http://pmse.scu.edu.cn

变幅加载条件下温度对炭黑填充天然橡胶裂纹扩展特性的影响

李相欣[1], 刘金朋[2]

(1. 山东金宇轮胎有限公司, 山东 青岛 266111; 2. 青岛博锐减振科技有限公司开发部, 山东 青岛 266000)

摘要:为了研究温度对具有应变结晶效应的炭黑填充天然橡胶疲劳裂纹扩展特性的影响,采用单边缺口纯剪切平面拉伸试样,在 0~70 ℃范围内进行了临界撕裂能试验和撕裂能比 $R=0$ 和 $0<R<1$ 的变幅裂纹扩展试验,建立了温度与裂纹扩展参数之间的定量关系。结果表明,临界撕裂能随温度升高呈指数下降,在 0~30 ℃范围内从 82.41 kJ/m^2 降至 22.78 kJ/m^2,降幅显著,而在 30~70 ℃范围内下降减缓并趋于稳定。在 $R=0$ 和 $0<R<1$ 变幅加载条件下,裂纹扩展长度和裂纹扩展率均随温度升高呈指数增长,且 30~70 ℃范围的裂纹扩展明显大于 0~30 ℃范围的裂纹扩展,表明温度对裂纹扩展的加速效应在高温条件下更为显著。基于试验数据,建立了温度与临界撕裂能、裂纹扩展长度及裂纹扩展率之间的数学表达式,拟合相关系数均大于 0.98,可准确推演未测温度的裂纹扩展行为,为橡胶材料配方优化和抗疲劳设计提供了理论依据。

关键词:变幅;炭黑填充天然橡胶;裂纹扩展特性;温度

中图分类号:TQ332 **文献识别码**:A **文章编号**:1000-7555(2026)06-0106-09

橡胶材料具有高弹性、大变形等良好的力学性能[1],广泛应用于轮胎、橡胶衬套和密封圈等交变载荷场景。在使用过程中,橡胶产品不仅涉及橡胶的微观损伤累计,还涉及滞回生热。橡胶材料的滞回生热特性会导致产品温度升高[2],在疲劳过程中起主导作用[3-4],高温会加速橡胶材料的疲劳失效,降低橡胶产品的疲劳寿命。因此,研究温度对橡胶材料疲劳裂纹扩展特性的影响,对橡胶产品的结构设计和性能研究具有重要的指导意义。

国内外已有关于橡胶材料疲劳裂纹扩展特性的研究。Thomas[5]通过试验得到了裂纹尖端局部区域的能量释放率。Harbour 等[6-7]对应变结晶天然橡胶(NR)和非应变结晶丁苯橡胶(SBR)在恒幅和变幅载荷条件下的疲劳裂纹扩展特性进行了研究,发现 NR 在低应变范围内,小的正撕裂能比(最小撕裂能与最大撕裂能之比,R)可以阻碍裂纹的扩展,提高疲劳寿命,SBR 的裂纹扩展速率与 R 无关。Mars 等[8]研究了恒幅载荷和变幅载荷对填充 NR 疲劳裂纹扩展速率的影响,通过简单幂率方程的形式将变幅载荷 $0<R<1$ 条件下的裂纹扩展率等效为 $R=0$ 条件下的裂纹扩展率,为直观地表征变幅加载条件对应变结晶橡胶材料裂纹扩展行为的影响提供了有效途径。Greensmith 等[9]研究发现,当纯剪切平面拉伸试样的中心预制裂纹长度在 15 mm 以上,撕裂能与裂纹长度无关。Luo 等[10]研究了温度对炭黑填充橡胶疲劳寿命的影响,发现沙漏型橡胶柱的寿命随着使用温度的升高而降低。Shen 等[11]的研究表明,轮胎的使用寿命很大程度上取决于轮胎的使用温度,通过优化结构和配方,改善温度分布,可以有效提升轮胎的使用寿命。橡胶产品的使用温度会影响橡胶材料的性能,如黏弹性、裂纹扩展特性等。直接以橡胶产品为研究对象,研究其温度分布对相关特性的影响是一个非常复杂的过程。因此,本文从橡胶材料层面研究温度对疲劳裂纹扩展特性的影响。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0101
收稿日期: 2025-07-11
通讯联系人: 李相欣, 主要从事橡胶材料性能和有限元仿真研究, E-mail: lxx4843@163.com

目前,针对橡胶材料的疲劳裂纹扩展特性的研究,大多数集中在常温和撕裂能比 $R=0$ 的情况。未充分考虑具有应变结晶效应橡胶材料的温度相关性和撕裂能比 $0<R<1$ 时的疲劳裂纹扩展特性。本文基于单边缺口的纯剪试样,采用变幅值加载方法研究了温度对具有应变结晶特性的炭黑填充天然橡胶的疲劳裂纹扩展特性的影响,包括临界撕裂能、变幅值加载撕裂能比 $R=0$ 和 $0<R<1$。本文通过分析不同温度的疲劳裂纹扩展测试结果,建立了温度与临界撕裂能、撕裂能比 $R=0$ 和 $0<R<1$ 的裂纹扩展长度和裂纹扩展率的数学模型,为橡胶产品的配方优化和开发提供了数据支持。

