

特约来稿

橡胶材料疲劳寿命影响因素及研究方法综述

王 昊¹, 危银涛^{2*}, 王 静²

[1. 易瑞博科技(北京)有限公司, 北京 100084; 2. 清华大学 车辆与运载学院, 北京 100084]

摘要: 橡胶制品常在周期性交变应力下使用, 橡胶材料的耐疲劳性能决定了橡胶制品的疲劳寿命。从延长橡胶制品的疲劳寿命出发, 综述胶料配方、工艺条件和使用环境等对橡胶材料疲劳寿命的影响, 总结橡胶材料疲劳寿命的研究方法以及有限元仿真预测橡胶材料疲劳寿命等方面的研究进展, 指出橡胶材料传统的疲劳寿命分析方法和耐疲劳性能设计的局限性, 这对于提升橡胶材料耐疲劳性能分析与设计及延长疲劳寿命具有指导意义。

关键词: 橡胶材料; 疲劳寿命; 胶料配方; 工艺条件; 使用环境; 有限元仿真; 预测模型

中图分类号: TQ330.1⁺4; O241.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X (2020) 10-0723-13

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2020.10.0723



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

橡胶材料疲劳是指橡胶材料承受长期交变循环应力或应变作用而引起的性能变化。在动态拉伸、压缩、剪切、扭曲和外界机械振动的作用下, 橡胶制品会发生结构或性能的改变, 甚至发生破裂或失效, 这称为橡胶制品的疲劳破坏。橡胶材料的疲

劳破坏从微裂纹开始不断扩展, 疲劳使橡胶材料的力学性能变差, 使橡胶制品的使用功能降低, 最终导致橡胶制品龟裂或断裂, 从而完全丧失使用价值。橡胶制品的疲劳失效现象如图1所示。

橡胶因其独特的高弹性、粘弹性、大变形及优

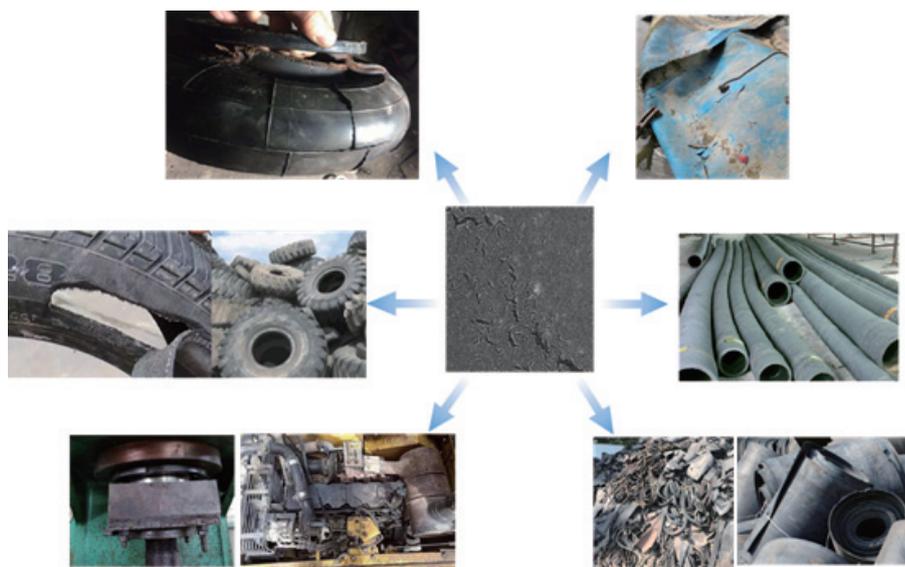


图1 橡胶材料疲劳导致的橡胶制品失效现象

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275265, 51185286); 汽车安全与节能国家重点实验室基金项目(2019—2021); 清华大学 Z05 专项基金

作者简介: 王昊(1990—), 男, 陕西汉中, 易瑞博科技(北京)有限公司工程师, 硕士, 主要从事橡胶材料疲劳试验及理论计算研究。

*通信联系人(weiyt@tsinghua.edu.cn)

异的柔软性、绝缘性、耐磨性和阻隔性而广泛应用于轮胎、胶管、减震器、密封件、输送带和橡胶坝等制品中。这些橡胶制品常在周期性交变应力下使用, 因此橡胶材料的耐疲劳性能往往决定了橡胶制品的使用寿命。传统上, 橡胶材料的疲劳研究

基于大量的试验和经验模型,随着橡胶材料断裂力学和仿真技术的发展,橡胶材料的疲劳模型和耐疲劳设计向定量化和材料结构一体化方向发展。

本文综述胶料配方、工艺条件和使用环境等对橡胶材料疲劳寿命的影响以及橡胶材料疲劳寿命的研究方法和有限元仿真预测橡胶材料疲劳寿命等方面的研究进展,期望对于橡胶制品的耐疲劳性能分析与设计有所裨益。

1 橡胶材料疲劳寿命的影响因素

1.1 胶料配方

胶料配方是决定橡胶材料耐疲劳性能的关键因素,一直是橡胶制品研发的重点。在结构、受力条件和使用环境等一定的情况下,橡胶制品的疲劳寿命与胶料配方设计息息相关,尤其是生胶、填料、硫化剂体系和防护体系等的选择对橡胶材料耐疲劳性能影响很大。

1.1.1 生胶

橡胶的化学微观结构[决定玻璃化温度(T_g)、热氧稳定性和应变诱导结晶^[1]等]、相对分子质量及支链、内部杂质以及橡胶并用等都会影响橡胶制品的疲劳寿命。如氟橡胶和氢化丁腈橡胶(HNBR)等特种橡胶的热氧稳定性较好,而天然橡

胶(NR)和丁苯橡胶(SBR)较差。

提高橡胶分子链的不饱和度可提高其耐热氧老化性能,如HNBR的热氧稳定性优于丁腈橡胶(NBR)^[2]。生胶的相对分子质量和分子结构对橡胶材料的耐疲劳性能有较大影响,J. Zhao等^[3]研究表明相对分子质量较低的SBR具有较好的耐疲劳性能,顺式含量较高的顺丁橡胶(BR)耐疲劳性能较好,原因是应变诱导结晶延迟了疲劳失效。表1为某轮胎胎侧胶配方比较,正常配方试样在屈挠试验中屈挠15万次时发生裂口,而试验配方试样在屈挠50万次时仍未出现裂口。可见,在配方中适当增大BR并用比有利于提高胎侧胶的耐疲劳性能。

K. Brüning等^[4]采用广角X射线衍射研究了NR裂纹尖端的应变诱导结晶现象(见图2),结果表

表1 某轮胎胎侧胶配方对比

组 分	试验配方	正常配方
NR	60	75
BR	40	25
炭黑N375	45	45
硬脂酸	2.5	2.5
纳米氧化锌	3.2	3.2
不溶性硫黄HD OT20	2	2
其他	11	11

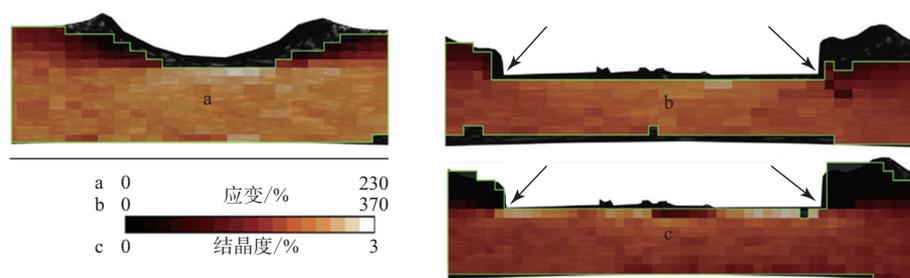


图2 不同应变条件下NR的结晶现象WAXD图

明由于结晶动力学,裂纹尖端的结晶性在动态条件下比静态条件下差,结晶的增强作用在低应变下不明显。橡胶并用轮胎胶料配方中很常见^[5],不同橡胶之间的相容性可影响制品的耐疲劳性能,K. Darja等^[6]运用原子力显微镜和动态力学分析仪等测试仪器研究了不同并用比NR/SBR并用胶的形态及耐疲劳性能。

