

橡胶疲劳研究综述

王 昊,危银涛

(清华大学 汽车工程系,北京 100084)

摘要:橡胶疲劳寿命理论的研究对于提高橡胶产品耐久性的设计和制造具有重要意义。从橡胶的疲劳寿命研究方法、橡胶疲劳影响因素、橡胶疲劳试验以及疲劳理论的实际应用几方面介绍了橡胶材料和橡胶制品疲劳研究的情况,对于橡胶产品的疲劳耐久性分析和设计、提高橡胶产品的使用寿命具有一定的指导意义。

关键词:橡胶疲劳;裂纹萌生;裂纹扩展;耐久性

中图分类号:TQ330.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-8171(2015)10-0579-07

橡胶减震器、轮胎等橡胶制品通常在周期性载荷作用下工作,在实际使用过程中,橡胶疲劳所带来的安全问题往往十分严重,一旦发生疲劳失效就有可能造成重大的经济损失。在橡胶产品开发初期对橡胶材料、结构的耐久性能进行评估,采用实验和仿真相结合的手段预报产品的使用寿命,并以此指导材料选择、结构设计以及生产工艺的改进,可提高产品的设计使用寿命,对于节省开发成本、提高生产利润具有重要的意义。

橡胶是能发生大变形、具有复杂应力应变关系的超弹性材料,在循环载荷作用下还会出现软化、结晶等现象,而且橡胶性能受环境温度、臭氧浓度等因素影响很大,因此橡胶材料的疲劳特性研究十分复杂,相关理论不像金属材料疲劳研究那么成熟。

1 橡胶材料的疲劳寿命研究方法

橡胶材料的疲劳断裂过程主要可分为两个阶段:从无裂纹到小裂纹的裂纹形成阶段和从小裂纹扩展直至断裂阶段。对于疲劳寿命研究也主要从这两方面展开,对应的两种寿命分析方法称为裂纹萌生法和裂纹扩展法。实际应用中,裂纹萌生阶段和裂纹扩展阶段之间的分界比较模糊,一般针对有明显缺口或裂纹的结构,疲劳寿命的计算方法是基于裂纹扩展法;而对于无明显缺口或

裂纹的结构,寿命的计算方法多为裂纹萌生法。

1.1 橡胶材料疲劳裂纹萌生法

疲劳裂纹萌生法假设橡胶材料的疲劳寿命与材料的某种力学参数存在一一对应的函数关系。这种力学参数通常被称为疲劳预测因子或疲劳损伤参量等。疲劳损伤参量的合理选择是采用裂纹萌生法进行橡胶材料疲劳寿命预测的关键问题。早期的橡胶疲劳寿命预测理论致力于在疲劳裂纹萌生寿命与疲劳损伤参量之间建立一种经验的关系式,例如通常被选用的幂法则关系:

$$P = KN_i^b$$

式中, P 是疲劳损伤参量; N_i 是裂纹萌生寿命; K 和 b 为材料常数。

上述疲劳损伤参量通常与材料某点的应力和应变历程有关,因此疲劳裂纹萌生法能够确定橡胶部件寿命的空间分布状态。该方法适用于在产品开发设计阶段对产品进行疲劳寿命预测,特别是初始裂纹小于临界裂纹几个数量级并且橡胶产品的裂纹萌生寿命占全寿命的绝大部分比例的情况。

早期的橡胶疲劳研究主要选取应变参数(如工程应变、八面体切应变、最大剪应变等)作为疲劳损伤参量。1940 年,S. M. Cadwell 等^[1]在研究非填充硫化胶的疲劳寿命时发现:在保持应变幅值恒定的情况下,天然橡胶的疲劳寿命随着循环最小应变的增大而延长,并且在最小应变小于 200% 的情况下都能观察到这一现象,而当最小应变超过这一水平后,疲劳寿命又会随着最小应变