1　实验部分

1.1　原料及设备

天然橡胶:越南同奈橡胶公司;炭黑(CB):卡博特(中国)投资有限公司;氧化锌(ZnO)、硬脂酸(SA)、抗氧化剂(RD)、抗臭氧剂(Antilux654)、加工助剂(Atflow L-18)、硫磺(S)、促进剂(CBS):市售。

开炼机:XK-150 型,广东湛江橡塑机械制造厂;密炼机:XSM-1/10-120 型,上海科创橡塑机械制备有限公司;平板硫化机:XLB-Q 型,湖州宏侨橡胶机械有限公司;硫化测试仪:MDR2000 型,美国阿尔法科技公司;电磁式动态力学试验机:CARE MK-3000 型,凯尔测控技术(天津)有限公司。

1.2　试样制备

采用 2 段混炼工艺进行试样的制备。首先,在密炼机中依次加入 100 phr 天然胶、65 phr 炭黑(N550)、5 phr ZnO、2 phr SA、1 phr RD、2 phr Antilux654 和 1 phr Atflow L-18,充分混合后取出。随后,在开炼机中,将一段混合得到的胶料与 1.8 phr 硫化剂和 1.5 phr 促进剂混炼,充分混合后取出。使用硫化测试仪得到混炼胶的硫化曲线,得到正硫化时间(T_{90})。橡胶在 150 ℃硫化 T_{90}+5 min,得到厚度约为 1 mm 的橡胶试片,本文使用的配方试样为同一批次。

1.3　测试与表征

利用电磁式动态力学试验机进行橡胶材料疲劳特性测试。本文采用宽高比为 15 的纯剪切平面拉伸试验进行撕裂能试验[12],试样示意图如 Fig.1 所示。

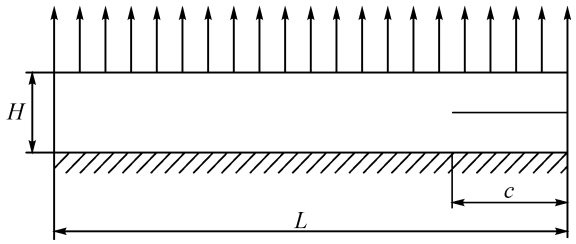


Fig. 1　Schematic diagram of pure shear specimen

图中 H 为试样有效夹持高度,c 为预制裂纹长度,L 为试样长度,分别为 10 mm,25 mm 和 150 mm。由于试样的制备过程和测量存在偏差,数据以实际测量为准。试验温度为 0 ℃,10 ℃,30 ℃,60 ℃和 70 ℃,在每个测试条件下,进行 3 次重复试验,取中位线作为最终分析曲线。

1.3.1　临界撕裂能测试:为保证撕裂能试验测试结果的有效性,拉伸速率足够缓慢,达到准静态拉伸状态。拉伸变形率约为 0.01 sec^{-1},试样厚度约为 1 mm,数据以实际测量为准。

1.3.2　$R=0$ 裂纹扩展测试:采用变幅值加载方式,加载频率为 5 Hz,应变谷值始终为 0,初始的最大应变峰值为有效加持高度的 15%,应变峰值呈线性逐渐增加到有效夹持高度的 60%。试验经历 680 个应变等级,由 15%增加至 60%,称为大应变循环。为了得到每个应变等级下稳定的裂纹扩展数据,在每个应变等级下进行 455 次循环,称为小应变循环。因此,共经历了 309400 次循环。

1.3.3　$0<R<1$ 裂纹扩展测试:为得到稳定的 $0<R<1$ 裂纹扩展试验数据,试验分 3 个阶段,采用变幅值加载方式,加载频率为 5 Hz。阶段一,$R=0$ 变幅疲劳裂纹扩展试验,应变从 0 逐步增大到有效加持高度的 60%,共经历 13650 次循环;阶段二,$R=0$ 等幅 0~60%试验,共经历 9100 次循环;阶段三,最大应变保持不变,最小应变逐步增大,直至 $R=0.35$。共经历 36400 次循环后实现 $0<R<1$ 裂纹扩展试验。

