http://pmse.scu.edu.cn

弹性体裂纹扩展表征方法的研究进展

郭小仟，黄 湘，吴河生，孙 鹏，雷巍巍，刘 杰
（湖北大学 材料科学与工程学院 功能材料绿色制备与应用教育部重点实验室 高分子材料湖北省重点实验室，湖北 武汉 430062）

摘要：如何预测和表征弹性体裂纹扩展是弹性体领域的重要问题。文中对弹性体裂纹扩展表征方法和抗裂纹能力提升策略进行了总结，对各裂纹扩展表征方法的适用材料进行了归纳，并探讨了断裂基本功的影响因素，对预制裂纹缺口的选择提供了方案。结合刚性材料的表征方法，进一步对弹性体裂纹研究提出展望，以期为后续弹性体研究提供借鉴。

关键词：弹性体；裂纹扩展；断裂基本功
中图分类号：TQ334 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-7555（2025）07-0172-09

弹性体材料已经成为柔性电子产品、生物医疗、轮胎等领域的重要角色，该材料使用寿命的预测和表征逐渐成为研究热点。本文从刚性材料的裂纹扩展测试方法引入，对弹性体裂纹扩展表征方法进行了总结，并对测试方法进行了材料适用性分类，同时讨论了断裂基本功的影响因素，得出一些结论和思考。此外，本文将塑料与弹性体裂纹扩展方式相关联，为研究弹性体材料的裂纹扩展提供了启发。

1 裂纹扩展理论方法介绍

1.1 断裂基本功

断裂基本功(Essential work of fracture, EWF)指裂纹尖端从开始加载到开始扩展所需要的能量，它是表征材料韧性和抗裂纹扩展能力的参数[1]。断裂基本功由Broberg首先提出，他将断裂区域(Fig.1(a))分为内部断裂过程区和外部塑性变形区[2, 3]。图中，G——载荷；d——内部断裂过程区的范围；D——塑形变形区范围；c——预制裂纹长度。

其中，试样从承受载荷开始至断裂所做的功称为断裂总功(W_f)，可通过力-位移曲线的积分面积进行计算(Fig.1(b))。按Fig.1(a)将W_f分为断裂基本功(W_e)和塑性变形功(W_p)，二者单位均为J。W_e与Bl成

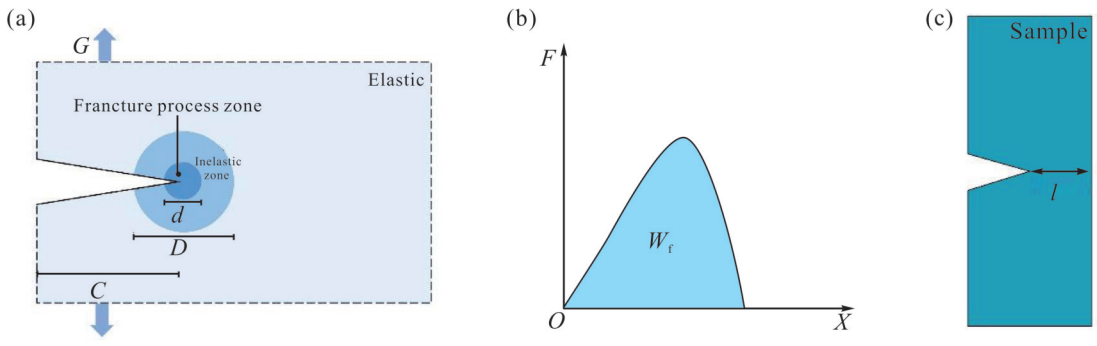


Fig. 1 (a) Schematic of crack extension zone; (b) schematic of fracture work calculation; (c) schematic of ligament structures[2]

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0127
收稿日期：2024-07-08
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52003077）；广东省高性能与功能高分子材料重点实验室开放基金（20240002）
通讯联系人：刘杰，主要从事高分子材料研究，E-mail: liujie@hubu.edu.cn

正比,W_p与βBl^2成正比,由此可得

$$W_f = W_e + W_p = Blw_e + \beta Bl^2 w_p \quad (1)$$

$$w_f = W_f/Bl = w_e + \beta l\, w_p \quad (2)$$

式中:B——试样厚度,mm;l——韧带长度(Fig.1(c)),mm;β——形状因子,量纲为1;w_f,w_e和w_p——分别为比断裂总功、比断裂基本功和比塑性变形功,其单位均为J/m^2[4~6]。

断裂总功还可根据韧带的屈服程度(Fig.2)进行分类,将韧带的完全屈服作为区分点,分为韧带未完全屈服部分(W_y)与韧带完全屈服至断裂部分(W_{nt})2个区域[1]。

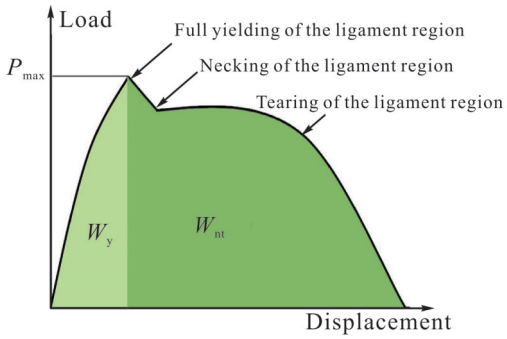


Fig. 2 Schematic of fracture work partitioning[1]