作者简介:王昊(1990—),男,陕西汉中,清华大学在读硕士研究生,主要从事橡胶疲劳计算方法以及疲劳实验方面的研究工作。

的增大而缩短。随后 W. V. Mars 等^[2]用类似的方法研究了最小应变对两种合成橡胶疲劳寿命的影响。一般来说,对于应变结晶的橡胶,循环加载最小应变的增大可以提高疲劳寿命。S. M. Cadwell 的研究没有提到如何将载荷状态相对简单的实验结果应用于复杂应变条件下橡胶材料疲劳寿命的预测。而此后一些学者通过研究发现,基于应变的疲劳损伤参量无法将简单拉伸和等双轴拉伸的疲劳寿命统一起来,J. F. Roach^[3]通过研究得出的结论是应变疲劳损伤参量与橡胶多轴疲劳寿命的相关性较小。

随着断裂力学理论在橡胶疲劳研究方面的逐步应用,从 20 世纪 50 年代开始,与应变能相关的函数逐渐被用作橡胶材料的疲劳损伤参量。与使用应变或等效应力作为疲劳损伤参量相比,使用应变能密度在估算多轴疲劳寿命方面具有很大的优势^[4]。

应变能密度定义为因变形而储存于单位体积的弹性势能。1964 年 A. N. Gent 等^[5]研究了应变能密度和裂纹尺寸与橡胶简单拉伸疲劳寿命的关系。对于结构相对规则的简单试样(如简单拉伸试样和纯剪试样)而言,其远离裂纹处的应变能密度和裂纹尺寸的乘积正比于能量释放率^[6],即将应变能密度视为引发裂纹的能量释放率的度量参数。实际试验中,应变能密度通过加载或卸载段的应力-应变数据计算得到。

裂纹在橡胶材料中的萌生是有方向性的,例如在承受压缩载荷的橡胶制品内,尽管垂直于压缩轴的平面趋向于闭合,但其他平面可能处于剪切或拉伸状态,而裂纹通常会在这些平面萌生和扩展。由于应变能密度是一个标量,因此不能通过它确定裂纹形成的平面,也就无法描述裂纹萌生和扩展的方向性。近些年来国外有学者从微观的连续介质力学出发,尝试构建一些新的疲劳损伤参量对橡胶裂纹萌生寿命进行预测。其中,W. V. Mars 等^[7]将研究金属材料多轴疲劳裂纹萌生的临界平面法应用于橡胶的多轴疲劳分析中,提出了开裂能密度的概念,在实际的疲劳分析和寿命预测中取得了很好效果。

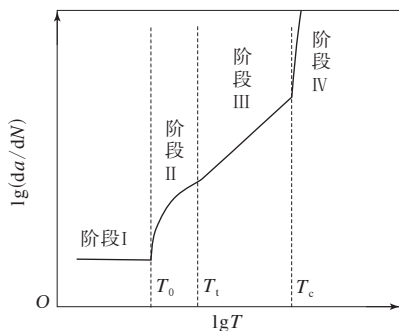
1.2 橡胶材料疲劳裂纹扩展法

疲劳裂纹扩展法是基于断裂力学理论,在给定裂纹的初始几何形状和撕裂能(T ,又称能量释

放率或者 J-积分)时间历程的条件下,根据已知材料裂纹扩展特性预测材料的疲劳裂纹扩展速率。

断裂力学的概念最先由 Griffith 在 1920 年左右研究金属疲劳问题时首次提出。断裂力学描述的是从材料内部形成裂纹直至材料破坏的过程,主要研究裂纹的扩展速率和材料性质、裂纹长度、结构尺寸以及外加载荷之间的关系。

R. S. Rivlin 等^[8]将 Griffith 的方法应用于橡胶材料撕裂问题的研究中。他们发现橡胶材料的疲劳裂纹扩展速率由每单位裂纹面积内的应变能变化量唯一确定,这一变化量被称为材料的撕裂能或能量释放率。A. N. Gent 等^[5]测试了 3 种不同几何结构的带有单边缺口的平面拉伸试样的裂纹扩展特性,实验发现 3 种不同结构的试样得到的裂纹扩展速率和撕裂能峰值之间的关系是相同的,由此证明橡胶裂纹扩展速率与撕裂能之间的关系是一种材料属性,与试样的结构和载荷形式无关。随后 G. J. Lake 等^[9]又开展了撕裂能比为零的恒幅载荷下某填充橡胶的裂纹扩展试验,并通过对实测数据的分析将橡胶裂纹扩展特性分为 4 个阶段,并给出了这 4 个阶段裂纹扩展速率的近似表达式,如图 1 所示。