2　橡胶裂纹扩展理论

2.1　撕裂能理论

撕裂能的定义为裂纹每增加单位面积所需要的

能量。Rivlin 和 Thomas[5]首次将撕裂能用于表征橡胶材料疲劳失效参数。撕裂能表达式为

$$T=-\frac{\mathrm{d}(U-V)}{\mathrm{d}A} \tag{1}$$

式中:T——撕裂能;U——材料储存的总弹性应变能;V——外力做功;A——未变形裂纹的面积。撕裂能试验前后的总弹性应变能和面积表达式分别如式(2~5)所示

$$U_{\mathrm{before}}=WH(L-c)t \tag{2}$$

$$A_{\mathrm{before}}=ct \tag{3}$$

$$U_{\mathrm{after}}=WH(L-(c+dc))t \tag{4}$$

$$A_{\mathrm{after}}=(c+dc)t \tag{5}$$

式中:W——应变能密度;t——试样厚度。

试验在固定位移条件下进行,外力不做功,因此,通过式(1~5)可得撕裂能公式为

$$T=WH \tag{6}$$

应变能密度公式为

$$W=\int_0^{\varepsilon}\sigma\mathrm{d}\varepsilon \tag{7}$$

橡胶材料裂纹失稳扩展时对应的撕裂能称为临界撕裂能(T_c),是表征橡胶材料是否会产生裂纹扩展的重要指标。

2.2 裂纹扩展率理论

裂纹扩展率的定义为每个循环载荷下裂纹扩展的长度,是描述橡胶材料在疲劳载荷下抵抗裂纹扩展能力的重要物理量。本文所选橡胶材料为应变诱导结晶的填充天然橡胶。应变结晶橡胶的裂纹扩展率不仅与循环加载中经历的最大撕裂能有关,还与撕裂能比有关,该特性会影响材料的强度和疲劳特性[13]。

2.2.1 $R=0$ 裂纹扩展理论:基于断裂力学原理,对单边带缺口的纯剪切平面拉伸橡胶试样进行 $R=0$ 变幅疲劳扩展试验,通过控制橡胶材料内部裂纹扩展驱动力,跟踪裂纹扩展轨迹,获得橡胶裂纹扩展速率和撕裂能间的关系为[14]

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N}=A(T_{\max})^{\mathrm{F}} \tag{8}$$

也可以表示为[15]

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N}=r_c\left(\frac{T_{\max}}{T_c}\right)^{\mathrm{F}} \tag{9}$$

式中:N——循环次数;$T_{\max}$——周期循环中出现的最大撕裂能;T_c——临界撕裂能;r_c——临界裂纹扩展率;A 和 F——裂纹扩展特性参数。

2.2.2 $0<R<1$ 裂纹扩展理论:应变结晶橡胶在 $0<R<1$ 变幅载荷条件下,裂纹尖端处的结晶会阻碍裂纹的扩展。Mars 和 Fatemi[16]建立了裂纹扩展率与 R 之间的函数关系,当 $0<R<1$ 时,变幅值裂纹扩展仍然满足幂率关系:

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N}=r_c\left(\frac{T_{\max}}{T_c}\right)^{\mathrm{F(R)}} \tag{10}$$

指数函数 $F(R)$ 的表达式为

$$F(R)=F_0\exp(F_{\exp}R)+F_1R+F_2R^2+F_3R^3 \tag{11}$$

式中:$F(R)$——R 对裂纹扩展率的影响;F_0,F_1,F_2,F_3,$F_{\exp}$——材料参数。

由式(10)和(11)可知,简单的幂率方程无法涵盖不同撕裂能比的裂纹扩展率。Mars 等[10]通过将 $0<R<1$ 条件下的 $T_{\max}$ 等效为 $R=0$ 的撕裂能,得到具有多项式特征的等效撕裂能(T_{eq})的表达式

$$T_{\mathrm{eq}}=T_{\max}^{\frac{\mathrm{F(R)}}{\mathrm{F(0)}}}T_c^{\left(1-\frac{\mathrm{F(R)}}{\mathrm{F(0)}}\right)} \tag{12}$$

因此,当 $0<R<1$ 时,裂纹扩展率$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N}$与等效撕裂能满足简单的幂率方程

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N}=a(T_{\mathrm{eq}})^{\mathrm{k}} \tag{13}$$

3 结果与讨论

3.1 临界撕裂能分析

在试验条件下,测试得到的应力-应变曲线如 Fig.2 所示。依据式(6)和(7)得到撕裂能与应变的关系如 Fig.3 所示。5 个温度下撕裂时的力学参数如 Tab.1 所示。

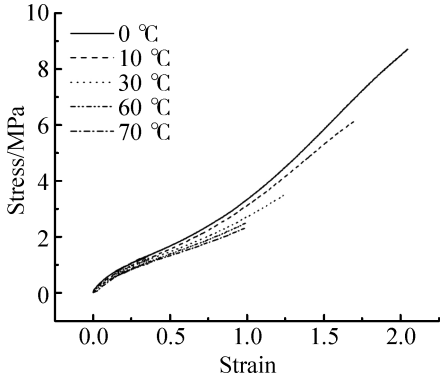


Fig. 2 Stress-strain curves at different temperatures

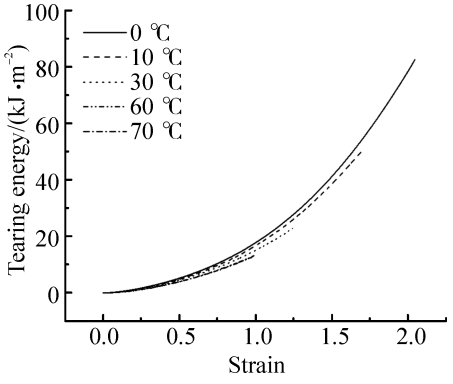


Fig. 3　Curve of tearing energy and strain at different temperatures

对 Tab.1 中温度与临界撕裂能进行分析发现,在测试范围内,随着温度的升高,临界撕裂能呈指数型下降,在 0~30 ℃范围内,临界撕裂能变化较大;在 30~70 ℃范围内,临界撕裂能逐渐趋于稳定,如 Fig.4 所示。临界撕裂能与温度的关系如式(14)所示,温度相关系数为 0.0599,拟合相关系数 $r^2=0.9998$,拟合曲线与实测数据吻合较好。