因此断裂总功还可表示为

$$W_f = W_y + W_{nt} \quad (3)$$

式(3)可以拆分为

$$W_y = W_{ey} + W_{py} = Blw_{ey} + \beta Bl^2 w_{py} \quad (4)$$

$$W_{nt} = W_{ent} + W_{pnt} = Blw_{ent} + \beta Bl^2 w_{pnt} \quad (5)$$

联立式(2)、式(4)和式(5),可得

$$w_e = w_{ey} + w_{ent} \quad (6)$$

$$w_p = w_{py} + w_{pnt} \quad (7)$$

式中:脚标y——样品开始拉伸到韧带完全屈服部分;脚标nt——样品韧带屈服直到断裂部分;w——相应的比断裂功,J/m^2。

EWF是断裂力学领域下的一个分支,最初用于表征金属等刚性物质在拉伸条件下的韧性。Sarkar等以汽车双相钢板为研究对象,利用断裂基本功来测试其抗撕裂性能,证明EWF适用于具有加工缺口试样韧性撕裂的测定[6];Bensaada利用EWF对不同厚度的不锈钢AISI 304L薄板的韧性断裂展开研究,发现不同厚度薄板的EWF相近,表明EWF是薄板材料的一种本征属性[7]。

随着材料的多元化,EWF不断发展,该方法被应用于准静高聚物韧性表征领域[5]。米耀荣等对改性聚对苯二甲酸丁二醇酯/聚碳酸酯共混物和酸酐增容聚丙烯/弹性体共混物进行冲击试验,并采用EWF表征材料的断裂韧性,该实验证明EWF能作为冲击试验中断裂韧性的表征手段[8, 9]。之后,EWF被推广至动态高速条件下的高聚物韧性测试领域。Martinez等[10]对EWF用于分析聚合物断裂韧性的工作进行归纳,通过对断裂功的概念和变形量的测定进行总结,得出了断裂功是分析聚合物断裂韧性的重要手段。Mehrabi等[11]利用EWF方法对改性后的丙烯腈-丁二烯-苯乙烯树脂共混体系进行断裂韧性评估,得出EWF适用于共混体系断裂韧性的测定。Karger-Kocsis等[12]针对EWF在聚合物领域的应用做了详细归纳,通过介绍EWF的发展、测试标准及测试类型,得出EWF适用于静态加载和动态加载实验。

1.2　线弹性力学

线弹性力学(Linear elastic fracture mechanics, LEFM)是利用能量释放率、应力强度因子等参量来研究裂纹扩展的一种方法,它在断裂力学领域有着举足轻重的地位。1921年Griffith提出格里菲斯准则(或能量释放率准则),该准则被作为材料脆性断裂的判据。它从能量平衡的角度出发,提出断裂产生新表面能所需要的能量由材料内部弹性存储能量来提供。当裂纹扩展所释放的变形能等于或者大于裂纹扩展所需能量时,裂纹将失稳扩展。其中,裂纹能量释放率是指裂纹由某一端点向前扩展单位长度、单位厚度所释放出来的能量,用G表示。这为线弹性力学奠定了部分基础[13]。

格里菲斯准则依据能量守恒原理,以G为标准对裂纹是否扩展进行判断。当$G \geq 2\gamma_s$时发生断裂,反之则不发生断裂[13]。其中,γ_s指的是表面自由能,G与γ_s的单位为J/m^2。能量守恒原理指出,裂纹发生扩展的必要条件是裂纹尖端区释放的能量等于形成裂纹面积所需的能量,故有

$$G = 2\gamma_s \quad (8)$$

因此,当G未达到$2\gamma_s$时,新界面无法产生,裂纹无法扩展;当G达到或超过$2\gamma_s$,能够产生新界面,裂纹开始扩展。利用这一规律,可以通过G的突变情况来表征裂纹扩展情况。

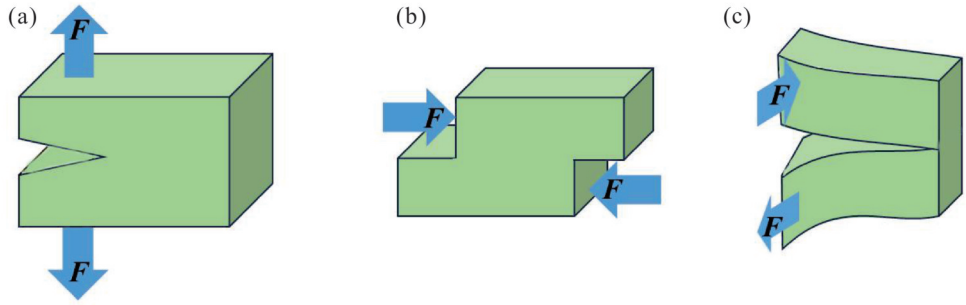


Fig. 3 (a) Open crack schematic; (b) slip crack schematic; (c) tear crack schematic