T_0 —门槛撕裂能; T_1 —转折撕裂能; T_c —临界撕裂能。

图 1 橡胶裂纹扩展特性的 4 个阶段

$$\text{阶段 I: } \frac{da}{dN} = r_z \quad T < T_0$$

$$\text{阶段 II: } \frac{da}{dN} = A_0(T - T_0) + r_z \quad T_0 \leq T < T_1$$

$$\text{阶段 III: } \frac{da}{dN} = B_0 T^p \quad T_1 \leq T < T_c$$

$$\text{阶段 IV: } \frac{da}{dN} = \infty \quad T = T_c$$

式中, a 为裂纹长度; N 为简单周期载荷循环的加载次数; r_z 为橡胶裂纹的稳定扩展速率; A_0 , B_0 和

p 分别为各自阶段的材料常数,需要通过橡胶材料的裂纹扩展实验拟合得到。

利用裂纹扩展法预测疲劳裂纹扩展寿命需要明确两个关系式:一是裂纹扩展速率与撕裂能之间的关系;另一个是撕裂能与裂纹尺寸之间的关系。利用带有单边缺口的平面拉伸试样可以测得在一定撕裂能下的疲劳裂纹扩展速率:

$$\frac{dc}{dN} = f(T)$$

式中, c 为橡胶裂纹扩展长度。

通过对应区域的关系式进行拟合得到裂纹扩展常数,代入撕裂能与裂纹尺寸之间的关系 $f(T)$,假设初始裂纹长度为 c_0 ,裂纹失稳扩展临界裂纹长度为 c_f ,则材料疲劳寿命由上式积分可得

$$N = \int_{c_0}^{c_f} \frac{1}{f[T(c, t)]} dc$$

式中, t 为加载时间。

对于简单形状的橡胶试样,撕裂能与裂纹尺寸之间的关系可以通过试验获得,在实际应用中对于复杂的几何结构,可以通过有限元法得到撕裂能与裂纹尺寸的关系。

2 橡胶疲劳影响因素

橡胶的疲劳影响因素较多,主要包括载荷历程、环境条件、胶料配方等,橡胶的疲劳失效行为与这些因素有很大的关系,定性理解各类疲劳影响因素有助于开展橡胶制品的疲劳性能研究。

2.1 载荷历程

橡胶的疲劳很大程度上取决于其在寿命周期中所承受的载荷历程,对于载荷历程的描述与所选疲劳评价参数有关,一般的力学参数包括应力、应变、应变能密度和能量释放率等,在实验室开展的疲劳试验中,通常加载正弦循环载荷进行试验,循环载荷的谷值、均值以及载荷比均对橡胶疲劳寿命有较大的影响。最小载荷或平均载荷对疲劳寿命的影响在很大程度上取决于橡胶类型和填料种类^[9],应变结晶橡胶在一定载荷幅值下,非松弛形变条件下的疲劳寿命比松弛形变下的长;在动态应变幅值恒定时,应变结晶橡胶的疲劳寿命随最小拉伸应变的增大而延长,直到达到最大值^[10]。橡胶产品在使用中通常是小的交变载荷

叠加在较大的静态负荷上,此时所承受的就是非松弛疲劳载荷,因此在某个范围内提高最小载荷可以提高产品的疲劳寿命。

除了载荷幅值外,加载频率也是橡胶疲劳寿命的一个影响因素,在恒温、低频(小于 50 Hz)条件下,载荷频率对应变结晶橡胶的影响较小,而对非应变结晶橡胶影响显著^[11]。若载荷频率过高,在橡胶制品内会产生较大的生热,这时驱动疲劳破坏的主要因素就不再是载荷,而是温度过高引起的降解。为避免橡胶局部生热现象的产生,在橡胶疲劳试验和实际应用中,加载频率通常控制在 5 Hz 以下。

