

文章编号:1001-4888(2023)05-0560-13

材料断裂力学性能的多场耦合 测试与实验教学探讨*

王正直, 彭庆岳, 陈若鸿, 颜朔庚, 黄凯

(武汉大学 土木建筑工程学院工程力学系, 湖北武汉 430072)

摘要: 金属材料的断裂测试实验是全面了解材料力学性能的重要一环, 目前实验教学中广泛采用的方法是通过测定断裂后试样断口的特征裂纹长度来获得断裂韧度, 但缺乏对裂纹演化全过程的直接观测, 限制了学生对断裂指标判据、破坏形式和断裂机理的深入理解。为了使学生更加直观、全面地掌握断裂力学实验、理解断裂力学行为, 本文提出一种多场耦合同步测试材料断裂行为的教学模式: 通过高频高精度红外与高速显微数字图像相关技术, 对裂尖温度场与应变场进行实时检测, 从而实现对裂纹长度的同步测定、裂尖塑性区的可视化表征以及断裂特征的捕捉和分析; 结合经典断裂力学理论, 对不同条件的断裂韧度教学实验进行了探索和改进。初步教学实践表明, 该课程丰富的实验内容和新颖的观测现象可以加深学生对断裂力学理论的理解, 从而拓展学生解决实际科学问题的思路。

关键词: 断裂力学; 高速摄像; 红外热像; 裂纹长度; 教学实验

中图分类号: G423.07; G642.0 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-271

0 引言

断裂韧度实验作为力学核心实验课程内容之一, 主要关注材料含缺陷或裂纹时的局部过载破坏问题。实验教学课程对现代材料科学和工程结构安全研究具有重要的指导意义, 如缺陷夹杂对纳米材料性能的影响、航空航天中各种器件的微裂纹安全性评估、桥梁隧道中裂缝对强度的影响等^[1-4]。传统断裂韧度实验教学主要基于国标 GB 4161-2007 和 GB/T 21143-2014 开展, 教学内容对线弹性和弹塑性条件下断裂韧度的测定设计了相应流程。其中, 实验测定方式存在 2 个不足: 一是对裂纹长度 a 这一关键信息主要采用工具显微镜对断裂后的试样断口进行测量, 学生对于断口处的特征裂纹长度选取依据的认知尚不清晰^[5-6]; 二是对延性断裂韧度的测量主要采用多试样法或单样柔度法, 教学模式较为繁复, 无法让学生对材料断裂全过程与裂纹尖端应力场进行直接观测和了解。此外, 由于破坏实验中裂纹尖端塑性主导区较小, 失稳断裂速度过快, 属于小尺度瞬时非线性变形问题, 使得断裂现象难以被捕捉^[7-8]。因此, 设计能够实现对裂纹长度实时测量、对断裂特性有效捕捉的实验课程, 成为了提高断裂实验教学质量、提升学生理解能力的关键点。

目前, 工程实践中采用的裂纹长度检测方法主要为电测信号法, 包括间接直流电势差法与直流电压降法^[9], 而对于带有尖锐平直裂纹的大尺寸试件, 常采用 CCD 相机结合图像识别技术测定裂纹长

* 收稿日期: 2022-11-02; 修回日期: 2022-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(12272276, 11972264); 广东省自然科学基金项目(2021A1515010237); 武汉大学教师教学发展研究项目; 武汉大学研究生导师育人方式创新项目

通信作者: 黄凯(1987-), 男, 实验师。主要研究领域: 智能材料力学。Email: 00030505@whu.edu.cn

度^[10]。但此类电测实验方法在教学实验中存在信息量转换较为复杂、试件尺寸较大、学生难以独立测试等问题。在应力场强度的表征方面,数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术是常用的可视化检测手段^[11-13],但该技术难以识别微纳米尺度的区域,且受拍摄速率限制,难以对裂纹亚临界扩展、瞬时断裂和失稳破坏等情况实现有效捕捉^[14-15]。根据当前大工科教学的需求和实际情况,断裂力学实验需要学生在掌握实验技能、了解实验原理的基础上,进一步深化对关键知识点的认知,而上述问题给断裂实验中学生的学习、观测与理解带来了很大困难。