由于G需要计算新增的表面能，计算量大，因此，Irwin于1957年提出强度因子的概念。应力强度因子是反映裂纹尖端弹性应力场强弱的物理量，用K表示。裂纹尖端应力场的应力分量均与K线性相关，因此，K可以代表弹性体的裂纹尖端特性。弹性体裂纹尖端可依据力学特性分为I型裂纹、II型裂纹和III型裂纹(Fig.3)。I型裂纹，又叫张开型裂纹，是受正交于裂纹所在面的力而产生的裂纹扩展，在多数弹性体的力学性能测试中，以该形式的裂纹扩展测试较为常见；II型裂纹，又叫滑移型裂纹，其运动表现形式类似于刃位错运动，它是由裂纹所在平面内与裂纹尖端垂直的剪切应力引发的裂纹扩展运动；III型裂纹，又名撕开型裂纹，因类似裤腿，这类实验又叫裤状撕裂实验，其裂纹扩展方式类似螺位错运动形式，这种实验方式在以龚剑萍团队为代表的水凝胶力学性能测试领域广泛应用[14]。Irwin[15]对应力强度因子进行修正，使其适用不同裂纹类型。应力强度因子也成为线弹性断裂力学领域的重要判据。

根据不同的裂纹类型，杨立云等[16]归纳出了5种常用的断裂准则。这5种准则分别是：(1)应力强度因子准则：当I型K超过材料的的断裂韧度K_{Ic}时裂纹开始扩展，该准则主要适用于I型裂纹的脆性材料[17]；(2)最大拉应力准则：Erdogan团队根据纯II型裂纹的实验而得出的一种判断准则，主要适用于脆性材料[18]；(3)最大拉应变准则：基于最大拉应力准则，加入泊松比和裂纹尖端径向应力的判断准则[19]；(4)最小应变能密度因子准则：它是基于应变能密度场的断裂概念，通过计算裂纹尖端附近的局部应变能密度来判断裂纹失稳开裂的依据；(5)最大能量释放率准则：它指最大能量释放率所在的方向为裂纹扩展方向，G达到临界值时裂纹开始扩展。

1.3 J积分法

J积分是指均质薄板有一穿透裂纹，受二向应力作用，围绕裂纹尖端的回路积分，也是应变能和断裂截面积相关的函数，如Fig.4所示。针对裂纹在厚度均匀的材料中扩展的情况，可以将J积分定义为[20]

$$J=\int_L\left(W\mathrm{d}x_2-t_i\frac{\partial u_i}{\partial x_1}\mathrm{d}_s\right)\quad i=1,2 \tag{9}$$

式中：L——路径，逆时旋转，始于下表面终于上表面；W——应变能密度，J/m^3；t_i——路径的力$\boldsymbol{t}$的分量，N，i的取值分别代表分量方向x_1与x_2；s——围绕路径的长度，mm；u——位移向量。图中，r——积分半径；$\boldsymbol{n}$——微元$\boldsymbol{ds}$的外法线。J积分的单位为J/m^2。

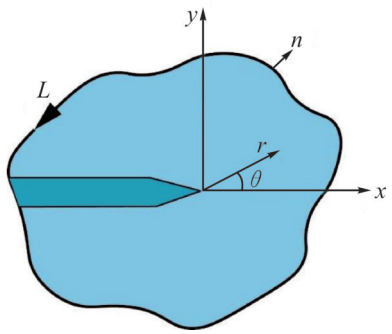


Fig. 4 Schematic diagram of the *J*-integral method[20]

J积分最初应用于脆性材料裂纹扩展和缺口计算[20]。Garcia-Suarez等[21]通过J积分评估地震引起的挡土墙压力问题，得到地球推力的上界，证明J积分可应用于岩土工程领域；Fleck等[22]对开孔泡沫铝合金初始裂纹扩展的J积分试验方法进行了评价，得出J积分仅在断裂过程区远小于裂纹尖端周围的塑性区时有效；Meneghetti等[23]利用红外热成像技术和J积分对裂纹扩展进行分析，这使裂纹扩展的能量分布具体化，可量化。随着研究的深入，不少学者利用J积分与路径无关的特点，将J积分的应用扩展至弹

性体裂纹扩展研究领域[24-26]。

J积分使用只允许加载不允许卸载,且不允许裂纹发生临界扩展,因此,J积分只能用于裂纹启动的判断,不能作为裂纹扩展的判据。进一步,J积分的判据只能在解决平面问题时使用,并且难以对冲击韧性和薄膜类材料进行测定[27]。

1.4　近场动力学

近场动力学模型(Peridynamic,PD)是Silling发展壮大的一种有别于传统的连续、有限元介质模型的裂纹扩展模拟及预测的方法。PD通过求解空间积分方程,解决了传统连续介质模型预测裂纹扩展方面的难题。进一步,PD子动力学理论与局部连续力学建立了联系,使其成为一种非局部思想[28]。

近场动力学是指物体所处空间区域R内,某时刻t,域内某质点$\boldsymbol{x}$与周围空间一定范围δ内的任意其他质点$\boldsymbol{x}'$之间存在的相互作用力$\boldsymbol{f}$,单位为N[29]。

$$||x'-x||\leqslant\delta \tag{10}$$

$$\boldsymbol{f}=\boldsymbol{f}((\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}'),\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x},t),\boldsymbol{u}'(\boldsymbol{x}',t),t) \tag{11}$$