$$T_c=11.4913+71.0673\exp(-0.0599\theta) \quad (14)$$

式中:θ——温度。

Tab. 1　Mechanical parameters at different temperatures during tearing

Temperature /℃	Stress(σ_c) /MPa	Strain(ε_c)	Strain energy density(W) /MPa	Critical tearing energy(T_c) /(kJ·m^{-2})
0	8.6828	2.0511	7.9622	82.4084
10	6.1154	1.714	4.8769	50.9637
30	3.4823	1.2479	2.2113	22.7762
60	2.4888	1.0007	1.35454	13.3693
70	2.2858	0.9886	1.2504	12.8792

3.2　$R=0$ 裂纹扩展分析

撕裂能比 $R=0$ 是最常见的一种疲劳破坏工况。采用变幅值加载方式[13],在试验条件下,变幅值加载循环次数与裂纹长度、撕裂能峰值的关系,分别如 Fig.5 和 Fig.6 所示。

基于最小二乘法拟合裂纹长度与循环次数的幂函数关系,分别为

$$c_{0\,℃}=25.34973+9.18789\times10^{-15}N^{2.73051} \quad r^2=0.9957 \quad (15)$$

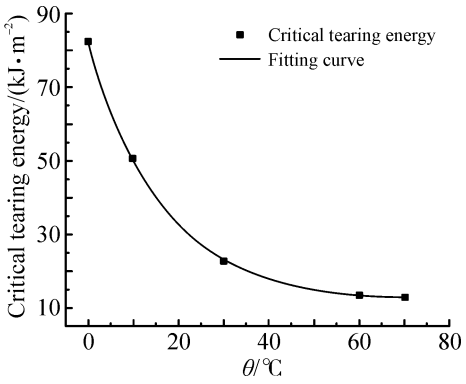


Fig. 4　Relationship between critical tearing energy and temperature

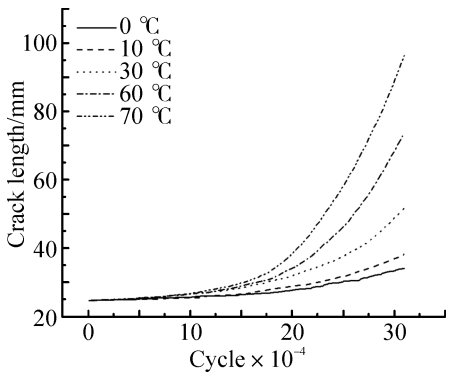


Fig. 5　Test curve of crack length and the number of cycles for $R=0$

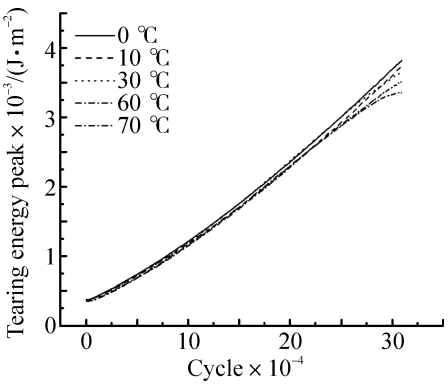


Fig. 6　Curve of the tearing energy peak and cycles at different temperature

$$c_{10\,℃}=25.22615+4.40114\times10^{-15}N^{2.81706}\quad r^2=0.9985 \tag{16}$$

$$c_{30\,℃}=25.75192+2.51872\times10^{-16}N^{3.09491}\quad r^2=0.9961 \tag{17}$$

$$c_{60\,℃}=25.76424+2.04512\times10^{-23}N^{4.4434}\quad r^2=0.9981 \tag{18}$$

$$c_{70\,℃}=25.49268+1.85799\times10^{-19}N^{3.74995}\quad r^2=0.9992 \tag{19}$$

由式(15~19)可知,拟合系数均超过 0.99,拟合精度满足要求。裂纹扩展长度 $\Delta c_{R=0}=c-c_0$,其中 c 和 c_0 分别为裂纹扩展实时长度和初始裂纹长度。不同温度条件下,$R=0$ 对应温度与裂纹扩展长度如 Tab.2 所示。

裂纹扩展长度与温度的关系如 Fig.7 所示。在测试温度范围内,随着温度的升高,裂纹扩展长度呈指数型增长,在 0~30 ℃范围内,裂纹扩展长度变化较小;在 30~70 ℃范围内,裂纹扩展长度变化较大,温度相关系数为 0.0261,二者间的函数表达如式(20)所示,拟合相关系数 $r^2=0.9922$,拟合曲线与实测数据吻合较好。

