图 2 平面剪切试验过程

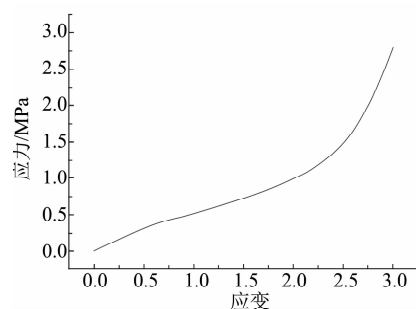


图 3 平面剪切应力-应变试验数据曲线

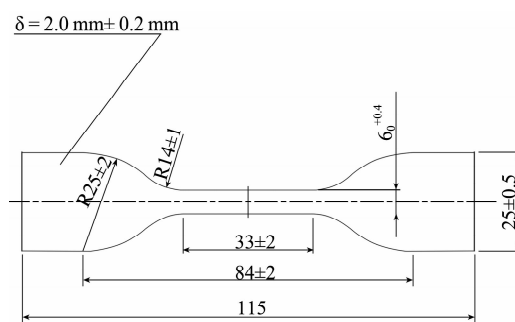


图 4 哑铃状试样形状二维图



图 5 单轴拉伸力学试验过程

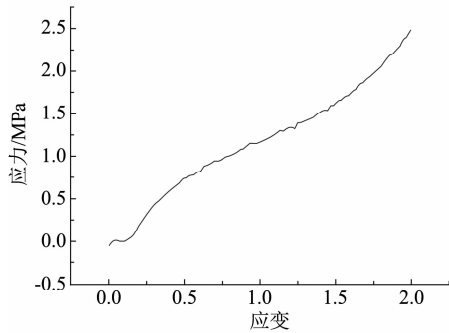


图 6 单轴拉伸应力-应变试验数据曲线

2 橡胶本构模型拟合

2.1 橡胶本构唯象理论模型^[6-7]

连续介质力学在研究橡胶变形时认为：橡胶是一种各向同性的超弹性材料，其变形是均匀变形。则应变能密度函数即可用主伸长率或变形张量的应变不变量表示。变形张量的 3 个应变不变量可以由下式确定：

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (1)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (2)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (3)$$

式中： λ 为主伸长率。

假设橡胶为不可压缩材料，基于各向同性的假设，应变能密度函数可以表示成如下形式：

$$W = (I_1, I_2, I_3) \quad (4)$$

$$W = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (5)$$

基于不可压缩假设，则 I_3 可以取为常数 1.0。应变能函数的级数多项式表达式为：

$$W_R = \sum_{i=0, j=0}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (6)$$

式中： C_{ij} 为材料常数； N 为阶数，取 $N = 2$ 时，应变能函数 (6) 可简化为二次多项式 (Polynomial, $N = 2$)：

$$W_R = \sum_{i=0, j=0}^2 C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (7)$$

2.2 橡胶本构模型拟合过程

本文选取了八种在工程中应用较多的本构模型与试验数据进行拟合，分别是 Arruda-Boyce 模型、Van der Waals 模型、Neo-Hookean 模型、Mooney-Rivlin 模型、Yeoh 模型、Ogden3 模型、Ogden5 模型以及二阶多样式 (Polynomial, $N = 2$) 模型。

现根据橡胶试件的两个主要变形模式 (单轴、平面剪切) 的试验数据与不同的本构模型一一拟合、对比，从中找出能准确贴合橡胶材料力学试验数据的稳定性模型。

从图 7 ~ 图 9 中各个模型与橡胶材料力学基础

变形试验数据的拟合效果可看出：Mooney-Rivlin 本构模型与橡胶单轴拉伸试验测试数据拟合较好；与平面剪切试验数据贴合更好。二次多样式 (Polynomial, $N = 2$) 模型与平面剪切试验数据贴合很好，在整个应变阶段与单轴拉伸试验数据曲线趋势也相似，但与单轴拉伸的数据贴合程度不如 Mooney-Rivlin 模型。由于在此次拟合中，Mooney-Rivlin 模型不是无条件稳定模型，考虑到该高弹性联轴器应变范围较大，在该应变范围该模型可能不稳定，所以最终选取二次多样式 (Polynomial, $N = 2$) 模型，通过 ABAQUS 识别出的该模型的材料参数如表 1 所示。

表 1 二次多项式 (Polynomial, $N=2$) 模型材料参数

模型	参数值
Polynomial ($N=2$)	$C_{10} = 1.901\ 359\ 17, C_{20} = 0.583\ 271\ 781$
	$C_{01} = -1.775\ 100\ 16, C_{11} = -2.252\ 034\ 58$
	$C_{02} = 1.671\ 554\ 21$