工业生产及生活中减震橡胶制品的生胶一般选用NR,其耐疲劳性能较好^[7],有特殊使用条件要

求的,也会并用氯丁橡胶(CR)或SBR。如果橡胶制品在高低温、油介质等特殊环境下使用,其生胶可选择CR、硅橡胶、NBR和乙丙橡胶等。常用胶种的耐疲劳性能由好到差的顺序为:NR,CR,NBR,SBR。在长时间大变形和应力作用下的橡胶制品,其生胶应选择主链饱和的橡胶或者具有吸电子侧基的橡胶(如CR),可提高橡胶制品的耐臭氧龟裂性能。在选择橡胶制品的生胶时,应分析制品的使用要求,综合考虑耐疲劳、耐温、耐油和耐老化

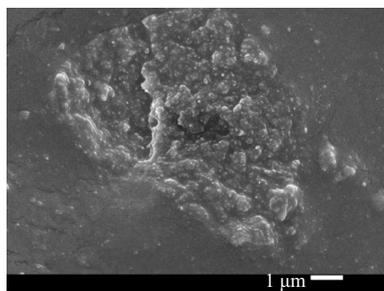
等因素。

1.1.2 填料

橡胶制品大部分选用炭黑为补强剂,有时为了调整耐疲劳或抗撕裂性能,也会加入白炭黑。NR和CR本身具有优异的物理性能,其橡胶制品在选用炭黑品种时对补强性考虑较少,主要考虑炭黑对橡胶制品生热和耐久性能的影响,一般选择粒径较大的炭黑N770,N660和N550等的一种或多种并用,这样可实现橡胶制品良好的动态性能,而疲劳生热也不高^[8]。白炭黑加入后会与橡胶形成交联键,使橡胶交联分子链末端相对分子质量减小,从而造成初始裂纹形成的临界能量降低,橡胶材料的耐疲劳性能变差^[9-10];炭黑的补强作用会使橡胶材料的临界撕裂能提高;填料的分布不均会造成橡胶材料的裂纹尖端钝化和偏转,阻碍裂纹的扩展,但炭黑填料的聚集体由于尺寸过大,混炼时在橡胶内部可能分散不开(见图3),造成初始缺陷尺寸增大,缺陷数量增加,使橡胶材料的裂纹更容易形成^[11-13]。因此在临界撕裂能一定的情况下,寻找最佳的补强剂至关重要,在保证补强剂用量合适(含胶率一定)时,橡胶材料的耐疲劳性能才能达到最好。动态减震橡胶制品对疲劳寿命要求较高,在此类产品的配方设计时,其含胶率一般较高,常在60%左右。无机填料因为补强性差,对临界撕裂能的提升作用不大,因此对于疲劳寿命要求较长的减震橡胶制品,无机填料用量不能太大。目前在橡胶材料疲劳失效的研究中对交联网络和填料分散等微观现象关注较少^[14],建议加强这些方面的探讨。

1.1.3 硫化体系

在硫黄硫化体系中,交联键中硫原子数越少,



放大1万倍。

图3 炭黑聚集体扫描电子显微镜(SEM)图像

橡胶材料的耐疲劳性能越差。这是因为硫原子数量少,即形成的多硫交联键少,交联键的刚性大,交联结构的的活动范围小,橡胶分子链段运动受到的束缚力大。多硫键一般在主链断裂之前发生断裂,导致应力在较大范围内重新分布,因此使橡胶材料的耐疲劳性能得到改善^[15]。在硫黄硫化体系中,从普通硫黄硫化体系、半有效硫化体系、有效硫化体系到硫给予体无硫硫化体系,其橡胶材料中含有的多硫键逐渐减少、单硫键逐渐增多,而S—S键键能比C—S键键能低,当外界应力作用于橡胶材料时,S—S键先断裂,应力重新分布,从而减缓了橡胶分子链的断裂,因此多硫键含量较大的橡胶材料具有较好的耐疲劳性能^[16-17]。交联密度增大时,橡胶材料的结晶度和结晶尺寸会减小,橡胶制品的临界疲劳破坏能量降低,耐疲劳性能下降^[1,18-19]。

饱和橡胶如硅橡胶、HNBR和乙丙橡胶硫化时采用过氧化物硫化体系,生成C—C交联键,C—C键键能高,抗撕裂和耐疲劳性能差。卤代丁基橡胶硫化时采用金属氧化物如氧化锌硫化,此类氧化物粒子较大,未参与反应的氧化锌很容易成为橡胶初始裂纹的前驱体^[20],如图4所示。硫化程度对橡胶材料耐疲劳性能也有较大的影响。当欠硫时,橡胶材料的滞后损失增大,动态生热提高,耐疲劳性能下降;而过硫时,分子链网络活动能力受到限制,应力不易分散,容易产生应力集中,耐疲劳性能也会下降。因此,在橡胶制品生产过程中,需要控制合适的硫化程度,才能有效提高橡胶材料的耐疲劳性能。

1.1.4 防护体系

在胶料配方设计时加入防老剂,可延缓橡胶材料在疲劳过程中发生的结构变化,尤其在高温条件下,防老剂可缓解应力活化引起的氧化反应和臭氧龟裂反应,延长橡胶制品的使用寿命。目前常用的防老剂大多是酮与芳胺的缩合物及对苯二胺类防老剂(如防老剂3100和4020等)。对苯二胺类防老剂在改善橡胶材料的耐疲劳性能方面表现优异,这是由于该类防老剂的氢活泼,并且容易迁移,在橡胶材料疲劳过程中产生的自由基容易被氢消耗掉,在橡胶分子链断裂之前优先反应,阻止了进一步的化学破坏,可有效延长橡胶制品动

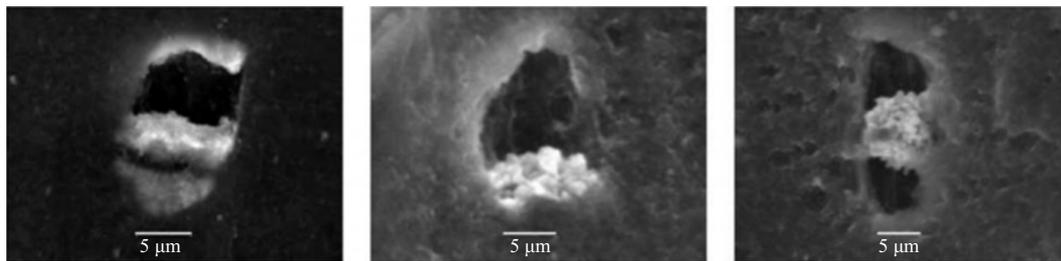


图4 氧化锌引发的橡胶材料初始裂纹SEM照片

态条件下的疲劳寿命。

1.1.5 增塑剂及树脂

增塑剂的加入会使橡胶材料的填料占比下降,造成橡胶材料的临界撕裂能降低^[21]、加速裂纹扩展和动态性能变差,从而使临界疲劳破坏能量降低。对于较长时间在动态条件下使用的橡胶制品,增塑剂用量应尽量减小。K. Cho等^[22]分别对比了SBR和NR在充油和未充油状态下的疲劳裂纹增长速率,并建立了理论模型。

胶料配方中加入的树脂多为碳氢化合物,其 T_g 比橡胶高,因此树脂的加入会提高橡胶材料的 T_g 和临界撕裂能,减小疲劳裂纹增长速率。在轮胎胶料配方中加入适量的树脂会提高交联网络结构和抗撕裂性能,但在高应变下这种交联网络结构会被破坏;另外,加入过量树脂会使含胶率下降,导致橡胶材料的临界撕裂能降低。因此,树脂的加入也应适量^[23]。