Tab. 2 Crack growth length at corresponding temperature for $R=0$

0 ℃	10 ℃	30 ℃	60 ℃	70 ℃
9.3138 mm	13.3825 mm	26.8630 mm	51.6671 mm	71.5692 mm

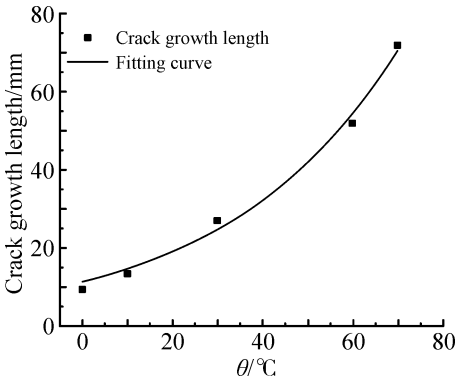


Fig. 7 Relationship between the crack growth length and temperature for $R=0$

$$\triangle c=11.3130\exp(0.0261\theta) \tag{20}$$

将式(15~19)分别对循环次数求导,联合 Fig.6 中不同温度的对应撕裂能峰值与循环次数的关系,得到不同温度下裂纹扩展率与撕裂能峰值之间的关系式,如式(21~25)和 Fig.8 所示。应变峰值达到最大时,裂纹扩展率与温度的关系如 Fig.9 所示。在测试范围内,随着温度的升高,裂纹扩展率呈指数型增加,在 0~30 ℃范围内,裂纹扩展率变化较小;在 30~70 ℃范围内,裂纹扩展率变化较大,温度相关系数为 0.0315,如式(26)所示,拟合相关系数 $r^2=0.9874$,拟合曲线与实测数据吻合较好。

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N_{0\,℃}}=8.2486\times10^{-3}\left(\frac{T_{\max}}{82408.4}\right)^{1.4836} \tag{21}$$

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N_{10\,℃}}=6.0868\times10^{-3}\left(\frac{T_{\max}}{50963.7}\right)^{1.5604} \tag{22}$$

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N_{30\,℃}}=8.8484\times10^{-3}\left(\frac{T_{\max}}{22776.2}\right)^{1.8608} \tag{23}$$

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N_{60\,℃}}=6.6275\times10^{-3}\left(\frac{T_{\max}}{13369.3}\right)^{3.5114} \tag{24}$$

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N_{70\,℃}}=5.1523\times10^{-3}\left(\frac{T_{\max}}{12879.2}\right)^{3.0339} \tag{25}$$

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N}=1.0068\times10^{-4}\exp(0.0315\theta) \tag{26}$$

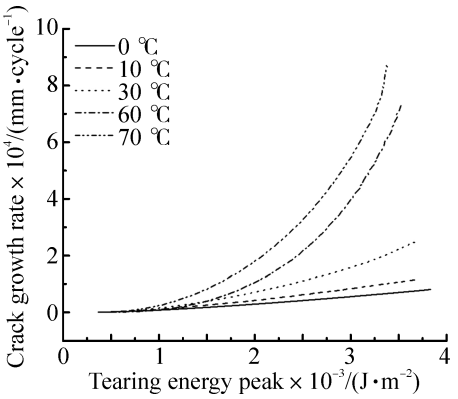


Fig. 8 Curve of crack growth rate and tearing energy peak at different temperature

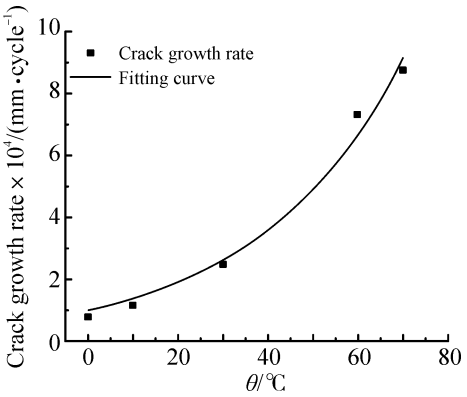


Fig. 9　Relationship between crack growth rate and temperature

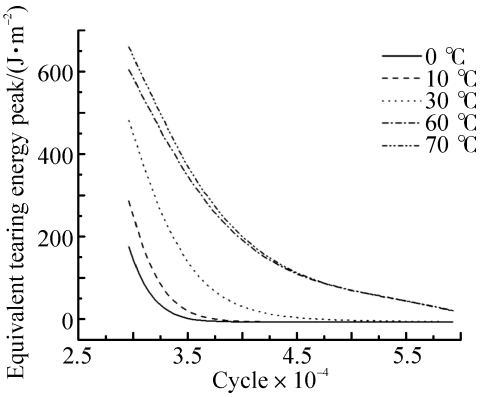


Fig. 12　Relationship between the peak equivalent tearing energy and cycles for 0<*R*<1

3.3　0<*R*<1 裂纹扩展分析

炭黑填充天然橡胶具有应变结晶特性,该特性会影响材料的强度和疲劳特性。在试验条件下,三阶段的裂纹长度与循环次数的关系如 Fig.10 所示。前 2 个阶段是为了得到稳定的 0<*R*<1 裂纹扩展试验,本文不做研究。第 3 阶段 0<*R*<1 裂纹长度、等效撕裂能峰值与循环次数的关系分别如 Fig.11 和 Fig.12 所示。

