

橡胶疲劳失效行为的研究进展

欧阳素芳, 王丽静

(中国石化北京化工研究院燕山分院, 北京 102500)

摘要: 介绍橡胶疲劳失效行为的研究进展。橡胶疲劳失效的研究方法有裂纹成核法和裂纹扩展法; 分析交联网络、填料、应力-应变条件和环境条件等对橡胶疲劳寿命的影响因素; 综述耐疲劳橡胶的研究进展。橡胶疲劳失效的研究应多关注交联网络和填料分散等微观现象, 进一步探讨纳米填料对橡胶疲劳性能的影响。

关键词: 橡胶; 疲劳失效; 疲劳寿命; 裂纹; 交联网络; 填料

橡胶作为一种不可替代的弹性材料已经有160多年的应用历史, 在国防建设和经济建设中得到广泛应用。橡胶不仅是生活中不可缺少的物质, 也是发展高新技术所必需的高性能材料和功能性材料。为达到减振降噪、柔韧耐磨的目的, 橡胶常与金属复合制成弹性元件, 这些弹性元件在许多高精尖领域广泛应用^[1-2]。随着橡胶制品的使用条件日益苛刻, 橡胶疲劳失效问题日益突出, 亟需解决。

近年来, 与橡胶疲劳失效相关的基础理论和表征方法研究受到广泛关注。本文从橡胶疲劳失效的研究方法、橡胶疲劳寿命的影响因素和耐疲劳橡胶的研究进展等方面, 综述橡胶疲劳失效行为的研究概况。

1 橡胶疲劳失效的研究方法

材料疲劳失效过程大致可分为4个时期: 疲劳裂纹成核期、微观裂纹增长期、宏观裂纹扩展期与瞬时断裂(失稳扩展)期, 这4个时期也可以综合为2个阶段, 即裂纹形成阶段和裂纹扩展阶段。裂纹形成阶段包括裂纹成核期和微观裂纹增长期, 裂纹扩展阶段包括宏观裂纹扩展期和瞬时断裂期。疲劳寿命可以相应分为裂纹成核寿命和裂纹扩展寿命2个部分。对于低周疲劳, 裂纹形成早, 裂纹成核寿命短, 裂纹扩展寿命接近疲劳寿命, 所以在低周疲劳设计时, 主要考虑裂纹扩展寿命。但在高周疲

劳中, 裂纹成核寿命在疲劳寿命中占主导地位, 所以在高周疲劳设计时, 既要考虑裂纹成核寿命也要考虑裂纹扩展寿命^[3-6]。通常用裂纹成核法和裂纹扩展法预测橡胶疲劳寿命。

1.1 裂纹成核法

从材料承载开始, 一直到裂纹形成并扩展至某一可检测尺寸的过程称为疲劳裂纹形成阶段。裂纹成核法是根据疲劳过程应变或应力的变化来预测裂纹成核寿命。

裂纹成核法始于19世纪60年代对火车轮轴的疲劳研究^[7], 该方法在橡胶疲劳研究中的应用始于20世纪40年代^[8-9], 并一直延续至今^[10-11]。裂纹成核法中的2个主要参数是最大主应变和应变能密度。橡胶的最大主应变是比较容易获得的, 可以直接从位移计算出来。最大主应变通常用来表征橡胶的裂纹成核寿命, 橡胶的裂纹通常产生在与最大主应变方向垂直的平面上。19世纪50年代末至60年代初, 在橡胶的断裂力学理论研究取得一定进展之后^[12-19], 应变能密度逐渐成为预测裂纹成核寿命的一个参数, 它是对内在缺陷能量释放率的一种衡量。在特定的条件下, 能量释放速率与应变能密度和裂纹尺寸的乘积成正比。因此, 应变能密度可以评价能量释放速率。但裂纹成核法的应用并不广泛, 这是因为对于连续介质该方法必须基于材料疲劳点的数量, 仅适合分析疲劳寿命的空间分布。

在实际应用中,常用试样断裂时疲劳次数(N)与所施加载荷或应变(S)的 S - N 曲线来预测橡胶的裂纹成核寿命。 S - N 曲线可以是应力、伸长率和应变随疲劳次数变化的曲线。 S - N 曲线法是一种比较可靠的预测疲劳寿命的方法。然而,高分子材料结构复杂,影响其疲劳寿命的因素很多,如材料本身的粘弹性和分子运动能力,以及填料的粒径和结构等。