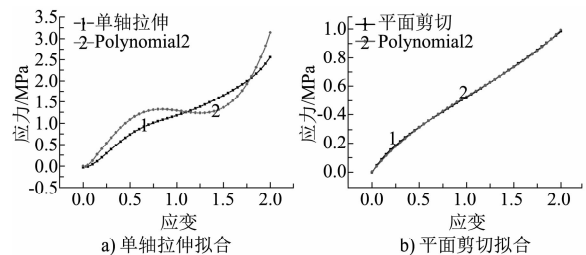


图 7 二次多项式模型单轴拉伸和平面剪切拟合对比

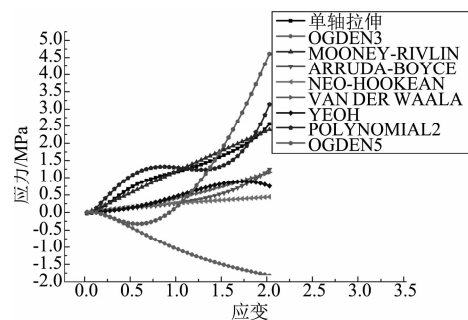


图 8 单轴拉伸下各本构模型拟合效果曲线

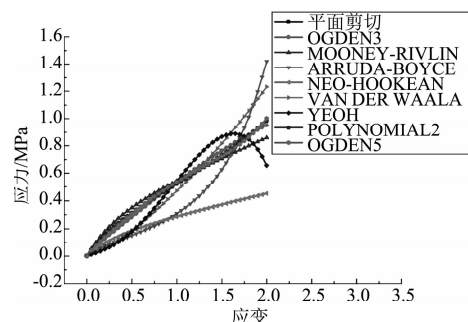


图 9 平面剪切下各本构模型拟合效果曲线

3 基于 ABAQUS 的橡胶弹性元件有限元分析

3.1 CAE 建模

LS1210 型高弹性联轴器由金属法兰和扇形橡胶块两部分硫化沾粘而成。考虑正常使用情况下,硫化连接处不会发生破坏,疲劳破坏先发生于橡胶部分,故而,有限元建模时不考虑铁件部分,并将两个半圆形扇形块简化为一个整体的环形橡胶块,如此可以简化分析但又不影响计算精度。由于不考虑法兰与橡胶结合部位的接触运算,计算效率大大提高。将 LS1210 型高弹性联轴器的橡胶弹性元件三维模型导入 ABAQUS 中进行网格划分,橡胶采用八节点线性六面体杂交单元,减缩积分,沙漏控制。其中环形橡胶元件的三维模型如图 10 所示,有限元模型如图 11 所示。

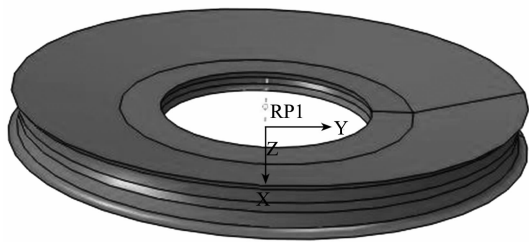


图 10 环形橡胶块三维模型

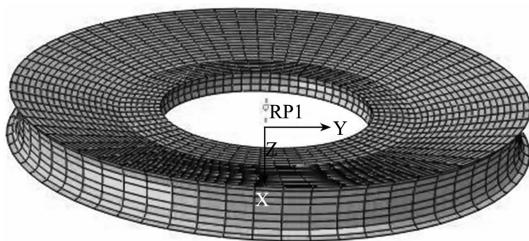


图 11 环形橡胶块有限元模型

LS1210 型高弹性联轴器额定扭矩为 3.15 (kN·m), 许用变动扭矩为 0.79 (kN·m)。考虑该联轴器实际使用的可能性, 在 ABAQUS 中加载动态扭矩为:

$$T = 3.15 + 0.79 \sin 10 t \quad (8)$$

3.2 有限元应力分析结果

橡胶块施加工作时的等效载荷, 其有限元分析得到的应力云图如图 12 所示。

从图中可以看出: 最大应力为 7.036 MPa。最大应力位置在长时间的损伤积累下, 会最终导致疲劳破坏, 直接决定产品的疲劳寿命。所以橡胶块的应力分布能够为疲劳寿命预测提供力学依据。

4 基于 FE-SAFE 的橡胶弹性元件疲劳寿命分析

将 ABAQUS 中的结果文件导入到 FE-SAFE 中, 并调用软件中的橡胶数据库, 调取该橡胶材料的 $S-N$ 数据, 最终计算得到 LS1210 型高弹性联轴器产品的疲劳寿命为 2.402×10^7 次。计算结果如图 13 所示。