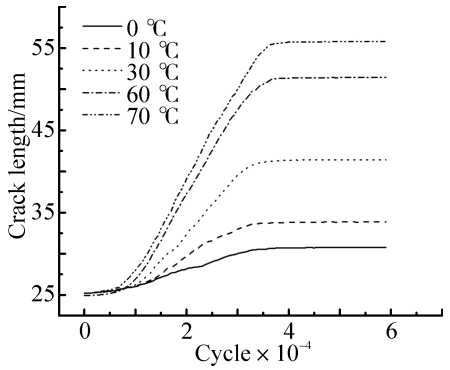


Fig. 10　Curve of three-stage crack length and cycles at different temperature

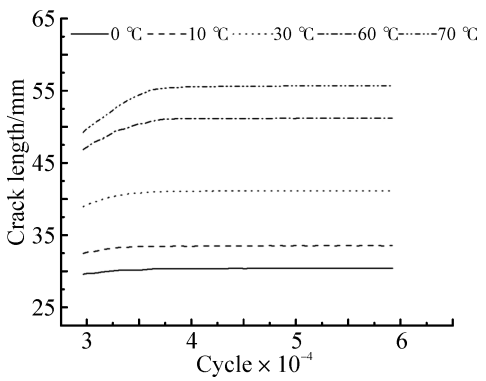


Fig. 11　Curve of third-stage crack length and cycles for 0<*R*<1

基于最小二乘法拟合第 3 阶段裂纹长度与循环次数的指数衰减函数关系,分别为

$$c_{0\,℃}=30.55876-2413.47499\exp\left(-\frac{N}{3723.48356}\right)\qquad r^2=0.9919 \tag{27}$$

$$c_{10\,℃}=33.65731-70092.15263\exp\left(-\frac{N}{2664.92675}\right)\qquad r^2=0.9841 \tag{28}$$

$$c_{30\,℃}=41.2205-124375.91609\exp\left(-\frac{N}{2709.69648}\right)\qquad r^2=0.9974 \tag{29}$$

$$c_{60\,℃}=51.26803-40795.7724\exp\left(-\frac{N}{3254.56405}\right)\qquad r^2=0.9897 \tag{30}$$

$$c_{70\,℃}=55.70324-46413.19034\exp\left(-\frac{N}{3360.69906}\right)\qquad r^2=0.9856 \tag{31}$$

由式(27~31)可知,拟合系数均超过 0.98,拟合精度满足要求。裂纹扩展长度 $\Delta c_{0<R<1}=c-c_0$,其中 c 和 c_0 分别为第 3 阶段裂纹扩展实时长度和初始裂纹长度。不同温度条件下,0<*R*<1 对应温度与裂纹扩展长度如 Tab.3 所示。

裂纹扩展长度与温度的关系如 Fig.13 所示。在测试温度范围内,随着温度的升高,0<*R*<1 变幅载荷下裂纹扩展长度呈指数型增长,在 0~30 ℃范围内,裂纹扩展长度变化较小;在 30~70 ℃范围内,裂纹扩展长度变化较大,温度相关系数为 0.0288,如式(32)所示,拟合相关系数 $r^2=0.9901$,拟合曲线与实测数据吻合较好。

Tab. 3 Crack growth length at corresponding temperature for 0<R<1

0 ℃	10 ℃	30 ℃	60 ℃	70 ℃
0.8311 mm	1.0756 mm	2.2000 mm	4.3023 mm	6.4046 mm

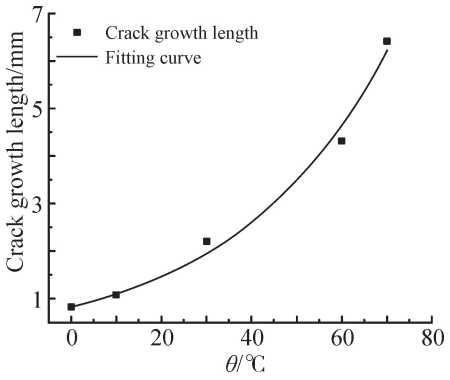


Fig. 13 Relationship between crack growth length and temperature for 0<R<1 at different temperature

$$\triangle c = 0.8297\exp(0.0288\theta) \tag{32}$$

为了得到0<R<1裂纹扩展率与等效撕裂能间的关系,分别对式(27~31)的循环次数求导,联合Fig.12中对应的等效撕裂能峰值与循环次数的关系,得到不同温度下裂纹扩展率与等效撕裂能间的关系,如式(33~37)和Fig.14所示。在0<R<1实验过程中,R值和裂纹扩展率的关系如Fig.15所示。试验结果表明,在测试范围内,随着R值增大,裂纹扩展率呈指数型降低。以最大裂纹扩展率为研究对象,最大裂纹扩展率与温度的关系如Fig.16所示。在测试范围内,随着温度的升高,最大裂纹扩展率呈指数型增加,在0~30 ℃范围内,裂纹扩展率变化较小;在30~70 ℃范围内,裂纹扩展率变化较大,温度相关系数为0.0267,如式(37)所示,相关系数r^2=0.9801,拟合曲线与实测数据吻合较好。

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N_{0\,℃}} = 1.9301\times10^{-5}(T_{eq})^{0.4701} \tag{33}$$