载荷顺序对于橡胶元件的疲劳寿命也有影响。C. Sun 等^[12]在验证 Miner 线性损伤累计法则在轮胎加速寿命分析的适用性时发现,应变载荷幅值递增加载的方式比载荷递减的加载方式对轮胎造成的疲劳损伤更大,并将这一现象归结为橡胶材料的 Mullins 效应所致。

近年来,承受随机载荷的橡胶减震器的疲劳寿命问题也成为研究方向,随机振动环境下橡胶的疲劳耐久性分析是材料疲劳和结构动力学结合的复杂问题。

2.2 环境条件

在橡胶疲劳分析中,环境条件起着关键作用,尤其是在高周疲劳研究中,橡胶材料的力学行为和疲劳特性高度依赖于环境温度和不同浓度的化学反应物含量。

温度对橡胶材料疲劳特性的影响很大,不同的橡胶材料,其疲劳特性对温度的敏感性不同。在位移控制方式进行橡胶疲劳试验,试验温度从 0 °C 升高到 100 °C 时,未填充天然橡胶的疲劳寿命降低 4 倍,而未填充的丁苯橡胶疲劳寿命降低 1 万倍^[9]。可以加入填料减小温度的影响,减小程度取决于填料的种类和用量。氧的存在严重影响橡胶材料耐高温性能,在无氧条件下多数橡胶都能承受 175 °C 的高温,而在有氧条件下,橡胶在此温度下会迅速降解^[10]。

氧气对橡胶机械疲劳也有重要影响,氧气溶解或分散在橡胶中会促使橡胶老化,不可逆地改变橡胶的机械性能,包括使得橡胶材料的疲劳裂纹扩展门槛值降低^[13],导致疲劳裂纹扩展加速,最终导致疲劳寿命缩短。

臭氧也是影响橡胶疲劳寿命的重要因素之一。环境中的臭氧含量达到亿分之几就能逐渐分解橡胶弹性体中的碳-碳双键^[14],在载荷驱动下逐渐引起表面裂纹扩展。橡胶疲劳试验中也包括暴露在臭氧中的载荷试验,试验中可以发现裂纹扩展速率大大提高,而疲劳寿命明显缩短。臭氧和氧气对橡胶疲劳性能影响的最大区别在于,即使在很小的应变或能量释放率条件下,臭氧也能加速裂纹扩展^[15]。

2.3 橡胶配方

胶料类型是决定橡胶材料疲劳力学性能的重要因素。研究表明,在低应变疲劳载荷条件下,橡胶的玻璃化转变温度越高,耐疲劳破坏性能越好,这主要是由于橡胶分子的松弛机理起主要作用^[16];而在高应变疲劳载荷下,具有拉伸结晶性的橡胶,耐疲劳破坏性能较好,主要原因是上述提到的最小应变造成的应变结晶现象对裂纹扩展起到了阻碍作用。研究中用来比较橡胶耐疲劳破坏性能最直接的方法是撕裂能法。研究表明,没有一种材料在整个撕裂能范围内的耐疲劳破坏性能保持最佳^[17]。在高撕裂能区,天然橡胶的耐疲劳破坏性能较好,而丁腈橡胶较差;在低撕裂能区氯丁橡胶的耐疲劳破坏性能较好,而天然橡胶较差。

由于胶种改变时,最佳硫化体系、硫化温度、填充等都会发生变化,所以在评判耐疲劳性能优劣时,不能简单地采用同一硫化条件制备的胶料放在一起比较。

填料的加入对于橡胶的疲劳力学性能也有显著的影响,例如在橡胶中加入炭黑能显著提高橡胶的强度,在较低的撕裂能下,接近于疲劳极限时,炭黑的加入可使临界撕裂能大大提高^[18]。填料能改变橡胶材料的应力-应变滞回性能,填料的非均匀性会引起裂纹尖端钝化和偏转,阻碍裂纹扩展;但填料聚集体会使橡胶内部初始缺陷尺寸增大,使得裂纹更容易扩张,因此在撕裂能一定的情况下,存在一个最佳的填料体积分数,当低于这个最佳体积分数时,随着填料的增加,疲劳寿命相应提高。