当高分子材料受循环载荷作用时,其内部的物理和化学结构常会发生变化^[20], S - N 曲线很难反映出其中的变化,而随载荷和应变而变化的内部结构演变规律则是研究者更关心的问题。因此,基于材料在形变过程中滞后的研究方法,即载荷梯度增加(SILT)^[21]和应变梯度增加(SIST)^[22-23]被广泛应用于弹性体材料的疲劳行为研究中。这2种方法不仅可以提供材料的结构变化参数,也可以便捷地反映出材料疲劳极限应变,为进一步进行长时间疲劳试验提供根据。El Fray M等^[21-23]采用SILT与SIST来考察多嵌段热塑性弹性体在载荷及应变作用下的动态疲劳行为,通过在载荷和应变作用下各种力学参数的变化,并结合材料的微观结构,比较材料的耐疲劳性能,进行材料结构的优化设计。研究无定形聚合物疲劳过程的难点在于微观结构的变化很难在特定参数上反映出来,这不同于结晶聚合物在疲劳过程中会发生晶片厚度或者结晶有序度的变化^[24]。但正电子湮没寿命谱(PALS)的应用为研究无定形聚合物微观结构的变化提供了可能。Shantarovich V P等^[25-27]最先采用PALS研究了无定形聚合物在物理老化过程中自由体积的变化。Liu L B^[24]采用同样的方法研究了聚碳酸酯(PC)在早期疲劳过程中自由体积孔洞大小及密度的变化规律,发现随着载荷循环次数增大,PC的自由体积孔洞增大,密度减小,这说明自由体积孔洞连通是产生裂纹的先兆。Erichsen J等^[28]发现在聚苯乙烯(PS)中裂纹产生前自由体积的变化规律与PC相似。

1.2 裂纹扩展法

裂纹扩展法是在断裂力学基础上发展起来的,该方法根据裂纹生长的能量释放速率和尺寸的变化来预测裂纹的生长。在试验过程中,常常采用预置

裂纹缺口的的方法,使裂纹沿着预定方向生长,将裂纹生长速率与撕裂能关联起来,以表征材料的耐疲劳性能。采用撕裂能对裂纹的生长过程进行分析,考察材料的耐疲劳性能,这是研究裂纹扩展的常用方法,但该方法仍然无法从试验现象上预测裂纹的扩展。近些年,一些专家学者^[29-31]用电子束与载荷作用相结合在材料表面预置裂纹,然后用扫描电镜(SEM)在原位载荷作用下直接观察裂纹内部及周围形貌和裂纹生长过程,这种方法可以较直观地获得裂纹扩展的微观演变机制。

2 影响橡胶疲劳寿命的因素

橡胶体系组成较为复杂,且使用时都需添加补强填料,因此橡胶的疲劳寿命在很大程度上依赖于基本化学组成、交联网络和填充剂的类型和用量等。

2.1 交联网络

橡胶的交联网络是影响其性能的关键因素之一^[1]。硫黄硫化的交联类型对橡胶的耐疲劳性能有很大影响,通过控制硫黄和促进剂的用量比可以获得既有较好耐疲劳性能,又有中等耐热氧老化性能的橡胶材料。

2.2 填料

填料改变了橡胶的局部形变、网络结构和粘弹行为,这些因素直接影响橡胶的裂纹增长和耐疲劳性能。炭黑是天然橡胶最重要的补强填料,炭黑粒径和结构决定了其与橡胶基体之间的作用力和结合力,对橡胶的耐疲劳性能影响很大。小粒径炭黑补强的胶料由于炭黑分散困难,存在一些潜在缺陷,但其裂纹增长速度较慢;大粒径炭黑补强的胶料潜在缺陷较少,但其裂纹的增长速度较快。另一方面,炭黑粒径越小,胶料的动态生热越高;炭黑粒径越大,胶料的动态生热越低,而生热对天然橡胶的老化速度影响很大。