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N_{10\,℃}} = 2.8516\times10^{-6}(T_{eq})^{0.8632} \tag{34}$$

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N_{30\,℃}} = 2.4343\times10^{-8}(T_{eq})^{1.6825} \tag{35}$$

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N_{60\,℃}} = 3.8924\times10^{-12}(T_{eq})^{3.0516} \tag{36}$$

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N_{70\,℃}} = 2.2864\times10^{-11}(T_{eq})^{2.8164} \tag{37}$$

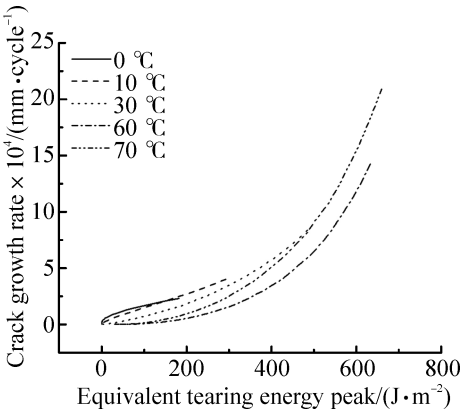


Fig. 14 Curve of crack growth rate and equivalent tearing energy at different temperature

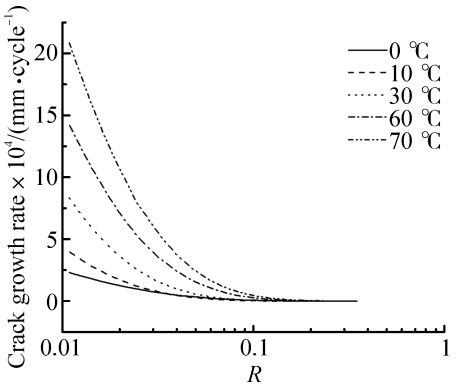


Fig. 15 Curve of crack growth rate and R ratio at different temperature

$$\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}N} = 3.1152\times10^{-4}\exp(0.0267\theta) \tag{38}$$

由此,针对具有应变结晶效应的炭黑填充天然橡胶建立了温度与临界撕裂能、R=0和0<R<1的裂纹扩展长度和裂纹扩展率的数学表达式。根据试验结果发现,橡胶的疲劳裂纹扩展特性与温度间存在强相关性。在一定的温度范围内,临界撕裂能随着温度的升高呈指数型下降,在0~30 ℃范围内,临界撕裂能变化较大;在30~70 ℃范围内,临界撕裂能逐渐趋于稳定;在撕裂能比R=0和0<R<1条件下,裂纹扩展长度和裂纹扩展率呈指数型上升,在0~30 ℃

范围内,裂纹扩展长度和裂纹扩展率变化较小;在30~70 ℃范围内,裂纹扩展长度和裂纹扩展率变化较大。当设计人员进行配方优化和产品开发时,可以根据数学表达式进行配方和产品优化。

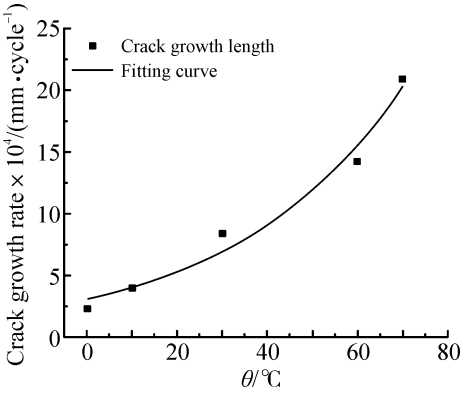


Fig. 16　Relationship between crack growth rate and temperature

4　结论

(1)在一定的温度范围内,炭黑填充天然橡胶的临界撕裂能随温度升高呈指数下降,在 0~30 ℃范围内降幅显著,从 82.41 kJ/m^2 降至 22.78 kJ/m^2,在30~70 ℃范围内下降减缓并趋于稳定,最低降至12.88 kJ/m^2。表明橡胶材料在高温环境中抵抗裂纹失稳扩展的能力显著降低,更易发生疲劳破坏。

(2)$R=0$ 和 $0<R<1$ 变幅值循环加载时,裂纹扩展长度和裂纹扩展率均随着温度的升高呈指数增长,且温度范围 30~70 ℃的裂纹扩展明显大于温度范围 0~30 ℃的裂纹扩展。表明温度对裂纹扩展的加速效应在高温更为显著。

(3)在同一温度的加载条件下,$0<R<1$ 的裂纹扩展率低于 $R=0$ 的裂纹扩展率,且随 R 值增大呈指数降低。表明对于具有应变结晶效应的炭黑填充天然橡胶,增加 R 值可有效抑制裂纹扩展,提高材料的抗疲劳性能。

(4)建立了温度与临界撕裂能、裂纹扩展长度及裂纹扩展率之间的数学表达式,拟合相关系数均大于 0.98,该表达式定量描述了温度对炭黑填充天然橡胶疲劳裂纹扩展特性的影响规律,可准确推演未测温度的裂纹扩展行为,为橡胶材料配方优化和产品抗疲劳设计提供了理论依据。

参考文献:

[1] 余本祎, 林浩晋, 许体文, 等. 炭黑颗粒分布模型的建立及其优化的天然橡胶复合材料性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39 (1): 97-105.
Yu B Y, Lin H J, Xu T W, *et al*. Establishment of carbon black particle distribution model and its optimized properties of natural rubber composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(1): 97-105.