1.2 工艺条件

从原材料到橡胶制品的产出需要经过橡胶混炼、压延(挤出)、成型、硫化等工序,在这一系列的加工过程中,每个步骤的工艺条件都会对橡胶制品的疲劳寿命产生影响。因为胶料配方中大部分配合剂为无机物或小分子有机物,与橡胶的结合力较差,如果混炼不均匀、填料分散差,都会导致橡胶材料内部初始裂纹增加;同时无机填料分散不好,会增大胶料内部摩擦力,产生应力集中,同样会降低橡胶材料的耐疲劳性能。胶料混炼结束后,一般需要在开炼机上薄通8—10次,使各种配合剂分散均匀,但薄通次数再增多,不会再提升配合剂的分散。如果有较难分散的配合剂,需分批次加入或者分段混炼,还可以加入分散剂,以使配合剂分散更均匀。

压延和挤出等工艺稳定性对橡胶制品性能的影响也很大,如轮胎的胎面挤出过程中如果存在

较大的裁断公差,其成型辊压过程中肩部贴合度差,会引起胎面材料分布不均匀,采用胎面缠绕技术解决了这一难题^[24]。在模具的结构设计方面,应尽量避免橡胶制品出现严重受力点及应力集中区。对于模压成型的制品,需要提高模腔的压力及封胶效果,以提高材料的紧实度及界面之间的粘合性,从而减少橡胶制品的内部缺陷。在成型过程中,应尽量确保橡胶制品各部件之间良好粘合,防止出现脱层和横截面分布不均匀等问题,以延长橡胶制品的疲劳寿命。

橡胶制品的硫化程度对制品的疲劳寿命也有较大影响,合适的硫化工艺可保证设定的硫化程度。如果橡胶制品各部位的硫化程度不一致,在动态条件下使用时易产生应力集中,也会缩短橡胶制品的疲劳寿命。尤其是大型厚制品,应尽量解决硫化返原及内外硫化程度不一致等问题,硫化设备的选择和硫化条件的设定等都对橡胶制品的疲劳寿命有重要影响。

1.3 环境因素

1.3.1 温度

环境温度对橡胶制品疲劳寿命具有重要影响,主要表现如下。(1)高温会加速橡胶材料老化,使其性能下降甚至丧失。郑爱隔等^[25]研究发现,高温会使橡胶与钢丝绳线发生粘合失效。(2)高温会降低橡胶材料的弹性模量和拉断伸长率等物理性能,疲劳裂纹成核及增长速率加快。有研究发现^[26],当温度从0℃上升到100℃时,SBR的疲劳寿命缩短1万次,而填料的加入可以在一定程度上改善SBR对温度的敏感性。

1.3.2 介质氛围

环境介质对橡胶材料疲劳裂纹增长也具有明显的影响。一般惰性气体(如氮气和氩气等)环境会抑制橡胶材料疲劳裂纹扩展,氧和臭氧环境会加速疲劳裂纹扩展^[27]。臭氧比氧气更容易导致橡胶

材料微裂纹的产生,降低裂纹扩展临界能量。

在应力集中区域,裂纹尖端的橡胶分子链易与臭氧反应,即臭氧与橡胶分子链主链上的C=C双键反应,使其断裂。在臭氧环境下,橡胶材料瞬间能量释放率超过一个很低的临界值时(通常远远小于临界机械疲劳能量释放率),裂纹就开始扩展,而添加了抗臭氧剂的橡胶材料的临界值比未添加的增大10倍。A. N. Gent等^[28]研究了一定范围内臭氧对橡胶材料裂纹增长速率的影响,结果表明当环境温度与 T_g 相近时,在臭氧浓度一定的条件下,裂纹增长速率与温度呈正相关关系;当环境温度过高(与 T_g 之差大于100℃)时,臭氧浓度是决定裂纹增长速率的唯一因素。相对于真空环境,氧气环境下橡胶材料的裂纹扩展临界能量偏低,在外界较小的应力条件下就可引发裂纹成核与扩展。影响橡胶材料机械疲劳行为的主要因素是氧化老化,氧化老化会使橡胶材料发生脆化,抵制裂纹扩展的能力丧失。即使是新橡胶材料,氧化老化也能以恒定的能量释放率增大裂纹增长速率。A. N. Gent等^[29]还研究了NR, SBR和BR在空气和真空中的裂纹增长速率,结果表明通入氧气时橡胶材料裂纹增长速率增大,不通氧气时裂纹增长速率复原,即氧气对裂纹增长速率的影响是可逆的,但是氧化老化对橡胶材料的疲劳和断裂等的影响不可逆。研究^[30]还发现,在疲劳过程中,橡胶大分子链在应力作用下会发生断裂,其活性自由基末端容易与氧气反应,产生应力集中,微裂纹在应力作用下不断扩展直至橡胶材料断裂。E. J. Blackman等^[31]研究发现,当橡胶材料内部的含氧量达到其本身质量的1%时,橡胶制品的疲劳寿命就会缩短1/2。胶料配方和加工工艺在很大程度上决定了老化对橡胶材料耐疲劳性能的影响。为了找出氧化与橡胶材料耐疲劳性能之间的关系,G. J. Lake^[32]研究了加有防老剂的SBR,发现进行疲劳试验时试样的防老剂消耗量比未进行疲劳试验的试样大,防老剂在疲劳过程中消耗了活性氧,使应力重新分布,延缓了试样的断裂。

总之,目前尚无模型描述胶料配方、工艺条件、使用环境等对橡胶材料耐疲劳性能的影响,在其中任意条件改变的情况下,橡胶材料的耐疲劳性能可能发生很大变化。根据橡胶材料的疲劳模型和耐

疲劳设计向定量化和材料结构一体化方向发展,建立可设计、量化的数学模型是非常必要的。

2 橡胶材料疲劳寿命研究方法

由于金属材料悠久的应用历史和较成熟的研究方法,学术界和工程界对橡胶材料的耐疲劳性能的研究方法最初都参照了金属材料的相关研究方法,主要为连续介质力学方法和断裂力学方法两类。

类比金属材料的疲劳破坏过程,橡胶材料的疲劳破坏过程通常可以分为两个阶段,第1阶段是在材料内部原本没有明显可见裂纹的区域内,微观缺陷逐渐萌生并不断聚集而形成裂纹的阶段;第2阶段是在第1阶段微小裂纹形成的核心区域内^[33],裂纹持续扩展直至材料局部或整体断裂的阶段。橡胶材料疲劳寿命预测模型的研究最初是建立在对这两个阶段分别进行研究的基础上。而随着对微观裂纹形成机理的深入研究,以及连续介质力学方法的不断扩展,A. N. Gent等^[34]首先指出,橡胶材料在疲劳加载过程中出现的宏观可见裂纹是微观初始缺陷持续扩展的结果,即上述两个物理过程的内在机理是可以统一起来的,因而对于宏观疲劳裂纹形成的理解应该基于对橡胶材料微观疲劳裂纹成核和扩展两个过程的同时研究。越来越多的研究人员认可这一观点,并以此为基础做了大量的试验和理论研究^[35-36]。

2.1 疲劳裂纹萌生寿命预测方法

对于橡胶材料疲劳裂纹萌生阶段的寿命预测方法包括连续介质力学方法和连续损伤力学方法两类。采用连续介质力学方法时,一般假设从初始受载到裂纹萌生的整个阶段,材料内部都保持均一连续的状态,而疲劳寿命与材料局部所受的负荷大小有关,通常采用一个与材料局部受力或变形状态有关的疲劳预测因子作为描述负荷大小的物理量,并基于连续介质力学理论,根据简单的材料疲劳试验或构件疲劳试验结果,将该预测因子与疲劳裂纹萌生寿命之间建立起函数关系,该方法的思想源于用应力-寿命($S-N$)曲线的方法研究金属材料和构件的疲劳寿命^[27],疲劳预测因子与疲劳裂纹萌生寿命通常被认为满足幂级数函数关系:

$$P = kN_f^b \quad (1)$$

式中： P 为疲劳预测因子； N_f 为载荷的循环次数； k 和 b 为材料常数，可以通过试验结果进行拟合得到。常用的疲劳预测因子分为以下几类：(1)应变相关物理量^[37-38]，包括工程应变、Green-Lagrange应变、对数应变、八面体切应变、最大切应变和伸长率；(2)应力相关物理量^[39]，包括工程应力、柯西应力和基于主应力函数的有效应力；(3)能量相关物理量，包括应变能密度^[40]和开裂能密度^[41]；(4)其他参数，包括最大Eshelby应力和基于临界面的应力参量。