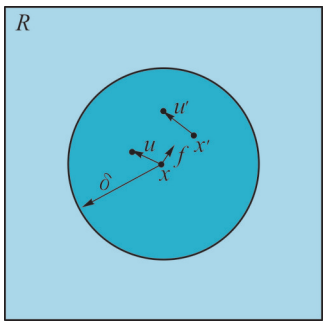


Fig. 5　Schematic of inter-object forces[29]

该理论已经在脆性材料断裂领域[30-33]、材料失效领域[34]、材料裂纹路径的研究[35]、预测疲劳断裂领域[36]、裂纹扩展研究[37]以及循环加载的损伤和增长领域加以应用[38]。Bobaru等[39]以钠钙玻璃和杜兰50玻璃为研究对象,利用PD对裂纹的动态扩展进行了预测和评估,证明近场动力学是模拟动态裂纹扩展的可靠手段;钱松荣等[40]利用周向本构分析方法对低合金钢AISI 4340的氢脆断动态过程进行模拟,使氢原子扩散情况和裂纹扩展全过程可视化。而对于弹性体裂纹扩展领域,刘轶军团队通过PD的方法,对弹性体的疲劳裂纹扩展进行了深入研究,首先提出了一种基于边界元法和键基周波理论耦合的动态裂纹扩展预测新方法,并对几种典型裂纹进行模拟预测,得出该方法在裂纹扩展的预测方面十分有效[30];同时还通过边界元法和周向动力学相结合的多尺度方法对二维弹性体材料的裂纹扩展问题进行了模拟研究,证明该方法具有高精度和高效率[31];近来,还对水凝胶的疲劳断裂进行了模拟并且利用实验加以验证,得到了基于应变能的疲劳准则[41]。不难看出,近场动力学在弹性体裂纹扩展领域的应用有极大潜力。因此,近场动力学理论在裂纹尖端场和裂纹扩展的探索方面具有广阔的研究前景。

综上所述,LEFM广泛应用于硬且脆的领域,例如金属、合金及脆性高分子材料,但在弹性体领域线性弹性力学有所局限;J积分虽在弹性体和刚脆性材料领域均有使用,但其缺点是具有较为复杂的计算过程;PD则将连续介质模型与不连续介质模型进行联系,从微观角度进一步对裂纹扩展进行预测,但繁杂的计算和深奥的理论是其一大缺点;断裂功作为刚性材料和弹性体材料均使用的一种方法,相较于J积分和PD来说,没有繁杂的计算,可通过单轴拉伸进行图形化显现。综上得出适用不同材料裂纹扩展的研究方法:刚性脆性材首选LEFM和EWF,弹性首选EWF,微观层面和裂纹预测选择PD。

2　裂纹表征的影响因素

2.1　开口方式的影响

实验测试常用的3种方式分别是单边缺口、双边缺口和中心缺口。米耀荣等以不同类型的聚乙烯和聚酰胺材料作为断裂行为的研究对象,通过对3种不同裂纹开口类型试样的EWF比较,得出开口方式对EWF的实验结果没有影响[42]。

然而,Hashemiz[43]在变温条件下,研究了单边开口与双边开口下w_e和w_p的差别,得出两者w_p差别较小,w_e差别较大,且双边开口得出的w_e随温度变化较为平缓。因此,双边开口是在变温条件下以断裂基本功来表征材料力学性能和计算W_p的最佳开口方式。进一步,针对弹性体而言,由于弹性体的玻璃化转变温度(T_g)高于室温,故双边开口预制裂纹的方式更加适用于弹性体裂纹扩展的研究。因此,无论选哪种缺口,对断裂基本功的结果影响不大,而对于变

温情况下断裂功的测试、弹性体裂纹扩展表征及W_p计算，双边开口的结果更为可靠。

2.2 试验温度的影响

温度是影响断裂基本功的重要因素，因此，有文献针对温度这一影响因素展开了讨论。Daniele[44]以乙烯-氟乙烯薄膜为研究对象，研究了温度对断裂基本功的影响，得出在较高温度下，比断裂基本功由于应变脆化效应而降低，而在室温比断裂基本功随应变速率的增加而增加。Hashemi等[43, 45]以温度对断裂总功的影响为研究内容，得出温度对断裂基本功无明显影响，而对塑性变形功具有较大影响，这与Daniele的研究结果相符合。同时也证明，在变温条件下，断裂基本功更适合作为判定材料力学性能的准则。

综上所述，温度对断裂功存在一定的影响，尤其对塑性变形功影响较大。因此，可将塑性变形功作为切入点，对塑料与弹性体力学性能之间的差异进行研究，从而对弹性体材料在抗撕裂、抗疲劳及使用寿命方面提供新的理论指导和改善方法。