3 橡胶疲劳寿命试验设计

橡胶制品的疲劳寿命预测是否准确与其试验方案的选择关系紧密,通过试验对橡胶制品的疲

劳寿命进行预测有两条途径:一是基于橡胶材料疲劳试验进行寿命预测;另一种是以橡胶制品为测试对象进行疲劳寿命试验与预测。

3.1 橡胶本构关系试验

橡胶是具有材料和几何双重非线性特性的超弹性材料,对于橡胶疲劳寿命的研究建立在橡胶基本力学特性研究的基础上,因此橡胶疲劳寿命试验也包括橡胶本构关系试验。

橡胶的本构关系试验包括单轴拉伸、平面拉伸和等双轴拉伸3种,试验的加载示意图2。

这3种试验可以分别表征橡胶在单轴拉伸、纯剪切和单轴压缩状态下的力学行为,对于橡胶材料一般的承载变形可以描述为这3种简单变形的耦合状态。

试验在一定的环境中进行,采取准静态加载的方式,获取加载过程中的应力-应变数据,而后利用试验数据进行超弹性本构模型参数的拟合,选取恰当的本构模型用于进一步的橡胶疲劳寿命分析。

3.2 橡胶材料疲劳寿命试验

关于橡胶材料的疲劳寿命试样和试验方法没有具体的标准,S. M. Cadwell等^[1]曾设计了如图3所示的拉伸与剪切疲劳试样,采用正弦波加载方式,用以测试橡胶材料在不同应变水平和不同应变比(最大应变/最小应变)载荷下的疲劳寿命特性,该试样现在仍有很多研究者在继续使用。但其中的剪切试样在实现纯剪切状态时较为困难。W. V. Mars等^[2]设计了适合于拉伸和剪切测试的橡胶试柱,如图4所示,该试样可以分别进行拉伸和扭转剪切疲劳测试。

橡胶的疲劳寿命试验中最常见的是单轴载荷下的疲劳试验,单轴载荷下的疲劳特性研究和寿命预测方法可应用在橡胶材料的配方选择和橡胶制品疲劳特性设计的初期阶段,而橡胶产品在实际工程应用中,整体或局部承受的载荷绝大多数情况下是多轴交变载荷,因此要为实际橡胶部件的疲劳耐久设计提供指导还需要借助单轴疲劳试验研究多轴疲劳寿命预测方法。