1940年，S. M. Cadwell等^[42]在研究未填充硫化胶的疲劳寿命时发现，在应变幅值恒定的情况下，NR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。同时他们利用试验数据分别得到了单轴和剪切变形条件下应变与疲劳寿命之间的经验关系式，但对于如何将加载条件相对简单的试验结果应用于复杂应变条件下橡胶材料疲劳寿命的预测，该研究并没有涉及到。

1977年，B. J. Roberts等^[43]通过试验研究了单轴拉伸和等双轴拉伸条件下不同橡胶材料疲劳寿命与最大主伸长量(或最大主应变)之间的关系，试验证明以应变能密度函数作为疲劳寿命预测因子得到的 $S-N$ 曲线无法同时预测单轴拉伸和等双轴拉伸的疲劳试验结果。1989年，H. S. Ro^[44]重新分析了B. J. Roberts的试验数据，将其他基于应变的物理量如八面体剪切应变和最大剪切应变等作为疲劳寿命评估参量，研究结果表明这些应变参量都不能很好地将单轴拉伸与等双轴拉伸的试验结果统一起来。

随着裂纹扩展的能量方法在橡胶材料疲劳寿命预测中的成功应用，越来越多的学者将基于能量的物理量作为疲劳损伤参量来预测橡胶材料疲劳裂纹萌生寿命，其中应变能密度是被使用最广泛的参量。H. S. Ro^[44]的研究表明，将应变能作为疲劳损伤参量对橡胶材料疲劳寿命的预测效果比其他基于应变的损伤参量预测效果好，但该研究中假设了应力-应变关系是线性的，与实际情况不符。

在橡胶材料疲劳裂纹萌生寿命预测方法的

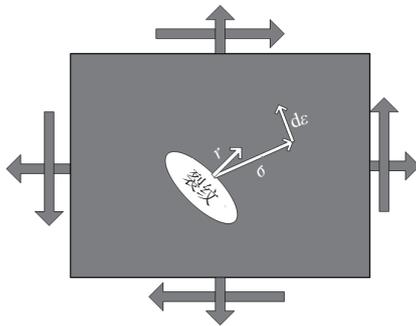
实际应用方面，前人也做了很多研究工作。早在1990年J. De Eskinazi等^[45]就利用有限元方法计算了3种不同设计的轮胎某部分结构的应变能密度，并对计算得到的应变能密度和实际的疲劳寿命进行了相关性分析。之后S. Yamashita^[46]用同样的方法分别对橡胶衬套和橡胶部件的疲劳寿命进行了研究。

应变能密度作为橡胶材料疲劳寿命预测因子，能很好地预测简单加载条件下的疲劳寿命，但复杂加载条件下采用应变能密度预测出的疲劳寿命与实际情况会有较大差异，并且由于应变能密度是一个标量，无法解释在不同形式的多轴加载条件下试样的实际开裂具有明显方向性这一现象。对此，提出了新的理论，尤其是将临界平面方法应用于橡胶材料多轴加载条件下的疲劳裂纹萌生寿命预测取得了很好的效果。在临界平面方法下，式(1)中的 P 可以与某一材料平面联系起来，该平面内的疲劳裂纹萌生参量可以通过临界平面法计算出来，进而计算出材料在该平面上的疲劳寿命^[47]。

应用临界平面方法的另一个好处是可以解释压缩引起的橡胶材料疲劳破坏现象，橡胶构件通常会受到压缩负荷的作用，在非静水压力作用下，构件通常会在某一特征方向上产生明显的裂纹和破坏，应用临界平面方法分析可知，沿着某一方向的压缩负荷会引起另一方向的拉伸或剪切负荷，在垂直于压缩负荷方向上，裂纹会发生闭合，而在橡胶材料内部，裂纹会沿着与拉伸或剪切负荷有关的方向发生裂纹的萌生和扩展。

W. V. Mars^[48]对多轴负荷作用下橡胶材料疲劳裂纹萌生的判断准则进行了研究，并分别用最大主应变准则和应变能密度准则预测了试样在扭转载荷作用下的疲劳裂纹萌生寿命，试验结果表明，驱动橡胶材料内部微裂纹扩展的能量是应变能密度的一部分，这部分能量定义为开裂能密度(原理如图5所示)；通过定义开裂面的方向，将开裂能密度的计算方法由微小应变范围扩展到有限应变范围，使得开裂能密度理论能够应用于有限变形范围内的橡胶材料疲劳寿命计算，大大提高了该方法的实用价值。

以上的橡胶材料疲劳寿命研究方法均是基于



r 为裂纹平面的法向; σ 为拉伸应力矢量; $d\epsilon$ 为应变增量矢量。

图5 开裂能密度原理示意

连续介质力学理论,而采用连续介质力学的方法预测橡胶材料疲劳裂纹萌生寿命存在很大的局限性,主要表现在该方法仅对单轴加载方式或特定多轴加载方式以及简单幅值周期性加载条件下橡胶构件疲劳寿命的试验结果有较好的预测性^[49-50],在一般多轴和变幅负荷加载条件下,采用这种方法预测出的疲劳寿命与试验结果可能存在较大差异,预测出的疲劳危险区域位置与实际情况也会出现较大偏差,主要原因在于标量形式的疲劳寿命预测因子无法准确评估多轴和复杂加载条件下橡胶材料内部真实的损伤状况和裂纹萌生情况。

橡胶材料疲劳裂纹萌生寿命预测的另一种方法是基于连续损伤力学理论^[51],连续损伤力学的思想是:在橡胶材料承受机械负荷发生疲劳的过程中,由于内部微裂纹的存在和持续扩展,橡胶交联网络结构传递负荷的能力随着损伤的增加而持续减弱。一般通过定义损伤应力(或有效应力)和损伤动力学函数来构建负荷与损伤疲劳寿命之间的关系:

$$\tilde{S}_i = \frac{S_i}{1-D} \quad (2)$$

$$\dot{D} = -\partial\varphi^*/\partial y \quad (3)$$

式中: \tilde{S}_i 为有效主应力; S_i 为第二类Piola-Kirchhoff主应力; D 为损伤扩展程度,与橡胶交联网络的破坏程度相关, $D=0$ 对应材料的初始状态, $D=1$ 对应材料出现宏观可见裂纹的破坏状态; \dot{D} 为损伤扩展速率; φ^* 为应变能耗散势函数; y 为损伤应变能释放率。

连续损伤力学理论可以有效解释橡胶材料的蠕变损伤效应,在预测材料的疲劳损伤寿命方面有越来越多的应用,尤其通过引入等效应力损伤

参量的概念,在预测橡胶材料的多轴和复杂加载条件下的疲劳寿命方面具有广泛的应用前景。在应用连续损伤力学方法研究橡胶材料的疲劳寿命方面,学者们也开展了很多有价值的工作。

B. Wang等^[52]提出了一种连续损伤模型用于评估弹性体的疲劳损伤行为,其中材料损伤部分的应变能密度函数采用Ogden本构模型来描述,并采用连续损伤力学方法定义了损伤应变能函数与损伤演化方程,在此基础上推导出了以最大正应变为自变量的疲劳寿命函数关系式,以此计算出的炭黑填充NR的疲劳寿命与试验结果具有很好的 consistency。

G. Ayoub等^[53]在连续损伤力学模型的基础上,同时采用Ogden应变能函数和开裂能密度函数来描述损伤应变能释放率,提出了预测橡胶材料多轴疲劳寿命的损伤参量和损伤演化模型,并推导出了损伤参量的一般表达式。该损伤演化模型考虑了变幅负荷效应和平均负荷效应,用该方法预测出的不同加载路径下的疲劳寿命结果与试验结果有很好的 consistency。