2.3 应力-应变条件

橡胶的耐疲劳性能对应力-应变条件(如应力、应变幅值、振动频率、应变速率、应变波形)都非常敏感。研究表明^[32],最小应变与载荷比(R)对裂纹增长速率影响较大。 R 增大时,橡

胶的疲劳寿命延长,在 R 较大(如 $R=0.5$)的情况下,裂纹尖端的应变伸长和钝化效应会引起橡胶结晶,阻碍裂纹增长。

2.4 环境条件

环境条件(如温度和气氛等)对橡胶耐疲劳性能有影响。其中温度对橡胶耐疲劳寿命的影响主要体现在2个方面:一方面,橡胶在疲劳温升中发生了不可逆的化学变化(如热老化降解);另一方面,高温会影响橡胶的弹性模量和拉伸伸长率。气氛对橡胶疲劳裂纹增长的影响也比较显著,一般惰性气氛(如氮气)会使橡胶疲劳裂纹增长速率下降,而氧气和臭氧会使橡胶裂纹增长加速^[33]。

3 橡胶疲劳失效机理

要获得耐疲劳性能优异的橡胶,必须深入认识疲劳失效机理。目前,对橡胶疲劳失效机理的研究仍处于起步阶段,主要包括机械破坏理论、热疲劳理论和力化学理论3种^[34]。

3.1 机械破坏理论

机械破坏理论认为,橡胶疲劳不是化学反应过程,而是由施加到橡胶上的机械力使其结构与性能发生变化,而最终导致其疲劳失效。橡胶疲劳过程中发生的化学反应,只能看成影响橡胶疲劳性能的1个因素。该理论将橡胶疲劳分为3个阶段:第1阶段,承受载荷后应力和变形急剧下降阶段(应力软化现象);第2阶段,应力或变化的变化较缓慢,在表面或内部产生破裂核阶段;第3阶段,破裂核增大直到整体破坏阶段(破坏现象)。

3.2 热疲劳理论

热疲劳理论认为,橡胶制品在长期动态载荷作用下,内部分子链摩擦生热,导致其内部温度急剧升高,发生热氧老化,从而产生疲劳失效。

3.3 力化学理论

力化学理论认为,橡胶的疲劳过程是在力作用下的一个化学反应过程,主要是在力作用下的活化氧化过程。橡胶材料在疲劳过程中分子链被机械力打断,由此产生的自由基与氧气反应,引发氧化老化,导致分子链断裂,进而产生微裂纹,裂纹随时间延长逐步扩展。目前该理论得到较多研究者支

持,但是仍然存在一些不完善的地方,如难以圆满解释橡胶在真空或者惰性气体中的疲劳失效。

4 耐疲劳橡胶研究进展

在疲劳机理方面,对于天然橡胶裂纹成核的研究,更多专家学者希望能从微观的角度,采用较直接的方法获得裂纹成核的机理。例如,Saintier N等^[35]发现采用SEM与能量分散光谱(EDS)观察经过多轴拉伸疲劳后的天然橡胶,发现裂纹主要是由于体系中刚性粒子氧化锌与橡胶表面脱粘后形成空穴,裂纹周围存在氧化锌的聚集体。Le Cam J B等^[31]也发现天然橡胶疲劳后,裂纹周围存在氧化锌,证实了Saintier N等的结论。Kim J H等^[36]研究了不同粒径和结构的几种炭黑(炭黑N330, N650和N990)对天然橡胶疲劳行为的影响,发现胶料疲劳寿命从长到短、小尺寸断面粗糙度、滞后损失和临界 J 值(通过预割口的哑铃状试样进行拉伸试验计算得到)从大到小的顺序为:炭黑N330胶料、炭黑N990胶料、炭黑N650胶料;通过计算,发现疲劳寿命的对数值正比于临界 J 值与滞后损失乘积的平方根,在炭黑N650填充的天然橡胶中有较大的炭黑聚集体,导致其疲劳寿命相对较短。Dizon E S等^[37]研究表明,炭黑的粒径和结构是影响天然橡胶疲劳寿命的关键因素,疲劳寿命随着炭黑粒径增大而缩短,随着炭黑结构的提高而延长。Chung B等^[38]发现炭黑用量40份时丁苯橡胶和天然橡胶的撕裂能达到最大。Nie Y J等^[39]在比较炭黑N330与N770对天然橡胶裂纹增长速率的影响时发现,在相同撕裂能下,炭黑N330胶料的抗裂纹增长能力较强。通过对Paney效应和Mullins效应的研究发现,炭黑N330胶料的填料网络结构较完善且填料-橡胶作用较强,这些均能有效提高胶料物理性能。由于炭黑N330胶料中结合胶含量较大,橡胶在较小的应变下出现结晶,结晶能有效抵抗裂纹的增长。另外,Medalia A I等^[40-41]在研究汽车轮胎生热时发现,运动卡车轮胎的最高生热能达到130~150℃,其主要原因是橡胶分子的降解生热,也与大形变下炭黑形成的第二网络和橡胶基体界面的破坏有很大关系。