结合现有探测裂纹长度和表征应力强度方法的优势特点,本文发展了高精度红外热像技术与高速显微DIC检测方法,并搭建了多场耦合同步测试与表征系统。在此系统中,高精度红外热像技术能实现稳定扩展或失稳破坏下裂纹长度的实时精确测定^[16-17]。高速显微DIC技术能捕捉微区瞬态变形,实现对裂尖能量场和应力强度因子的标定。实验教学创新方面,在目前断裂力学实验课程体系基础上,将2种不同条件下断裂韧度 K_{IC} 和 J_{IC} 实验内容相似的部分整合优化,不同的部分进行定性和定量的同步实验对比;并采用新型金属材料,在相同材质下,通过不同热处理获得较大的韧性差别和破坏形式上的差异,更加方便学生理解2种断裂模式的区别。在经典实验课程上,增加了破坏瞬态过程现象案例,从热力学的角度对裂纹尖端断裂行为进行机理分析,扩展了目前实验教学的维度和深度。初步实践表明,该实验教学有效地提升了学生对断裂行为的认知和对断裂机理的理解,激发了学生的学习兴趣,提高了学生的综合实验能力。

1 试样制备与实验过程

1.1 试样制备

为获得更好的断裂实验教学效果,选取了镍钛合金作为实验材料进行对比实验,该材料通过不同工艺处理后,在相同尺寸下可展现较大的断裂行为差别^[18-19]。原材料成分为49.94 at. % Ni-Ti,厚度为4mm。将材料预先放入箱式炉在800℃下进行1h的高温处理,使基体均匀化和软化,取出后在油中淬火。对淬火后的试件进行多道次的冷轧,每道次轧制量为0.1mm,直至减薄到2.4mm。最后利用线切割机在冷轧后的板上取台阶型紧凑拉伸样品,切割尺寸如图1(a)所示。进行后续热处理获得2种不同类型试样:(1)250℃退火1h,放入水中冷却,获得脆性破坏瞬断试样A。(2)600℃退火1.5min,在油中淬火,获得亚临界扩展失稳瞬断试样B。(3)600℃退火30min,在空气中冷却至室温,获得延性破坏试样C。对不同热处理后的试件进行裂纹开口打磨与疲劳预制生长。使用钨钢刀片,在1~8N的压力下,采用800目的金刚石研磨膏,以每分钟50~200次的速度,垂直于试样进行开口打磨,直到切口根部半径小于50 μm ,切口总深度约为0.2mm。将开磨好的样品在无水乙醇中清洗5min取出,使用显微镜核查2个对立表面的开口情况,保证其裂纹长度误差低于0.02mm。

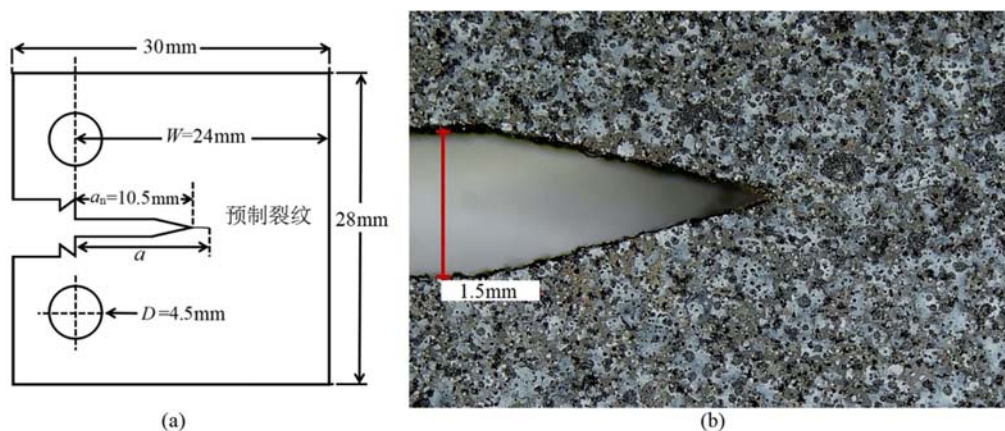


图1 (a)台阶型紧凑拉伸试样尺寸;(b)DIC散斑表面

Fig. 1 (a) the dimension of the stepped-type compact tensile specimen; (b) the DIC speckle surface