龚科家等^[54]研究了多项式、Ogden以及Arruda-Boyce等橡胶本构模型的可靠性、稳定性和精度,分析表明轮胎接地压力和最大应变能密度等关键参数与橡胶本构参数有较大的相关性,二次多项式和Ogden本构模型在轮胎有限元分析中有较好的效果。

2.2 断裂力学方法

采用断裂力学方法研究橡胶材料的疲劳裂纹扩展行为是研究裂纹尖端微观扩展情况与裂纹尖端能量之间的关系。断裂力学方法由Griffith首先提出,断裂力学方法研究的对象是本身含有裂纹或内部有缺陷的弹性体,它是一种基于能量平衡假设的裂纹扩展判据,该假设认为裂纹扩展是弹性体内存储的势能转换为新裂纹表面能的过程,其中裂纹扩展的能量判据为能量释放率或撕裂能密度。

在橡胶材料的裂纹扩展疲劳试验中,对于特别设计的试样,在给定裂纹初始几何尺寸的条件下,裂纹尖端的能量释放率(或撕裂能密度)可以通过材料试验获取的远离试样裂纹区域的应力-应变场信息计算出来,同时可以通过监测裂纹增

长尺寸和加载次数计算裂纹增长速率。通过裂纹扩展疲劳试验建立的撕裂能-裂纹增长速率之间的关系,可以用于预测在其他加载循环条件下橡胶材料的疲劳寿命。

断裂力学方法最早被应用于计算橡胶材料产生局部裂纹后的拉伸强度^[55-57],A. G. Thomas用这一方法研究了承受周期性载荷的NR内部的裂纹扩展规律,后经诸多研究证实橡胶材料内部裂纹的增长速率与裂纹单位面积上的最大能量释放率满足一定的函数关系。

1953年,R. S. Rivlin等^[55]通过试验证明,当能量释放率超过某一临界值后,裂纹在橡胶材料内部出现稳定扩展,且该临界值与试验用试样几何尺寸无关。试验采用3种形式的试样(如图6所示),包括中心有裂纹的条状试样[图6(a)]、裂纹在边缘的条状试样[图6(b)]和裤形试样[图6(c)],并由此证明了该临界能量释放率是橡胶材料的一种材料属性。随后,A. G. Thomas^[56]又将该方法扩展到研究周期性负荷作用下橡胶材料内部裂纹增长情况,试验发现在非填充NR内部,裂纹增长速率与一个周期内裂纹尖端的最大应变能释放率呈平方关系。

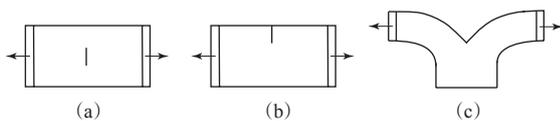


图6 撕裂试样形状示意

G. J. Lake等^[58]结合大量非填充NR和SBR在横幅加载条件下裂纹扩展试验数据,提出可以将裂纹尖端能量释放率-裂纹增长速率曲线按照周期内最大能量释放率分为4个区域,并给出了这4个区域裂纹增长速率的近似表达式。在双对数坐标系下绘制的橡胶材料裂纹增长速率曲线特性如图7所示。

4个区域裂纹增长速率的近似表达式为

$$\begin{cases} \frac{da}{dN} = r_z & T < T_0 \\ \frac{da}{dN} = A_0(T - T_0) + r_z & T_0 \leq T < T_i \\ \frac{da}{dN} = B_0 T^p & T_i \leq T < T_c \\ \frac{da}{dN} = \infty & T \geq T_c \end{cases} \quad (4)$$

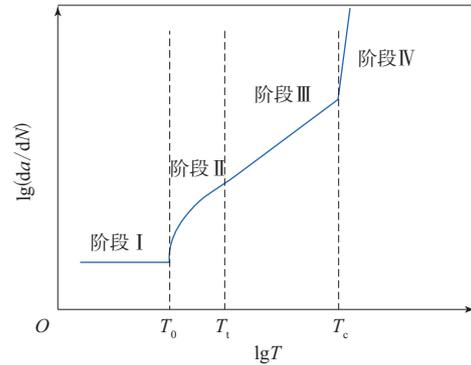


图7 Lake-Lindley橡胶材料裂纹扩展模型

式中: da/dN 为裂纹增长速率; T 为橡胶材料裂纹扩展前端的能量释放率, T_0, T_i, T_c 分别为3个阶段的临界能量释放率阈值,可以通过试验测得;在不同的能量释放率范围内,橡胶材料裂纹尖端的扩展情况不同, r_z 表示在小幅循环负荷作用下由于温度和老化等因素造成的匀速裂纹增长速率, A_0, B_0 和 p 是材料常数。

应用上述模型可以计算在全松弛周期性循环负荷作用下橡胶材料的裂纹增长速率,对于非全松弛周期性循环负荷,即一个周期内能量释放率的最小值不为零的循环负荷,可以采用P. C. Paris等^[59]的方法建立等效撕裂能模型,其等效撕裂能计算方式如下:

$$E_{eq} = \Delta E = E_{max} - E_{min} = E_{max} (1 - R) \quad (5)$$

式中, E_{eq} 为与撕裂比为零时的等效撕裂能, E_{max} 和 E_{min} 分别为最大和最小撕裂能, R 为负荷比。

P. C. Paris等效撕裂能的概念可以与裂纹增长速率的计算方法结合起来以预测非全松弛周期性循环负荷作用下橡胶材料疲劳裂纹扩展寿命。然而该方法只能用于描述没有应变结晶效应的橡胶材料内部疲劳裂纹增长速率与裂纹尖端撕裂能之间的关系,试验证明对于具有明显应变结晶现象的橡胶材料^[44],在非全松弛循环载荷作用下的疲劳裂纹增长速率不仅与循环最大能量释放率有关,还受到循环内最小能量释放率的影响。一个周期内的最小能量释放率与最大能量释放率的关系可以用 R 来表示,W. V. Mars等^[60-61]提出了一种用于表征负荷比效应对橡胶材料裂纹增长速率影响的新模型,表达式如下:

$$\begin{cases} E_{eq} = E_{\frac{F(R)}{F(0)}} E_c^1 - \frac{F(R)}{F(0)} \\ F(R) = F_0 e^{F_{exp} R} + F_1 R + F_2 R^2 + F_3 R^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, F_0, F_1, F_2 和 F_3 是材料常数, 函数 $F(R)$ 确定了 R 对裂纹增长率的影晌。

W. V. Mars 等还将开裂能密度理论与断裂力学方法结合起来应用于有限变形下橡胶材料的疲劳寿命计算, 取得了很好的效果, 与前人采用最大能量释放率作为裂纹扩展驱动力不同的是: 假设橡胶材料的本征微裂纹具有向各个方向扩展的可能性, 每个方向上的裂纹扩展由该方向的开裂能驱动, 而实际的开裂方向应该是裂纹扩展最快的方向。该方法不仅可以预测橡胶材料疲劳裂纹萌生寿命, 还能够预测潜在的开裂方向。

通过上述理论研究确定了橡胶材料疲劳裂纹增长速率的有效表达式, 可以通过对裂纹增长速率公式的积分确定橡胶材料的疲劳裂纹萌生寿命^[62-63]:

$$N = \int_{c_0}^{c_t} \frac{1}{f[T(c, t)]} dc \quad (7)$$

式中, $f[T(c, t)]$ 是以能量释放率(撕裂能)为变量的函数, $T(c, t)$ 为能量释放率(撕裂能)与裂纹长度及时间之间的关系函数。

3 有限元仿真在橡胶材料疲劳寿命预测中的应用

随着橡胶制品在工业领域中的广泛应用, 其疲劳失效问题越来越受到关注, 对于橡胶制品如轮胎或橡胶部件, 传统的疲劳寿命评估方法主要基于疲劳耐久性试验, 疲劳耐久性试验分为常规疲劳试验和加速疲劳试验。疲劳耐久性试验需要在产品设计完成并加工出来后进行, 一次完整的疲劳试验通常需要花费较长的时间和很大的资源投入, 并且由于试验结果受各种不确定因素的影响而存在较大的分散性, 限制了对产品设计性能可靠性评估的有效性。