如前所述,交联网络对橡胶耐疲劳性能影响很大。Hamed G R等^[42-43]的研究均证明了在应力作用下,天然橡胶多硫键断裂后可以重新生成新化学交联键,异构化导致局部应力松弛,有利于提高抗疲劳性能。Shinyoung K等^[44]采用两步交联技术,首先在150℃下使天然橡胶部分交联,然后将胶料进行非单轴拉伸(伸长率0~650%),并在150℃下继续硫化完全,制备了双网络结构天然橡胶胶料。与普通天然橡胶胶料相比,双网络结构天然橡胶胶料在平行于拉伸方向的拉伸模量、拉伸强度和应变能密度显著增大,残余应变方向的抗裂纹生长性能也得到很大提高。

在材料制备方面,Ghosh A K等^[45]采用含长脂肪链的取代苯酚改性炭黑N330,用来增强天然橡胶,制得了耐屈挠疲劳性能较好和生热较低的胶料。但该胶料硬度较小,与未改性的炭黑相比需要填充更多的填料才能满足橡胶制品硬度的要求。Hanafi I等^[46]采用偶联剂Si69改性白炭黑,用其填充的天然橡胶物理性能(如拉伸强度、撕裂强度和耐疲劳性能等)均提高,这是由于偶联剂Si69改善了橡胶与填充剂之间的相互作用。木村巧^[47]采用满足一定条件的1种或多种炭黑复配制备天然橡胶胶料,该胶料生热小,耐疲劳性能好。Miyamoto Masaaki^[48]采用DBP吸收值为60~130 mL·(100 g)⁻¹与CTAB吸附比表面积为20~70 m²·g⁻¹的炭黑制备的天然橡胶胶料耐久性能优异。但2项研究均采用较大粒径的炭黑作为填料,对橡胶的补强效果较差,胶料硬度和拉伸强度较小。

5 结语

目前,对橡胶疲劳失效行为的研究方法主要基于应力-应变和疲劳循环试验方法,对橡胶疲劳寿命影响因素的研究集中在填充体系和硫化体系上,而对应变作用下网络结构、填料在橡胶中的分散等微观现象的研究不够,今后应加强这方面的研究,同时进一步探讨纳米填料对橡胶疲劳性能的影响。橡胶科研工作者应重视橡胶疲劳行为的研究,为橡胶疲劳行为的理论和实际性能相结合作出贡献。

参考文献:

- [1] 孙霞容, 栗付平, 蒋洪昱. 天然橡胶的疲劳特性研究进展[J]. 特种橡胶制品, 2007, 28(5): 53-56.
- [2] 张友南, 杨军, 陈忠海. 天然橡胶制品抗疲劳性能的因素简析[J]. 世界橡胶工业, 2002, 29(6): 35-39.
- [3] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 147-162.
- [4] 张安哥, 朱成九, 陈梦成. 疲劳、断裂与损伤[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006: 99-109.
- [5] 董月香, 高增梁. 疲劳寿命预测方法综述[J]. 大型铸锻件, 2006, 52(3): 39-41.
- [6] 伍颖. 断裂与疲劳[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2008: 129-141.
- [7] Wöhler A. Wöhler's Experiments on the Strength of Metals[J]. Engineering, 1867, 4: 160-161.
- [8] Cadwell S M, Merrill R A, Sloman C M, et al. Dynamic Fatigue Life of Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1940, 12(1): 19-23.
- [9] Fielding J H. Flex Life and Crystallization of Synthetic Rubber[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1943, 35(1): 259-261.
- [10] ASTM D 4482—1985. Standard Test Method for Rubber Property—Extension Cycling Fatigue[S].
- [11] Klenke D, Beste A. Ensurance of the Fatigue-life of Metal-Rubber Components[J]. Kautschuk und Gummi Kunststoffe, 1987, 40(11): 1067-1071.
- [12] Rivlin R S, Thomas A G. Rupture of Rubber I. Characteristic Energy for Tearing[J]. Journal of Polymer Science, 1953, 10(3): 291-318.
- [13] Greensmith H W, Thomas A G. Rupture of Rubber III. Determination of Tear Properties[J]. Journal of Polymer Science, 1955, 18(88): 189-200.
- [14] Thomas A G. Rupture of Rubber V. Cut Growth in Natural Rubber Vulcanizates[J]. Journal of Polymer Science, 1958, 31(123): 467-480.
- [15] Mullins L. Rupture of Rubber IX. Role of Hysteresis in the Tearing of Rubber[J]. Transactions of the Institution of the Rubber Industry, 1959, (35): 213-222.
- [16] Gent A N, Lindley P B, Thomas A G. Cut Growth

- and Fatigue of Rubbers I. The Relationship between Cut Growth and Fatigue[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1964, 8 (1) : 455-446.
- [17] Lake G J, Lindley P B. Cut Growth and Fatigue of Rubbers Part II: Experiments on a Noncrystallizing Rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1964, 8 (2) : 707-721.
- [18] Irwin G R. Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Journal of Applied Mechanics[J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME, 1957, 24 (3) : 361-364.
- [19] Rice J R. A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Stress Concentration by Notches and Cracks[J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME, 1968, 35 (2) : 379-386.
- [20] Argon A S. Topics in Fracture and Fatigue[M]. New York: Springer Publishing Company, 1992: 1-58.
- [21] El Fray M, Altstadt V. Fatigue Behaviour of Multiblock Thermoplastic Elastomers. I. Stepwise Increasing Load Testing of Poly(Aliphatic/Aromatic-ester) Copolymers[J]. Polymer, 2003, 44 (16) : 4635-4642.
- [22] Puskas J E., El Fray M, Tomkins M, et al. Dynamic Stress Relaxation of Thermoplastic Elastomeric Biomaterials[J]. Polymer, 2009, 50 (1-2) : 245-249.
- [23] Judit E P, Dos Santos L M, Fischer F, et al. Fatigue Testing of Implantable Specimens: Effect of Sample Size and Branching on the Dynamic Fatigue Properties of Polyisobutylene-based Biomaterials[J]. Polymer, 2009, 50 (1-2) : 591-597.
- [24] Liu L B, Gidley D, Yee A F. Effect of Cyclic Stress on Structural Changes in Polycarbonate as Probed by Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 1992, 30 (3) : 231-238.
- [25] Shantarovich V P, Goldanskii V I. Positron Annihilation in Free Volume Elements of Polymer Structures[J]. Macromolecules, 1998, 116 (1-4) : 67-81.
- [26] Hill A J, Katz I M, Jones P. Isothermal Volume Relaxation in Aged Polycarbonate Measured by Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy[J]. Polymer Engineer Science, 1990, 30 (13) : 762-768.
- [27] Hill A J, Hearter K J, Agrawal M. The Effects of Physical Aging in Polycarbonate[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 1990, 28 (3) : 387-405.
- [28] Erichsen J, Nagel C, Günther-Schade K, et al. Positron Annihilation Lifetime Measurements of Mechanically Fatigued Polystyrene Samples[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2008, 46 (18) : 1991-1995.
- [29] Tijssens M G A, Van Der Giessen E. A Possible Mechanism for Cross-tie Fibril Generation in Crazeing of Amorphous Polymers[J]. Polymer, 2002, 43 (3) : 831-838.
- [30] Adriaensens P, Storme L, Carleer R, et al. Visualization of Tensile Stress Induced Material Response at a Crack Tip in Polymers under Critical Load by NMR Imaging[J]. Macromolecules, 2000, 33 (13) : 4836-4841.
- [31] Le Cam J B, Huneau B, Verron E, et al. Mechanism of Fatigue Crack Growth in Carbon Black Filled Natural Rubber[J]. Macromolecules, 2004, 37 (13) : 5011-5017.
- [32] Persson B N J, Albohr O, Heinrich G, et al. Crack Propagation in Rubber-like Materials[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2005, 17 (44) : R1071-R1142.
- [33] 谢基龙. 环境对橡胶材料应变疲劳寿命的影响[J]. 橡胶工业, 1996, 43 (3) : 135-137.
- [34] 杨清芝, 宁英沛, 孟宪德. 现代橡胶工业学[M]. 北京: 中国石化出版社, 2003: 247-346.
- [35] Saintiera N, Cailletaud G, Piques R. Crack Initiation and Propagation under Multiaxial Fatigue in a Natural Rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28 (1) : 61-72.
- [36] Kim J H, Jeong H Y. A Study on the Material Properties and Fatigue Life of Natural Rubber with Different Carbon Blacks[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27