3 测试与表征

3.1 缺陷不敏感率的测试

对于裂纹扩展的表征，一般情况会引入缺陷不敏感率(Flaw insensitivity rate, R_{insen})，以缺陷不敏感率的值来反映裂纹扩展情况[46]。缺陷不敏感率利用断裂内聚长度(l_f)和试样宽度(w_s)的比来表示，其中，w_s的单位为mm，R_{insen}公式如式(12)

$$R_{insen}=l_f/w_s \tag{12}$$

式中：断裂内聚长度(l_f)与断裂能(A)和断裂韧性(R)相关，可以表示为

$$l_f=A/R \tag{13}$$

需要强调的是，断裂内聚长度中的韧性由理想情况的断裂能，即无缺陷或缺陷可忽略的情况下测得。A是具有缺陷情况下断裂所需的能量，即带有缺口试样的应力-应变曲线积分面积。A单位为J/m^2，R单位为J/m^3，l_f与R_{insen}单位为m。

不难看出，缺陷不敏感率与断裂功有着密不可分的联系，因此，利用断裂基本功可以对裂纹的扩展进行数字化表征。夏新年等[46]在文章中提到常见材料的缺陷不敏感率在0.5左右，同时该课题组研究出了缺陷不敏感率高达1.075的聚丁二烯弹性体，体现出该材料卓越的力学性能。严锋等[47]利用刚性聚碳酸酯抵抗裂纹尖端应力集中来提升水凝胶的缺陷不敏感率，其以缺陷不敏感率作为选材依据，选取缺陷不敏感率较高的聚碳酸酯作为硬相去延缓裂纹扩展。可以看出，缺陷不敏感率成为衡量裂纹扩展的一种方法。

3.2 应力-应变曲线的测试

多数裂纹扩展表征是预制裂纹试样的应力-应变曲线来反应裂纹扩展的情况[48]。严锋等[49]以半硬介孔空心碳球改性的水凝胶为样品，预制了不同形状的裂纹，通过对比应力-应变曲线和力学强度，得出半硬介孔空心碳球有助于提升材料的抗裂纹扩展能力。关英团队[50]引入单边缺口进行拉伸试验，通过计算每种样品应力-应变曲线的面积对不同含量样品阻止裂纹扩展的能力进行了表征。以龚剑萍为代表的研究团队[51, 52]对水凝胶断裂性能展开了研究，采用单轴拉伸和循环拉伸的方法来表征水凝胶的主要断裂方式。该团队进一步采用双折射表征方式对材料裂纹尖端进行了图像化表征，通过观测裂纹尖端周围的光学延迟图像，识别样品各向异性方向上的颈缩区，据此判断裂纹的扩展情况，为裂纹扩展的预测提供了新思路[51,52]。锁志刚团队[53, 54]采用单轴拉伸和循环测试的手段测试了样品的应力-应变曲线和循环曲线，通过对比应变情况和多次循环后的应力应变情况来反映材料阻止裂纹扩展的情况。由以上实验案例可以得出，应力-应变曲线是表征裂纹扩展情况的重要方法。

3.3 其他表征方法

除前文提到的方法外，龚剑萍等采用预荧光探针对水凝胶的力学损伤进行了可视化分析[14]。锁志刚等[53]利用Digital Image Correlation (DIC)手段对水凝胶材料的裂纹尖端进行了具象化表征，这直接验证了DIC在弹性体领域应用的可能性。此外，许多学者通过计算机对裂纹的扩展情况进行数值分析和有限元模拟，得出裂纹扩展可能的结果[48]，进一步利用空间和时间分辨多层扩散波谱和机械体分子损伤图，辅以有限元模拟分析了裂纹扩展情况[55]。

总之，弹性体裂纹扩展的表征以应力应变为主流，通过预制裂纹后的应变情况来反映材料裂纹扩

展情况。其次,裂纹扩展预测以模拟为主,多数是有限元模拟,辅以数值分析。而DIC是将裂纹扩展情况以图片的形式展现,使裂纹扩展过程可视化。但在本文调研范围内,DIC多应用于刚性材料,弹性体领域的应用相对较少,这或许是后期研究弹性体裂纹扩展的重要方向。

4　提升弹性体抗裂纹扩展能力的方法

弹性体领域提升弹性体抗裂纹扩展能力的方法多通过添加填料、构建动态共价键体系和构筑动态非共价键网络来解决[46,56]。弹性体传统抵抗裂纹扩展采用添加填料来实现。吴友平以天然乳胶凝结干燥得到的弹性体为研究对象,通过添加不同尺寸的碳基填料(球形炭黑、碳纳米管和平面氧化石墨烯),探究了填料尺寸对橡胶抗断裂和抗疲劳性能的影响,得出不同尺寸填料对材料力学强度增强作用与含量有关,并且填料的加入有助于提高材料的抗断裂性能[57]。付坤等[58]研究了不同粒径和份数的白炭黑对天然橡胶裂纹扩展的影响,得出适当的添加份数和填料尺寸能够提高材料的抗裂纹扩展能力。因此,利用填料来提升材料抗裂纹扩展能力是一种有效的方案。