在现代工业生产中, 在产品的设计、研发和性能验证阶段, 越来越多地依靠 CAE 仿真技术和仿真软件的帮助, 通过计算机仿真手段对产品设计进行性能验证、比较和优化, 可以提高研发效率、加快高性能产品的开发进度、降低开发成本, 为产品的实际投产和使用提供更多的保障。在众多性能的仿真中, 产品的疲劳耐久性仿真和疲劳寿命预测一直是学术界和工程界研究的关键课题, 对产品疲劳性能的预估可以指导产品结构的耐疲劳设计, 而结构疲劳建模的准确性和疲劳寿命预测

的可信度直接影响产品在实际使用过程中的耐久性和可靠性。在设计阶段将产品可能出现的疲劳失效风险降到最低, 对于企业降低包括维护、理赔和召回成本在内的产品全生命周期成本具有极其重要的意义。

产品疲劳分析模型的建立需要通过材料和结构的疲劳试验, 研究材料和构件疲劳失效过程的一般规律, 建立描述结构受载方式与疲劳失效关系的通用数学模型, 该数学模型应具备能够通过数值计算评估材料和结构的疲劳耐久性功能, 并且计算结果应该对实际结构的耐疲劳和耐久性优化具有显著的指导意义。疲劳分析模型的最终目标是通过仿真和数值计算的方式, 准确预测产品使用寿命。橡胶构件疲劳耐久性分析的一般流程如图 8 所示。

对于橡胶制品来说, 运用仿真手段进行耐疲劳性能仿真和建立有较高可靠性的疲劳寿命预测模型具有很大的挑战性^[64-66], 主要难点集中在以下几个方面。

(1) 橡胶材料属于非线性、具有复杂应力-应变关系的高分子弹性材料, 在使用过程中通常处于大变形状态, 因此在金属材料研究领域常用到的小变形、线弹性假设无法应用于橡胶材料的受载机械疲劳分析。

(2) 橡胶材料在加载条件下会出现应力软化、应变结晶、蠕变松弛和粘弹滞后等一系列特性, 这些特性为分析橡胶结构的真实应力-应变状态引入了更多非线性的复杂机制, 直接影响疲劳分析的准确性。

(3) 橡胶制品的疲劳寿命除了与负荷有关外, 还与温度和臭氧浓度等环境因素有很大的关系, 在进行疲劳耐久性分析时需要考虑这些因素的影响。对于长时间使用的橡胶制品, 还要考虑老化导致材料力学行为变化。以上这些情况决定了对橡胶制品疲劳寿命计算有较大的难度, 但近年来已陆续有一些用成熟的商用仿真分析软件对橡胶制品疲劳仿真和疲劳寿命预测的研究成果。本团队联合 W. V. Mars 博士基于橡胶材料疲劳微裂纹扩展理论和临界平面方法(如图 9 和 10)^[67], 对全钢子午线轮胎进行了模拟稳态滚动条件下疲劳耐久性分析和疲劳寿命预测, 确定了轮胎各部件橡胶材

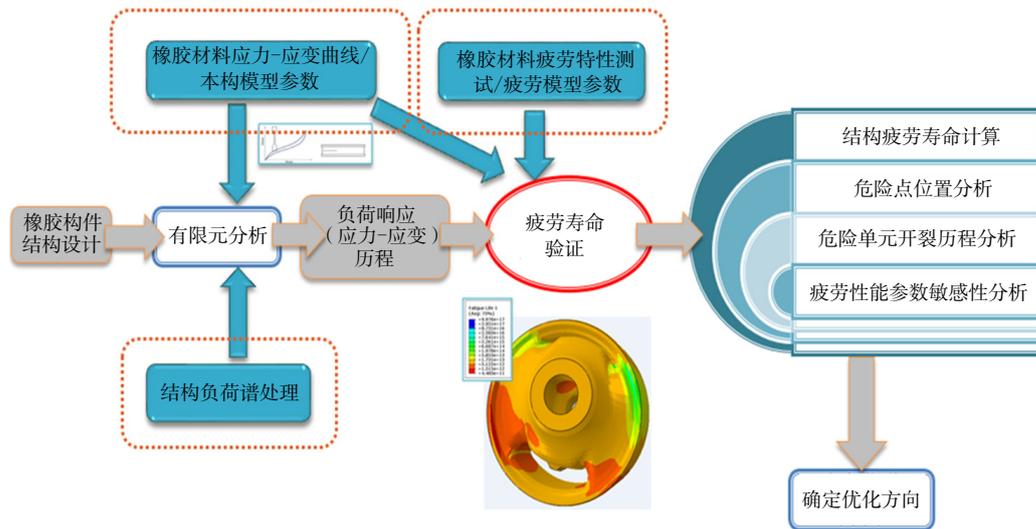


图8 橡胶构件疲劳耐久性分析流程

料的本构模型参数和疲劳耐久性模型参数,利用Endurica软件对轮胎各部件断面在不同负荷条件下的疲劳寿命分布和变化情况进行了预测,同时对各部件的疲劳危险位置进行了潜在开裂破坏模式分析,该成果获得了2016年国际轮胎工业协会特别提名奖。

(4) 橡胶制品通常在高频、变幅和多轴的复杂加载环境中使用,负荷的复杂性对疲劳耐久性分析的可靠性增添了较大的难度。美国通用汽车采用Endurica软件的多轴复杂加载处理方案^[68]对汽车底盘橡胶衬套进行了三通道路负荷谱条件下的疲劳耐久性分析,该研究采用了疲劳微裂纹增长率作为橡胶衬套损伤累计的评估量,同样采用临界平面方法对衬套橡胶单元进行了潜在的开裂疲劳分析。结果表明对于大规模复杂负荷谱作用下橡胶制品的耐久性分析和疲劳寿命计算,该方法具有实际应用价值。

4 结论

(1) 胶料配方对橡胶制品疲劳耐久性具有重要影响,对于不同使用条件的橡胶制品,胶料配方设计是关键,生胶、填料、硫化剂和防老剂等的选择很重要。另外,工艺条件和使用环境(温度和介质氛围等)对橡胶制品的疲劳耐久性也有不可忽略的影响。橡胶材料的疲劳耐久性受到工艺条件和环境条件影响,因此在橡胶材料疲劳耐久性试验中要加入工艺条件、温度和介质氛围等控制变量,

以研究在不同条件下橡胶材料的耐久性。

(2) 橡胶材料疲劳耐久性的研究方法包括基于S-N曲线的连续介质力学方法和基于断裂力学的疲劳裂纹扩展方法,其中疲劳裂纹扩展方法是通过材料的疲劳试验,在负荷(通常以撕裂能来表示)与材料疲劳裂纹增长速率之间建立起数学模型,由于该方法从机理上描述了橡胶材料的疲劳问题,并且统一了微观的橡胶材料裂纹萌生过程与材料宏观的疲劳裂纹扩展过程,因而具有预测橡胶材料在任意多轴复杂加载条件下的疲劳寿命的应用价值。