- (3) : 263-272.
- [37] Dizon E S, Hicks A E, Chirico V E. The Effect of Carbon Black Parameters on the Fatigue Life of Filled Rubber Compounds[J]. Rubber Chemical Technology, 1974, 47 (2) : 231-249.
- [38] Chung B, Funt J M, Ouyang G B. Effects of Carbon Black on Elastomer Ultimate Properties-IR Compounds[J]. Rubber World, 1991, 204 (2) : 46-49.
- [39] Nie Y J, Wang B Y, Huang G S, et al. Relationship between the Material Properties and Fatigue Crack-growth Characteristics of Natural Rubber Filled with Different Carbon Blacks[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 117 (6) : 3441-3447.
- [40] Medalia A I. Heat Generation in Elastomer Compounds: Causes and Effects[J]. Rubber Chemical Technology, 1991, 64 (3) : 481-492.
- [41] Dong M P, Won H H, Sang G K. Heat Generation of Filled Rubber Vulcanizates and Its Relationship with Vulcanizate Network Structures[J]. European Polymer Journal, 2000, 36 (11) : 2429-2436
- [42] Hamed G R, Rattanasom N. Effect of Crosslink Density on Cut Growth in Black-filled Natural Rubber Vulcanizates [J]. Rubber Chemistry and Technology, 2002, 75 (5) : 935-942.
- [43] Clarke S M, Elias F, Terentjev E M. Ageing of Natural Rubber under Stress[J]. The European Physical Journal E, 2000, 2 (4) : 335-341.
- [44] Shinyoung K, Changwoon N. Fatigue Crack Growth of Double-networked Natural Rubber[J]. Polymer, 1998, 39 (11) : 2209-2214.
- [45] Ghosh A K, Maiti S, Adhikari B, et al. Effect of Modified Carbon Black on the Properties of Natural Rubber Vulcanizate[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1997, 66 (4) : 683-693.
- [46] Hanafi I, Abdul Khalil H P S. The Effects of Partial Replacement of Oil Palm Wood Flour by Silica and Silane Coupling Agent on Properties of Natural Rubber Compounds[J]. Polymer Testing, 2001, 20 (1) : 33-41.
- [47] 木村巧. ゴム組成物およびそれを用いた空気入りタイヤ[P]. にほん: JP 2006-225560A, 2006-08-31.
- [48] Miyamoto Masaaki, Hyohzu, Shigetoshi. The Manufacturing Method of Carbon Monoxide, the Manufacturing Method of Phosgene, and a Carbonic Acid Diaryl Manufacturing Method[P]. Japan: JP 2008144023, 2006-06-26.

Research Progress of Rubber Fatigue Failure Behavior

Ouyang Sufang, Wang Lijing

(Yanshan Branch, Beijing Research Institute of Chemical Industry, Sinopec, Beijing 102500, China)

Abstract: In this paper, the research progress of rubber fatigue failure behavior was reviewed. Main research directions are crack nucleation and crack propagation. The factors affecting the rubber fatigue life such as the crosslinked network, filler, stress and strain conditions, and environmental conditions, were investigated. More recent attention was focused on the micro-structure including the crosslinked network and filler dispersion, particularly, the influence of nano-filler.

Keywords: rubber; fatigue failure; fatigue life; crack; crosslinked network; filler

欢迎加入全国橡胶工业信息中心会员组织