3.3 橡胶材料裂纹扩展试验

在研究橡胶裂纹扩展寿命时,常采用边缘带有预制裂纹的纯剪切试样(如图5所示)进行疲劳

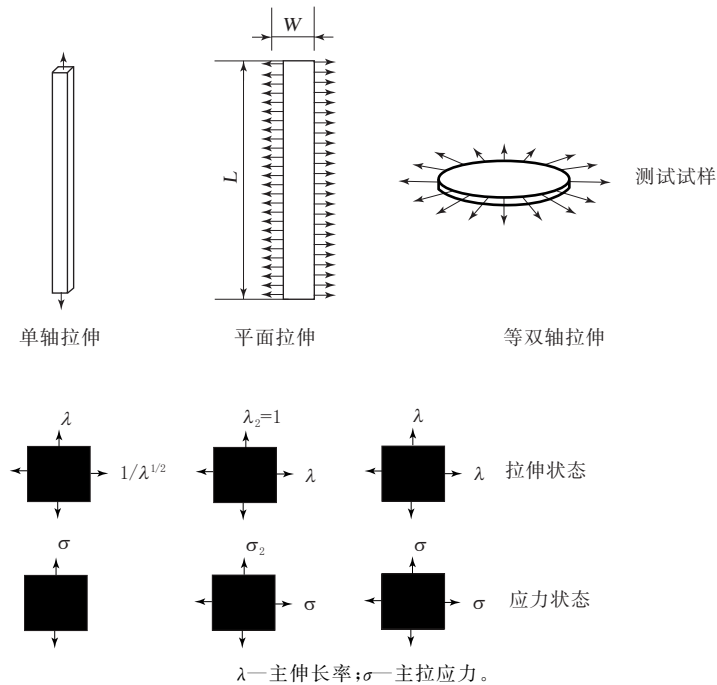


图 2 单轴拉伸、平面拉伸和等双轴拉伸试验的加载示意

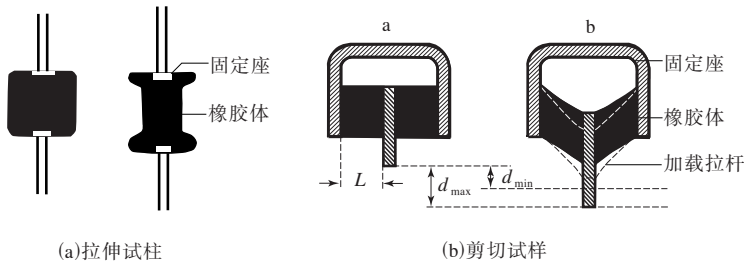


图 3 橡胶材料动态疲劳试样

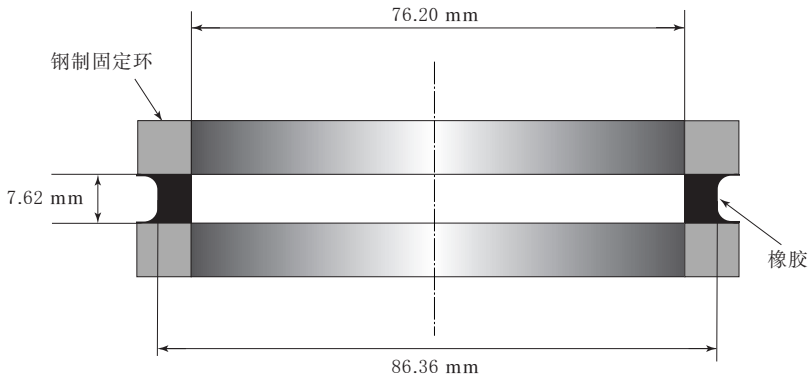


图 4 橡胶轴向拉伸、扭转试样

裂纹扩展试验,一个重要原因是纯剪切试样的撕裂能与裂纹尺寸无关,这样大大简化了利用试验数据计算撕裂能的工作。

橡胶材料的裂纹扩展试验通常是在正弦波循环载荷下进行的,采用精度较高的摄像机来观察

裂纹尺寸的改变,并按一定的循环次数间隔记录裂纹长度的变化。在建立橡胶材料裂纹扩展规律数学模型时,要根据实测裂纹扩展数据计算裂纹扩展速率(每循环载荷对应的裂纹扩展长度),同时根据实测应力应变数据计算撕裂能。

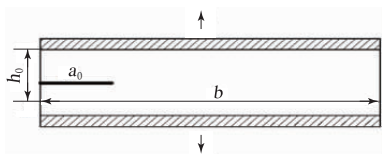


图5 带有单边缺口的纯剪切试样

4 橡胶疲劳理论的应用

实际开发过程中,针对橡胶减震器和空气弹簧等橡胶材料的疲劳设计基本流程为:首先根据橡胶元件的基本功能要求进行结构设计,然后模拟真实载荷工况对结构进行有限元分析,而后根据材料的疲劳试验数据,建立适当的疲劳寿命预测模型,将有限元分析结果与确定下来的疲劳寿命预测模型参数输入疲劳寿命预测分析软件,通过计算对元件的疲劳可靠性进行预测分析。在分析时先要确定橡胶元件的疲劳失效准则,如果计算结果满足疲劳失效准则的约束,表明设计满足疲劳寿命要求;反之,需要重新设计产品结构,再次进行计算,直到满足疲劳设计要求。实际开发时,还需要对产品进行试制,将样品进行疲劳寿命试验,并与有限元疲劳预测结果进行对比,以提高橡胶元件疲劳寿命预测的精度。