(3) 借助于有限元仿真软件,可以对橡胶材料

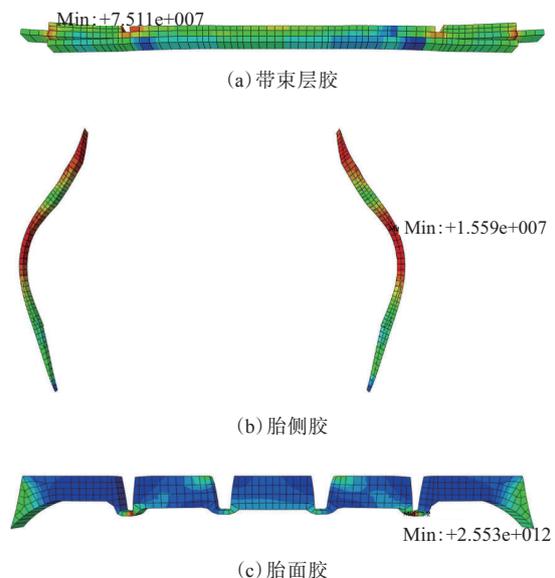


图9 轮胎部件开裂方向的临界平面分析

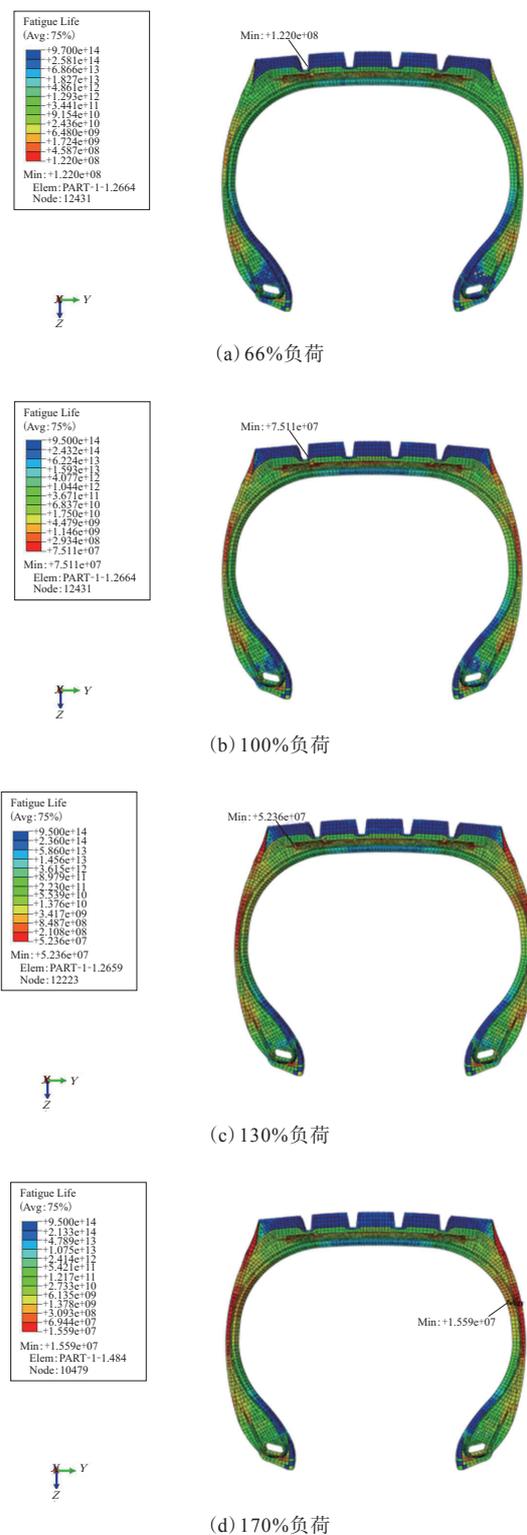


图10 不同加载条件下轮胎断面疲劳寿命分布和橡胶制品在不同负荷和使用环境下的疲劳寿命进行预测。准确的橡胶材料疲劳仿真分析还依赖于对橡胶材料疲劳耐久性机理的研究和可靠的材

料疲劳试验,并在此基础上搭建有效的描述橡胶材料疲劳特性的数学模型。在进行橡胶制品的疲劳寿命仿真时应考虑到不同的使用条件对疲劳寿命的定义不同,因此应针对实际的橡胶制品疲劳失效指标,选择相应的疲劳准则和对应的寿命仿真方法。

参考文献:

- [1] Sainumsai W, Toki S, Amnuaypornsi S, et al. Dependence of the Onset of Strain-induced Crystallization of Natural Rubber and Its Synthetic Analogue on Crosslink and Entanglement by Using Synchrotron X-ray[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2017, 90 (4) : 728-742.
- [2] Liu Y, Kim H, Pan Q M, et al. Hydrogenation of Acrylonitrile-Butadiene Copolymer Latex Using Water-soluble Rhodium Catalysts[J]. Catalysis Science & Technology, 2013, 3 (10) : 2689-2698.
- [3] Zhao J, Ghebremeskel G N. A Review of Some of the Factors Affecting Fracture and Fatigue in SBR and BR Vulcanizates[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2001, 74 (3) : 409-427.
- [4] Brüning K, Schneider K, Roth S V, et al. Strain-induced Crystallization Around a Crack Tip in Natural Rubber under Dynamic Load[J]. Polymer, 2013, 54 (22) : 6200-6205.
- [5] Wunde M, Klüppel M. Influence of Phase Morphology and Filler Distribution in NR/BR and NR/SBR Blends on Fracture Mechanical Properties[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2016, 89 (4) : 588-607.
- [6] Darja K, Anna K S, Jorge L P, et al. Morphology and Nanomechanical Characteristics of NR/SBR Blends[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2018, 91 (1) : 151-166.
- [7] 俞进涛.天然橡胶疲劳失效机理研究[D].南昌:南昌航空航天大学,2016.
- [8] Fukahori Y, Hon A A, Jha V, et al. Modified Guth-gold Equation for Carbon Black-filled Rubbers[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2013, 86 (2) : 218-232.
- [9] Klüppel M M. The Role of Filler Networking in Fatigue Crack Propagation of Elastomers under High-severity Conditions[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2009, 294: 130-140.
- [10] Bhattacharyya S, Lodha V, Dasgupta S, et al. Influence of Highly Dispersible Silica Filler on the Physical Properties, Tearing Energy, and Abrasion Resistance of Tire Tread Compound[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136 (18) : 47560.
- [11] Bhowmick A K. Threshold Fracture of Elastomers[J]. Journal of Macromolecular Science Part C: Polymer Review, 1988, 28 (384) : 339-370.
- [12] 王昊,危银涛.橡胶疲劳研究综述[J].轮胎工业,2015, 35 (10) : 579-585.