动态共价键体系相较于传统交联网络具有可逆可恢复的优势,因此,也广泛应用于材料的增强增韧。章明秋团队[59]对聚氨酯进行改性,合成了聚氨酯-二硫代氨基甲酸酯材料,通过自由基在二硫代氨基甲酸酯基元之间的交换和传递对裂纹进行修复,从而达到阻止裂纹扩展的目的。董光超等[60]通过乙二胺等胺类小分子构筑了动态可修复聚氨酯弹性体,以亚胺键作为研究点,利用其动态可逆的特性,使合成的聚合物具有可回收和自修复的特性,也进一步阻止了裂纹扩展。不难看出,动态共价键对于提高材料抗裂纹扩展性能有着显著的效果。

动态非共价键体系由于其键合较弱,容易断裂,并且具有可逆性的特点,成为提高材料抗裂纹扩展性能的首选方案。夏新年等以聚丁二烯弹性体为研究对象,通过构建氢键网络与缠结机制协同作用的方式提升了聚丁二烯抗裂纹扩展的特性[46]。刘凯团队对聚氨酯材料进行改性和结构设计,利用芳香族电荷转移的相互作用和结构折叠的设计,实现了聚氨酯抗穿刺能力的提升[56]。可以得出,动态非共价体系在增强材料韧性,提升抗裂纹扩展能力方面有着巨大的应用前景。综上所述,填料、动态共价键体系和动态非共价键体系均可以提高材料力学强度,提升材料抗裂纹扩展的能力。

5　结语与展望

本文将几种裂纹计算方法进行了归纳总结,进一步得出了这些计算方法的适用范围:LEFM使用的限性较大,主要应用在脆性材料领域;*J*积分在弹性体和脆性材料领域均有应用,但是其计算繁杂,约束条件较多,只适用简单加载和未达到临界扩展的裂纹计算;EWF适用于脆性材料和弹性体领域,并且计算和测试方式简单,这使其成为表征裂纹扩展情况的首选方法;PD方法由于其通过分子入手,更加适用于材料裂纹扩展的预测和微观层面的表征。

针对EWF中裂纹开口方式的选择,在弹性体领域或者测试温度接近材料玻璃化转变温度的实验条件下,双边开口的预制裂纹是表征裂纹扩展情况首选;恒定温度下脆性材料裂纹扩展的研究则适用单边开口的方法。

裂纹扩展在弹性体领域是一个较为重要的课题,也是未来弹性体性能提升需要面临的巨大挑战。由于DIC可以将裂纹扩展具象化、动态化、可视化。因此,可以通过DIC与红外热成像,双折射等仪器联用,寻求一种可视化程度高的裂纹扩展表征手段。同时,后续研究可以结合模拟技术和数值分析技术,对弹性体材料的裂纹扩展情况进行预测。

参考文献:

[1] Arkhireyeva A, Hashemi S. Effect of temperature on work of fracture parameters in poly(ether- ether ketone) (PEEK) film[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71: 789-804.

[2] Yin T H, Wu T H, Liu J L, *et al*. Essential work of fracture of soft elastomers[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2021, 156: 104616.

[3] Broberg K B. Critical review of some theories in fracture mechanics[J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1968, 4: 11-19.

[4] Sunil Kumar M R, Schmidova E, Konopík P, *et al*. Fracture

toughness analysis of automotive-grade dual-phase steel using essential work of fracture (EWF) method[J]. Metals, 2020, 10: 1019.

[5] 黄源, 王国全, 陈煌, 等. 基本断裂功方法表征PP及弹性体增韧PP的冲击韧性[J]. 工程塑料应用, 2007, 35(12): 57-60.
Huang Y, Wang G Q, Chen H, *et al*. Impact toughness characterization of PP and elastermertoughened PP by EWF method[J]. Engineering Plastics Application, 2007, 35(12): 57-60.

[6] Sarkar R, Chandra S K, De P S, *et al*. Evaluation of ductile tearing resistance of dual-phase DP 780 grade automotive steel sheet from essential work of fracture (EWF) tests[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 103: 102278.

[7] Bensaada R, Almansba M, Ferhoum R, *et al*. Ductile fracture study of stainless steel AISI 304L thin sheets using the EWF method and cohesive zone modeling[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2018, 18: 1181-1190.

[8] Wu J S, Mai Y W, Cotterell B. Fracture toughness and fracture mechanisms of PBT/PC/IM blend[J]. Journal of Materials Science, 1993, 28: 3373-3384.

[9] Tjong S C, Xu S A, Mai Y W. Impact-specific essential work of fracture of maleic anhydride-compatibilized polypropylene/elastomer blends and their composites[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2002, 40: 1881-1892.

[10] Martinez A B, Jose G P, Miguel S S, *et al*. The essential work of fracture (EWF) method-analyzing the post-yielding fracture mechanics of polymers[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16: 2604-2617.

[11] Mehrabi M M, Razavi A M K, Abbasi F. Evaluation of fracture toughness of ABS polymers via the essential work of fracture (EWF) method[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47: 6375-6386.

[12] Bárány T, Czigány T, Karger K J. Application of the essential work of fracture (EWF) concept for polymers, related blends and composites: a review[J]. Progress in Polymer Science, 2010, 35: 1257-1287.

[13] Griffith A A. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 1921, 221: 163-198.