将开口后的试样在疲劳试验机上进行裂纹预制。使用万向夹头稳固试件以保证轴向加载,使应力在厚度上均匀分布。以 5Hz 频率的正弦波交变循环加载,加载比率 $R = P_{\min}/P_{\max} = 0.1$ (最小荷载/最大荷载),应力场强度因子的最大值 $K_{P_{\max}}$ 不超过预估 K_{IC} (应力强度因子) 的 80%。当裂纹扩展长度大于 0.5mm 时,减小最大荷载,使 $K_{P_{\max}}$ 不超过 K_{IC} 的 60%。等试样的预制裂纹扩展长度不小于 $0.025W$ 时 (W 为孔中心距试件边缘的距离),得到试样的裂纹长度 a 为 $0.48W \sim 0.53W$ 。对预制好裂纹的试件 2 个表面进行喷漆处理,对红外检测表面喷涂均匀厚度的黑色哑光漆,使表面各处获得一致的红外辐射率;对试件另一面,即 DIC 检测表面,均匀喷涂一层哑光白漆(厚度约 $10\mu\text{m}$),再利用空压枪配备微米级喷口喷射黑色散斑,使其表面分布具有不同色阶的均匀细密散斑,线密度高达每毫米 $50 \sim 200$ 点, DIC 散斑表面情况如图 1(b) 所示。

1.2 实验测试方法

为实现对裂纹尖端微区变形和温度变化的全场实时观测,我们搭建了一套多场同步断裂监测装置,如图 2 所示。装置的主体部分由万能试验机(精度 0.5 级)、PHOTRON SA-5 高速摄像机(全画幅每秒 7500 帧,配备 125 倍显微镜镜头)和 FLIR SC7700M 高频红外热像仪(记录频率 500Hz,灵敏度 20mK)以及采集系统组成。将上述设备的触发信号端口均连接至同步触发器,以保证多场监测的同步性。使用参照标定确保各个仪器同时触发,并且延迟间隔不超过 0.2s。将 COD 规夹持在样品台阶处,用于测定 2 个台阶点的变形量,其位移信号与荷载同步。断裂测试以 $2\text{mm}/\text{min}$ 的位移控制速率进行拉伸,直至样品断裂。测试可初步获得:(1) P-COD(荷载-COD 规变形)曲线。(2) 加载破坏全过程样品表面红外热像图,并以此利用软件分析可获取加载时间、像素与温度的对应关系。(3) 断裂过程中的表面散斑截图,根据散斑分布采用 Correlated Solutions(Vic-2D)软件进行 DIC 分析,子集大小选择为 $21 \sim 25$,计算步长选择为 7,采用 Lagrange 张量计算,滤波器尺寸选择 15 进行全场应变计算,即可获得裂尖应变信息。根据 GB/T 21143—2014 中的图 16 获取其关键荷载值 P_Q 与 P_{\max} ,并根据 6.2.4 条的断裂韧度条件确定样品是否满足 K_{IC} 。此外,裂尖长度信息的精确测量也是测定断裂韧度的关键要素之一,使用工具显微镜测量预置裂纹后的原始长度 a_0 ,通过红外热像与显微 DIC 来测定裂纹实时长度 a ,并利用扩展裂尖位置进行像素标定,根据像素换算得到裂尖长度。