[2] 石伟, 张凯林, 谭智学, 等. 变温环境对橡胶力学性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(11): 110-116.
Shi W, Zhang K L, Tan Z X, *et al*. Influence of variable temperature environment on mechanical properties of rubber[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37 (11): 110-116.

[3] He H, Liu J, Zhang Y, *et al*. Heat build-up and rolling resistance analysis of a solid tire: experimental observation and numerical simulation with thermo-mechanical coupling method[J]. Polymers, 2022, 14: 2210.

[4] Pan G, Chen M, Wang Y, *et al*. Hyper-pseudo-viscoelastic model and parameter identification for describing tensile recovery stress-strain responses of rubber components in TBR[J]. Polymers, 2022, 15: 76.

[5] Thomas A G. Rupture of rubber. II. The strain concentration at an incision[J]. Journal of Polymer Science, 1955, 18: 177-188.

[6] Harbour R J, Fatemi A, Mars W V. Fatigue crack growth of filled rubber under constant and variable amplitude loading conditions[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2007, 30: 640-652.

[7] Harbour R J, Fatemi A, Mars W V. Fatigue life analysis and predictions for NR and SBR under variable amplitude and multiaxial loading conditions[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30: 1231-1247.

[8] Mars W V. Computed dependence of rubber's fatigue behavior on strain crystallization[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2009, 82: 51-61.

[9] Greensmith H W, Thomas A G. Rupture of rubber. III. Determination of tear properties[J]. Journal of Polymer Science, 1955, 18: 189-200.

[10] Luo W, Huang Y, Yin B, *et al*. Fatigue life assessment of filled rubber by hysteresis induced self-heating temperature[J]. Polymers, 2020, 12: 846.

[11] Shen Z X, Wang Q, Li P, *et al*. Heat build-up and thermo-mechanical fatigue life optimization of aircraft tire using deformation index concept[J]. International Journal of Fatigue, 2025, 193: 108815.

[12] 李晓芳, 杨晓翔. 橡胶纯剪试样变形与断裂的有限元分析[J]. 机械工程学报, 2007, 46(6): 232-238.

Li X F, Yang X X. Finite element analysis of deformation and fracture of pure shear rubber specimen[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 46(6): 232-238.

[13] Li X X, Mu L H, *et al*. A method to accurately predict fatigue life of carbon black-filled natural rubber components incorporating self-heating temperature[J]. Macromolecular Theory Simulations, 2025, 34: e00067.

[14] Stoek R. Some revisions of fatigue crack growth characteristics of rubber[M]//Advances in polymer science. Springer, 2021, 286: 1-18.

[15] Wang Z Y, Zhou Y, *et al*. Fatigue life investigation of rubber bearing for heavy trucks: optimal design by using finite element method with experimental verification[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 180: 108080.

[16] Mars W V, Fatemi A. A phenomenological model for the effect of R ratio on fatigue of strain crystallizing rubbers[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2003, 76: 1241-1258.

Effect of Temperature on Crack Growth Characteristics of Carbon Black-Filled Nature Rubber Under Variable Temperature and Amplitude Loads

Xiangxin Li[1], Jinpeng Liu[2]

(*1. Jinyu Tire Group Co., Ltd., Qingdao 266111, China; 2. Development Department, Qingdao Borui Zhiyuan Anti-Vibration Technology Co., Ltd., Qingdao 266000, China*)

ABSTRACT: To investigate the temperature-dependent fatigue crack growth properties of carbon black-filled natural rubber with strain crystallization effect, single-edge notched pure shear plane tension specimens were utilized to conduct critical tearing energy tests and variable-amplitude crack growth experiments at $R=0$ and $0<R<1$, within the temperature range of 0 ~ 70 ℃. Quantitative correlations between temperature and crack growth parameters were established. The results indicate that the critical tearing energy decreases exponentially with increasing temperature, exhibiting a significant decline from 82.41 kJ/m^2 to 22.78 kJ/m^2 in the low-temperature region of 0 ~ 30 ℃, while the decreasing trend decelerates and stabilizes in the range of 30 ~ 70 ℃. Under variable amplitude loading conditions with both $R=0$ and $0<R<1$, the crack growth length and crack growth rate increase exponentially with temperature. Notably, the crack growth in the range of 30 ~ 70 ℃ is significantly larger than that in the range of 0 ~ 30 ℃, revealing that the accelerating effect of temperature on crack growth becomes more pronounced at elevated temperatures. Based on the experimental data, mathematical expressions correlating temperature with critical tearing energy, crack growth length, and crack growth rate were developed, all with fitting correlation coefficients exceeding 0.98. These expressions enable the accurate prediction of crack growth behavior at untested temperatures, providing a theoretical foundation for the formulation optimization and fatigue-resistant design of rubber materials.

Keywords: amplitude variation; carbon black-filled nature rubber; crack growth characteristic; temperature