轮胎也是橡胶材料最广泛应用的领域之一,轮胎的疲劳失效也是主要失效形式。与橡胶减震器和空气弹簧不同的是,轮胎的结构复杂、材料组分多样化,而且绝大部分是由橡胶和帘线组成的柔性复合材料结构,因此通过上述流程对整胎的疲劳寿命进行准确预报有很大的困难,通常是针对轮胎关键部位进行疲劳寿命分析。

G. J. Lake 等^[19]曾应用裂纹张开技术估算了斜交轮胎花纹沟裂纹的应变能释放率,分析了载重斜交轮胎的花纹沟裂纹扩展速率。D. G. Young^[20]将应变能密度和疲劳裂纹扩展数据应用于研究子午线轮胎的胎侧裂纹。对帘线的疲劳特性和橡胶复合材料疲劳特性的研究也是轮胎疲劳寿命研究中的重要内容。J. T. South^[21]采用 S-N 试验曲线和有限元方法研究了 2 层含帘线的橡胶复合材料层间裂纹的扩展,预测其疲劳寿命。刘宇艳等^[22]利用损伤力学的方法研究了聚酯帘线/橡胶复合材料及锦纶帘线/橡胶复合材料的疲劳行为,考虑加载频率、平均应力、应力幅值及疲

劳过程中的生热对疲劳寿命的影响,指出橡胶复合材料的疲劳破坏机制可以分为两类:一类是由交变应力产生的,基体裂纹的扩展、纤维-基体界面脱粘以及帘线断裂导致的疲劳破坏;另一类是由于温度升高而导致的组分材料性能的恶化和化学降解。J. De. Eskinazi 等^[23]利用有限元方法对带束层端部的应力应变参数进行了研究,指出可以利用带束层的周向最大剪切应变、等效应变和应变能密度来衡量带束层的耐久性能。笔者^[24]曾采用虚拟裂纹闭合技术对轮胎带束层脱层问题进行了研究,给出了数值计算结果,并对胎肩的脱层耐久性能进行了预报。在此基础上,冯希金等^[25]提出了一种新的复合材料结构中间层脱层裂纹扩展模型,并对轮胎带束层中的层间脱层裂纹扩展过程进行了数值模拟,进一步揭示了复合材料结构层间脱层裂纹扩展复杂性的特点。

从国内外的研究报道中可以看出,轮胎的疲劳研究方法以裂纹扩展法为主。由于轮胎的疲劳寿命受到诸多因素的影响,想要准确地进行轮胎的疲劳寿命预报,还要依赖大量的研究工作,橡胶材料的疲劳寿命理论研究有助于了解轮胎的疲劳破坏机理,指导设计者在结构和配方设计上做出相应改进,最终达到提高轮胎使用寿命的目的。

5 结论

(1)橡胶材料的疲劳寿命研究方法包括疲劳裂纹萌生方法和疲劳裂纹扩展方法两类,工程上多采用基于橡胶材料 S-N 曲线的疲劳裂纹萌生方法进行寿命预估;以应变能密度为疲劳损伤参量的裂纹萌生法被证明在多轴条件下具有更好的适用性。

(2)考虑裂纹扩展方向性的开裂能方法被用于进行复杂应变状态下橡胶的疲劳寿命分析,结合材料的裂纹扩展试验和有限元分析,可将这一方法应用于实际承受复杂载荷的橡胶产品疲劳寿命估计。

(3)温度、臭氧等因素对于橡胶的疲劳耐久性有重要影响,不同类别的橡胶材料受环境影响情况不同,因此在橡胶材料疲劳耐久试验中要加入温度、气氛等环境控制变量,研究橡胶在不同环境条件下的疲劳性能。

(4)对于结构和材料组分较简单的橡胶产品,可以按照一般的疲劳耐久性分析流程,结合有限元分析软件和橡胶疲劳寿命分析工具,在设计开发初期进行产品的疲劳耐久性分析与设计;而对于轮胎这类结构复杂、材料组分多样化的橡胶制品,通常是针对关键部位进行疲劳寿命分析。