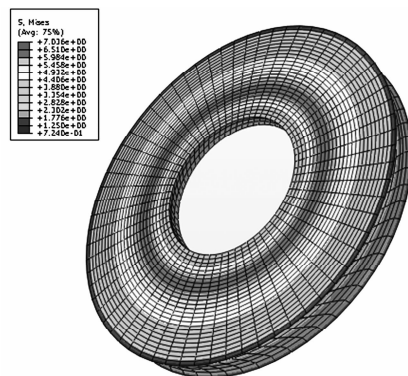


图 12 橡胶块应力云图

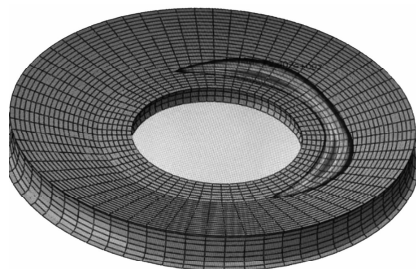


图 13 LS1210 型高弹性联轴器产品的疲劳寿命结果

疲劳出现的位置和应力较大的位置基本一致, 说明应力集中的位置易出现疲劳破坏。该产品疲劳寿命达到了 240 万次。疲劳寿命超过 100 万次, 在高弹性联轴器领域属于无限寿命, 这与产品实际使用寿命 (十年以上) 相符。

5 结论

(1) 从 LS1210 型高弹性联轴器最终的疲劳寿命预测结果可以看出其达到了无限寿命。预测的结果和产品实际使用过程中的寿命相符, 说明了预测方法的准确性。此方法可以应用于同类型产品的寿命预估。

(2) 仿真方法克服了产品疲劳试验周期长、成本高的缺点, 在准确获取材料的力学变形数据的基础上, 可以拟合出能准确评估材料力学特性的本构模型; 最后, 基于 FE-SAFE/ABAQUS 联合仿真, 即可对高弹性联轴器进行疲劳寿命的评估、预测。

(下转第 54 页)

会: 176-179.

- [14] 汪专武, 李柱国. 内燃机轴瓦高性能纳 $\text{MoS}_2 + \text{C}$ 复合涂层的研究 [J]. 润滑与密封, 2011, 36 (7): 106-111.
- [15] 郭亚军, 李庆芬, 尹树桐, 等. 磁溅镀膜轴承新材料的研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 22 (6): 93-97.
- [16] MERGEN R, LANG H, HARREITHER L. Synthetic coated bearings as future alternative for large engines [C]. CIMAC 2004, 65.
- [17] 蔡冬萍. 高低温环境摆动轴承试验器的研制 [J]. 轴承, 2007 (4).
- [18] ETTEFAGHI, EHSAN O L, AHMADI H. Investigation of the anti-wear properties of nano additives on sliding bearings of internal combustion engines [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing 2013, 14 (5): 805-809.
- [19] 李溪滨, 刘如铁, 杨慧敏. 铝铅石墨固体自润滑复合材料的性能 [J]. 中国有色金属学报, 2003, 13 (2): 465-468.
- [20] UECKER A. Lead-free carbon brushes for automotive starters [J]. Wear, 2003, 255: 1286-1290.
- [21] 郭振杰. 摩擦损耗对发动机连杆轴瓦寿命的影响 [J]. 润滑与密封, 2006 (9): 152-154.
- [22] 张绪寿, 余来贵, 陈建敏. 表面工程摩擦学研究进展 [J]. 摩擦学学报, 2000, 20 (2): 156-160.
- [23] 刘瑞堂. 机械零件失效分析 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- [24] CHENG X H, XUE Y J, XIE C Y. Friction and wear of rare-earth modified glass-fiber filled PTFE composites in dry reciprocating sliding motion with impact loads [J]. Wear, 2002, 253 (7/8): 869.

(上接第 39 页)

参考文献

- [1] WANG X L, SHANGGUAN W B, RAKHEJA S, et al. A method to develop a unified fatigue life prediction model for filled natural rubbers under uniaxial loads [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2013, 37 (1): 50-61.
- [2] 祖海英, 耿春丽, 李大奇, 等. 基于 FE-SAFE 螺杆泵定子橡胶疲劳裂纹形成寿命预测 [J]. 机械强度, 2018 (1): 195-199.
- [3] 王小莉, 上官文斌, 刘泰凯, 等. 填充橡胶材料单轴拉伸疲劳试验及疲劳寿命模型研究 [J]. 机械工程学
- 报, 2013, 49 (14): 65-73.
- [4] 王文涛, 肖苏华, 黄健龙, 等. 单轴拉伸状态下橡胶隔振器的疲劳寿命预测研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33 (5).
- [5] Huan Z, 丁家松, 张欢, 等. 船用橡胶隔振器寿命评估方法研究 [J]. 振动与冲击, 2010, 29 (12): 230-233.
- [6] 王小莉. 橡胶隔振器多轴疲劳寿命预测方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [7] 李晓芳, 杨晓翔. 橡胶材料的超弹性本构模型 [J]. 弹性体, 2005, 15 (1): 50-58.