[14] Zheng Y, Jiang J L, Jin M G, *et al*. In situ and real-time visualization of mechanochemical damage in double-network hydrogels by prefluorescent probe via oxygen-relayed radical trapping[J]. Journal of the American Chemical Society, 2023, 145: 7376-7389.

[15] Irwin G R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate[J]. Journal of Applied Mechanics, 1957, 24: 361-364.

[16] 杨立云, 王青成, 王宇伟, 等. 材料线弹性断裂力学的断裂准则研究进展[J]. 科技导报, 2020, 38(2): 59-68.
Yang L Y, Wang Q C, Wang Y W, *et al*. Research progress of fracture criteria in linear elastic fracture mechanics of materials [J]. Science & Technology Review, 2020, 38(2): 59-68.

[17] Dally J W, Fourney W L, Irwin G R. On the uniqueness of the stress intensity factor-crack velocity[J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1985, 27: 149-168.

[18] Erdogan F, Sih G C. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear[J]. Journal of Basic Engineering, 1997, 12: 527-535.

[19] Chang K J. On the maximum strain criterion-a new approach to the angled crack problem[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1981, 14: 107-124.

[20] 张心怡, 贾均红, 高飒飒, 等. 碳纤维/橡胶和炭黑/橡胶复合材料力学性能及裂纹扩展损伤有限元模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(7): 94-102.
Zhang X Y, Jia J H, Gao S S, *et al*. Finite element simulation of mechanical properties and crack propagation damage of carbon fiber and carbon black reinforced rubber composite materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(7): 94-102.

[21] Garcia S J, Asimaki D, Ortiz M. Applications of the J-integral to dynamical problems in geotechnical engineering[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2021, 150: 104353.

[22] Tankasala H C, Li T, Seiler P E, *et al*. An assessment of the J-integral test for a metallic foam[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2020, 141: 103958.

[23] Meneghetti G, Ricotta M, Pitarresi G. Infrared thermography-based evaluation of the elastic-plastic J-integral to correlate fatigue crack growth data of a stainless steel[J]. International Journal of Fatigue 2019, 125: 149-160.

[24] Lazzarin P, Zambardi R, Livieri P. A J-integral-based approach to predict the fatigue strength of components weakened by sharp V-shaped notches[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2002, 15: 202-210.

[25] Hutchinson J W. Singular behavior at the end of a tensile crack in a hardening material[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968, 16: 13-31.

[26] Rice J R, Rosengren G F. Plane strain deformation near a crack tip in a power-law hardening material[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968, 16: 1-12.

[27] 李忠明, 谢邦互, 杨鸣波, 等. 用基本断裂功表征聚合物的韧性[J]. 中国塑料, 2002, 16(6): 1-8.
Li Z M, Xie B H, Yang M B, *et al*. Toughness of polymer characterized by essential work of fracture[J]. China Plastics,

2002, 16(6): 1-8.

[28] Silling S A, Lehoucq R B. Convergence of peridynamics to classical elasticity theory[J]. Journal of Elasticity, 2008, 93: 13-37.

[29] 黄丹, 章青, 乔丕忠, 等. 近场动力学方法及其应用[J]. 力学进展, 2010, 40(4): 448-459.
Huang D, Zhang Q, Qiao P Z, *et al*. a review on peridynamics (PD) method and itsapplications[J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(4): 448-459.

[30] Yang Y, Liu Y J. Analysis of dynamic crack propagation in two-dimensional elastic bodies by coupling the boundary element method and the bond-based peridynamics[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2022, 399: 115339.

[31] Yang Y, Liu Y J. Modeling of cracks in two-dimensional elastic bodies by coupling the boundary element method with peridynamics[J]. International Journal of Solids and Structures, 2021, 217-218:74-89.

[32] Zhang H, Huang D, Zhang X. Peridynamic modeling of elastic-plastic ductile fracture[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2024, 418: 116560.

[33] Zhang J, Yang Q S, Liu X. Peridynamics methodology for elasto-viscoplastic ductile fracture[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 277: 108939.

[34] Zhu J G, Ren X D. A dissipation informed peridynamic model for dynamic brittle fracture[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2023, 121: 107236.

[35] Ning L Y, Cai Z W, Dong H, *et al*. Physics-informed neural network frameworks for crack simulation based on minimized peridynamic potential energy[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2023, 417: 116430.

[36] Ding H H, Li J C, Cui X L, *et al*. Peridynamic simulationons of RCF crack growth in laser quenched rail material[J]. Engineering Fracture Mechanics 2022, 269: 108520.

[37] Alebrahim R,Marfia S. A fast adaptive PD-FEM coupling model for predicting cohesive crack growth[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2023, 410: 116034.

[38] Guo X Y, Wan J, Chu X H, *et al*. A fatigue model under Cosserat peridynamic framework for concrete fatigue cracking[J]. International Journal of Fracture, 2024, 246: 1-22.

[39] Ha Y D, Bobaru F. Studies of dynamic crack propagation and crack branching with peridynamics[J]. International Journal of Fracture, 2010, 162: 229-244.

[40] Ran X, Qian S R, Zhou J, *et al*. Crack propagation analysis of hydrogen embrittlement based on peridynamics[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47: 9045-9057.