参考文献:

- [1] Cadwell S M, Merrill R A, Sloman C M, et al. Dynamic Fatigue Life of Rubber[J]. Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition, 1940, 12(1): 19-23.
- [2] Mars W V, Fatemi A. A Literature Survey on Fatigue Analysis Approaches for Rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(9): 949-961.
- [3] Roach J F. Crack Growth in Elastomers under Biaxial Stresses[D]. USA: University of Akron, 1982.
- [4] Beatty J R. Fatigue of Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1964, 37(11): 1341-1364.
- [5] Gent A N, Lindley P B, Thomas A G. Cut Growth and Fatigue of Rubber. I. The Relationship between Cut Growth and Fatigue[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1964, 8(1): 455-466.
- [6] Roberts B J, Benzies J B. Relationship between Uniaxial and Equibiaxial Fatigue in Gum and Carbon-black-filled Vulcanizates[J]. Plastics and Rubber: Materials and Applications, 1978, 3: 49-54.
- [7] Mars W V, Fatemi A. Multiaxial Fatigue of Rubber; Part II: Experimental Observations and Life Predictions[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2005, 28(6): 523-538.
- [8] Rivlin R S, Thomas A G. Rupture of Rubber. I. Characteristic Energy for Tearing[J]. Journal of Polymer Science, 1953, 10(3): 291-318.
- [9] Lake G J, Lindley P B. Cut Growth and Fatigue of Rubbers. II. Experiments on a Noncrystallizing Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1965, 38(2): 301-313.
- [10] Mars W V. Factors that Affect the Fatigue Life of Rubber: A Literature Survey[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2004, 77(3): 391-412.
- [11] Lake G J. Fatigue and Fracture of Elastomers[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1995, 68(2): 435-460.
- [12] Sun C, Gent A N, Marteny P. Effect of Fatigue Step Loading Sequence on Residual Strength[J]. Tire Science and Technology, 2000, 28(3): 196-208.
- [13] Gent A N, Hindi M. Effect of Oxygen on the Tear Strength of Elastomers[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1990, 63(3): 123-134.
- [14] Lake G J, Lindley P B. The Mechanical Fatigue Limit for Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1966, 39(6): 348-364.
- [15] Lake G J. Mechanical Fatigue of Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1972, 45(2): 309-328.
- [16] 右田哲彦. 橡胶的疲劳与疲劳破坏——关于机理与配方设计[J]. 江伟, 译. 橡胶译丛, 1981(2): 1-19.
- [17] 王进, 杨军, 唐先贺. 橡胶疲劳破坏性能的研究[A]. 2004 年国际橡胶会议论文集(Z)[C]. 北京: 中国化工学会橡胶专业委员会, 2004: 4.
- [18] Medalia A. Effect of Carbon Black on Ultimate Properties of Rubber Vulcanizates[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1987, 60(8): 45-61.
- [19] Lake G J, Clapson B E. Truck Tire Groove Cracking Theory and Practice[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1971, 44(5): 1186-1202.
- [20] Young D G. Application of Fatigue Methods Based on Fracture Mechanics for Tire Compound Development[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1990, 63(5): 67-81.
- [21] South J T. Mechanic Properties and Durability of Natural-rubber Compounds and Composites[D]. Virginia, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [22] 刘宇艳, 谭惠丰, 杜星文. 橡胶复合材料疲劳性能研究进展[J]. 纤维复合材料, 1997(1): 20-25.
- [23] Eskinazi J De, Ishihara K, Volk H, et al. Towards Predicting Relative Belt Edge Endurance with the Finite Element Method[J]. Tire Science and Technology, 1990, 18(4): 216-235.
- [24] 危银涛. 轮胎热力学分析及耐久性评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997: 88-93.
- [25] 冯希金, 闫相桥, 危银涛, 等. 轮胎结构中中层间裂纹扩展过程的数值模拟[J]. 复合材料学报, 2002, 19(6): 72-81.

收稿日期: 2015-05-04

欢迎订阅《轮胎工业》《橡胶工业》《橡胶科技》杂志

欢迎刊登广告