- [13] Bhowmick, Anil K, Chanchal N, et al. Threshold Tear Strength of Carbon Black Filled Rubber Vulcanizates[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, 41 (5-6) : 917-928.
- [14] 欧阳素芳, 王丽静. 橡胶疲劳失效行为的研究进展[J]. *橡胶科技*, 2015, 13 (3) : 5-10.
- [15] Warasitthinon N P, Robertson C G. Interpretation of the $\tan\delta$ Peak Height for Particle-filled Rubber and Polymer Nanocomposites with Relevance to Tire Tread Performance Balance[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 2018, 91 (3) : 577-594.
- [16] Mark J E, Erman B. *Science and Technology of Rubber*[M]. New York: Academic Press, 2005.
- [17] 陈兵勇, 王炜, 王凡. 天然橡胶疲劳性能的配方与工艺研究[J]. *世界橡胶工业*, 2009, 36 (12) : 12-15.
- [18] Huneau B. Strain-induced Crystallization of Natural Rubber: A Review of X-ray Diffraction Investigations[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 2011, 84 (3) : 425-452.
- [19] Trabelsi S, Albouy P A, Rault J. Crystallization and Melting Processes in Vulcanized Stretched Natural Rubber[J]. *Macromolecules*, 2003, 36 (20) : 7624-7639.
- [20] Huneau B, Masquelier I, Marco Y, et al. Fatigue Crack Initiation in a Carbon Black-filled Natural Rubber[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 2016, 89 (1) : 126-141.
- [21] Dutta N K. Effect of Plasticizer Concentration on the Hysteresis, Tear Strength and Stress-relaxation Characteristics of Black-loaded Rubber Vulcanizate[J]. *Colloid and Polymer Science*, 1991, 269 : 331-342.
- [22] Cho K, Jang W J, Lee D, et al. Fatigue Crack Growth of Elastomers in the Swollen State[J]. *Polymer*, 2000, 41 (1) : 179-183.
- [23] Carvagno T R, Bennekom A V, Basu S K, et al. Performance Resins in Tire Compounding[J]. *Rubber World*, 2014, 249 (5) : 27-32.
- [24] 刘晓芳, 魏胜, 张正伟, 等. 全钢工程机械轮胎胎面缠绕技术的研究与应用[C]. “万力杯”第20届中国轮胎技术研讨会论文集. 北京: 中国化工学会橡胶专业委员会, 2018: 368-371.
- [25] 郑爱隔, 马明强, 李琦, 等. 疲劳温度对橡胶与钢丝帘线动态粘合性能的影响[J]. *弹性体*, 2014, 24 (1) : 15-18.
- [26] Lake G J, Thomas A G. *Mechanics of Fracture of Rubber-like Materials*[M]. Berlin: Springer Netherlands, 1981.
- [27] Lake G J. Mechanical Fatigue of Rubber[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1972, 45 (1) : 307-328.
- [28] Gent A N, Mcgrath J E. Effect of Temperature on Ozone Cracking of Rubbers[J]. *Journal of Polymer Science Part A: General Papers*, 1966, 3 (4) : 1473-1482.
- [29] Gent A N, Hindi M. Effect of Oxygen on the Tear Strength of Elastomers[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1989, 62 (1) : 123-134.
- [30] Gent A N, Razzaghi Kashani M, Hamed G R. Why do Cracks Turn Sideways[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 2003, 76 (8) : 122-131.
- [31] Blackman E J, Mccall E B. Relationships between the Structures of Natural Rubber Vulcanizates and Their Thermal and Oxidative Aging[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1970, 43 (3) : 651-663.
- [32] Lake G J. Fatigue and Fracture of Elastomers[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1995, 68 (3) : 435-460.
- [33] Mars W V, Fatemi A A. Literature Survey on Fatigue Analysis Approaches for Rubber[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24 (9) : 949-961.
- [34] Gent A N, Lindley P B, Thomas A G. Gut Growth and Fatigue of Rubbers I. The Relationship between Cut Growth and Fatigue[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1964, 8 (1) : 455-466.
- [35] 高勋朝. 填充橡胶材料的疲劳性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [36] 张松波, 周竞发, 刘月星, 等. 氧化石墨烯对炭黑/天然橡胶复合材料耐疲劳性能的影响[J]. *橡胶工业*, 2018, 65 (11) : 1205-1209.
- [37] Cadwell S M, Merrill R A, Sloman C M, et al. Dynamic Fatigue Life of Rubber[J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1940, 12 (1) : 19-23.
- [38] Bonet J, Wood R D. *Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [39] Hideki O, Yuuta A. Fatigue Characteristics of Vulcanized Natural Rubber for Automotive Engine Mounting[J]. *Memoirs of the Faculty of Engineering*, 2007, 67 (2) : 75-83.
- [40] Mars W V, Fatemi A. Fatigue Crack Nucleation and Growth in Filled Natural Rubber[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Material and Structure*, 2003, 26 (9) : 779-788.
- [41] Mars W V. Cracking Energy Density as a Predictor of Fatigue Life under Multiaxial Conditions[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 2002, 75 (1) : 1-17.
- [42] Cadwell S M, Merrill R A. Dynamic Fatigue Life of Rubber[J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1940, 12 : 19-22.
- [43] 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 (1) : 49-54.
- [44] Ro H S. Modeling and Interpretation of Fatigue Failure Initiation in Rubber Related to Pneumatic Tires[D]. Dissertation: Purdue University, 1989.
- [45] De Eskinazi J, 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.
- [46] Yamashita S. Selecting Damping Materials Service Environment, Strain and Endurance[J]. *International Polymer Science and Technology*, 1992, 19 (4) : 41-56.
- [47] American Society for Testing and Materials. *Advances in Multiaxial Fatigue: ASTM STP 1191*[S]. Hitchin: American Technical

- Publisher Ltd. ,1993:7-36.
- [48] Mars W V. Multiaxial Fatigue of Rubber[D]. Toledo:The University of Toledo,2001.
- [49] Mars W V, Fatemi A. Factors that Affect the Fatigue Life of Rubber:a Literature Survey[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2004, 77 (3) :391-412.
- [50] 董月,周睿,辛振祥. 橡胶动态疲劳失效机理的研究进展[J]. 特种橡胶制品,2017,38 (5) :69-74.
- [51] Ayoub G, Naït-abdelaziz M, Zairia F, et al. Multiaxial Fatigue Life Prediction of Rubber-like Materials Using the Continuum Damaged Mechanics Approach[J]. Procedia Engineering, 2010, 2 (1) : 985-993.
- [52] Wang B,Lu H B, Kim G H. A Damage Model for the Fatigue Life of Elastomeric Materials[J]. Mechanics of Materials,2002,34 (3) : 475-483.
- [53] Ayoub G, Naït-Abdelaziz M, Zaïri F. Fatigue Life Prediction of Rubber-like Materials under Multiaxial Loading Using a Continuum Damage Mechanics Approach: Effects of Two-blocks Loading and *R* Ratio[J]. Mechanics of Materials,2012,52:87-102.
- [54] 龚科家,危银涛,叶进雄.填充橡胶超弹性本构参数试验与应用[J]. 工程力学,2009,26(6) :193-198.
- [55] Rivlin R S,Thomas A G.Rupture of Rubber: I. Characteristic Energy for Tearing[J]. Journal of Polymer Science, 1953, 10 (3) :291-318.
- [56] Thomas A G. Rupture of Rubber: II. The Strain Concentration at an in Sicion[J]. Journal of Polymer Science,1955,18 (88) :177-188.
- [57] 刘君. 防振橡胶材料疲劳寿命研究方法综述[J]. 中国石油和化工标准与质量,2019,18:139-140.
- [58] Lake G J, Lindley P B. The Mechanical Fatigue Limit for Rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1965, 9 (4) : 1233-1251.
- [59] Paris P C, Gomez M P, Anderson W P. A Rational Analytic Theory of Fatigue[J]. The Trend in Engineering, 1961, 13 (1) :9-14.
- [60] Mars W V, Fatemi A. Multiaxial Fatigue of Rubber: Part I . Equivalence Criteria and Theoretical Aspects[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Material and Structures, 2005, 28 (6) :515-522.
- [61] Mars W V, Fatemi A. Multiaxial Fatigue of Rubber: Part II . Experimental Observation and Life Predictions[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Material and Structures, 2005, 28 (6) :523-538.
- [62] 李志超,危银涛,金壮兵,等. 基于裂纹形核理论的橡胶制品疲劳寿命研究[J]. 弹性体,2014,24 (6) :28-34.
- [63] 李志超,李雪冰,刘万强,等. 轨道车辆空气弹簧疲劳分析[J]. 力学与实践,2015,37 (3) :326-331.
- [64] Nicholson D W, Nelson N W. Finite Element Analysis in Design with Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1990, 63 (3) : 368-406.
- [65] 张天华,许喆,王伟.交错结构免充气安全轮胎的静态接地性能和疲劳寿命的有限元分析与预测[J].橡胶工业,2018,65 (12) :1383-1386.
- [66] 王浩,宋丽媛,王日国,等.高耐疲劳轿车轮胎胎侧胶的配方设计与性能研究[J]. 橡胶工业,2018,65 (3) :313-317.
- [67] 王昊,危银涛.基于疲劳裂纹扩展理论的轮胎橡胶疲劳寿命预测[J]. 轮胎工业,2016,36 (5) :259-266.
- [68] Mars W V, Wei Y T, Wang H, et al. Computing Tire Component Durability via Critical Plane Analysis[J]. Tire Science and Technology, 2019, 47 (1) : 31-54.

收稿日期:2020-04-30

Influencing Factors and Research Methods of Rubber Material Fatigue Life

WANG Hao¹, WEI Yintao², WANG Jing²

[1. E-Rubber Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100084, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China]

Abstract: Rubber products are often used under cyclic alternating stress, and the fatigue resistance of rubber materials determines the fatigue life of rubber products. This article reviews the effect of compound formula, process conditions and usage environment on the fatigue life of rubber materials from the perspective of prolonging the fatigue life of rubber products, and summarizes the research progress of rubber material fatigue life research methods and finite element simulation to predict rubber material fatigue life. The limitations of the traditional rubber material fatigue life analysis method and fatigue resistance design are pointed out. This has guiding significance for improving the fatigue resistance analysis and design of rubber materials and extending the fatigue life.

Key words: rubber material; fatigue life; compound formula; process condition; usage environment; finite element simulation; prediction model