[41] Chen Y Y, Yang Y, Liu Y J. Fatigue crack growth analysis of hydrogel by using peridynamics[J]. International Journal of Fracture, 2023, 244: 113-123.

[42] Mai Y W, Cotterell B. Effect of specimen geometry on the essential work of plane stress ductile fracture[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21: 123-128.

[43] Hashemi S. Temperature dependence of work of fracture parameters in polybutylene terephthalate (PBT) [J]. Polymer Engineering & Science 2000, 40: 1435-1446.

[44] Rigotti D, Elhajjar R, Pegoretti A. Adiabatic effects on the temperature and rate dependency of the fracture toughness of an ethylene- fluoroethylene film[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 214: 260-269.

[45] Arkhireyeva A, Hashemi S. Influence of temperature on plane stress ductile fracture of poly(ethylene terephthalate) film[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2001, 30: 125-131.

[46] Zeng X L, Xu L, Xia X N, *et al*. The synergy of hydrogen bond and entanglement of elastomer captures unprecedented flaw insensitivity rate[J]. Small, 2023, 19: 2207409.

[47] Xiong J F, Wang X W, Li L L, *et al*. Low-hysteresis and high-toughness hydrogels regulated by porous cationic polymers: the effect of counteranions[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2024, 63: e202316375.

[48] Fatehi M M, Yousofian H, Soltanian H, *et al*. Superior crack propagation inhibitory effectiveness of MWCNT reinforced SBS toward improving oil/gas well cement integrity[J]. Construction and Building Materials, 2023, 403: 133171.

[49] Li W Z, Zheng S J, Zou X Y, *et al*. Tough hydrogels with isotropic and unprecedented crack propagation resistance[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(43): 2207348.

[50] Liu P Y, Zhang Y, Guan Y, *et al*. Peptide-crosslinked, highly entangled hydrogels with excellent mechanical properties but ultra-low solid content[J]. Advanced Materials, 2023, 35: 2210021.

[51] Lancet D, Pecht I. Spectroscopic and immunochemical studies with nitrobenzoxadiazolealanine, a fluorescent dinitrophenyl analog[J]. Biochemistry, 1977, 16: 5150-5157.

[52] Zhang Y, Fukao K, Matsuda T, *et al*. Unique crack propagation of double network hydrogels under high stretch[J]. Extreme Mechanics Letters, 2022, 51: 101588.

[53] Pan Y D, Zhou Y F, Suo Z G, *et al*. Inelastic zone around crack tip in polyacrylamide hydrogel identified using digital image correlation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 289: 109435.

[54] Zhang G H, Steck J, Kim J, *et al*. Hydrogels of arrested phase separation simultaneously achieve high strength and low hysteresis[J]. Science Advances, 2023, 9: eadh7742.

[55] Ju J Z, Sanoja G E, Nagazi M Y, *et al*. Real-time early detection of crack propagation precursors in delayed fracture of soft elastomers[J]. Physical Review X, 2023, 13: 021030.

[56] Yan S S, Wang Z, Liu F X, *et al*. Aromatic donor – acceptor charge- transfer interactions reinforced supramolecular polymer electrolyte for solid- state lithium batteries[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33: 2303739.

[57] Dong B, Zhang L Q, Wu Y P. Influences of different dimensional carbon- based nanofillers on fracture and fatigue resistance of natural rubber composites[J]. Polymer Testing, 2017, 6: 281-288.

[58] 付坤, 翁更生, 闫智敬, 等. 气相法白炭黑填充天然橡胶的裂纹扩展机理[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(4): 90-95.
Fu K, Weng G S, Yan Z J, *et al*. Crack growth mechanism of fumed silica filled natural rubber[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2016, 32(4): 90-95.

[59] Li Y M, Zhang Z P, Rong M Z, *et al*. Sunlight stimulated photochemical self- healing polymers capable of re- bonding damages up to a centimeter below the surface even out of the reach of the illumination[J]. Advanced Materials, 2023, 35: 2211009.

[60] 董光超, 邵春妍, 姬依婷, 等. 一种基于亚胺键的兼具阻尼和自修复性能的聚氨酯材料[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(5): 11-21.
Dong G C, Shao C Y , Ji Y T, *et al*. A polyurethane material with both damping and self-healing properties based on imine bonding [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(5): 11-21.

Advances in the Characterization of Crack Extension in Elastomers

Xiaoqian Guo, Xiang Huang, Hesheng Wu, Peng Sun, Weiwei Lei, Jie Liu

(*School of Materials Science and Engineering, Key Laboratory of Green Preparation and Application of Functional Materials, Hubei Key Laboratory of Polymer Materials, Hubei University, Wuhan 430062, China*)

ABSTRACT: Predicting and characterizing crack propagation in elastomers is a critical research topic. In this paper, the characterization methods of crack propagation and the strategies for enhancing crack resistance of elastomers were summarized and the suitable materials for the characterization methods of crack propagation were provided. Furthermore, the influence factors of the essential work of fracture were discussed, providing a guidance for the selection of prefabricated crack notches. Finally, combined with the characterization test of rigid materials, the prospect of crack propagation was put forward to enlighten the research of crack propagation in elastomers materials.

Keywords: elastomer; crack extension; essential work of fracture