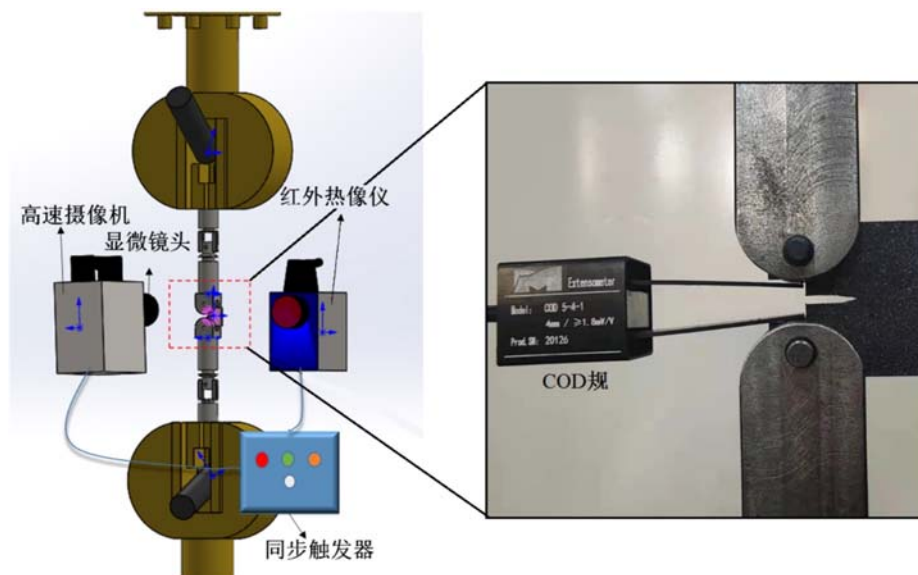


图 2 断裂力学多场测试装置及样品放置

Fig. 2 Multi-field-coupled fracture testing device and the sample setting

2 实验结果与分析

3 种类型试样的 P-COD 曲线如图 3 所示。根据 GB/T 21143—2014 中 6.2.2 节关于 P_Q 点测定的

标准,对每条曲线从原点作其线弹性切线部分斜率的 95%的直线。该直线与原曲线的交点便是 P_Q ,若无交点, P_{max} 就等于 P_Q 。对 3 种类型的曲线计算 P_{max}/P_Q ,如果比值大于 1.1 则不能采用线弹性准则计算断裂韧度。A、B 试样的 P_{max}/P_Q 均小于 1.1,因此用式(1)计算 K_Q :

$$K_I = \frac{P}{B W^{0.5}} f_2 \left(\frac{a}{W} \right) \tag{1}$$

式中: P 为试样的荷载; a 为表面裂纹的长度; W 为试样长度; B 为试样厚度; $f_2 \left(\frac{a}{W} \right)$ 为形状系数,计算公式为

$$f_2 \left(\frac{a}{W} \right) = \frac{\left[2 + \frac{a}{W} \right] \left[0.886 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right]}{\left[1 - \frac{a}{W} \right]^{\frac{3}{2}}} \tag{2}$$

根据 ASTM E399 标准的规定,当同时满足 $B \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{R_{\rho,2}} \right)^2$ 、 $a_0 \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{R_{\rho,2}} \right)^2$ 和 $(W - a_0) \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{R_{\rho,2}} \right)^2$ 这 3 个条件时, K_Q 即为 K_{IC} ,其中 B 为试样裂尖区厚度; a_0 为疲劳预制后的初始裂纹长度; $R_{\rho,2}$ 为实验温度下的规定塑性延伸强度。根据各样品的测定值,可知 A、B 试样均满足上述条件,因此可以由线弹性准则计算出其平面应变断裂韧度 K_{IC} 。样品 A 在断裂前无明显的亚临界扩展,接近于完全脆性失稳破坏^[20]。而样品 B 在断裂前有少量的亚临界扩展,在达到最大荷载后脆性破坏。由于技术手段的限制,传统课程里未展示亚临界扩展的实验标定部分,并且由于脆性断裂速率过快,断裂瞬间裂纹各处的表现也未揭示。

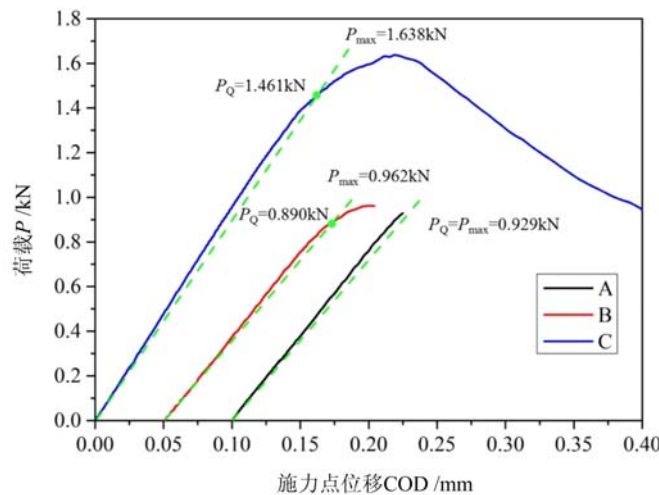


图 3 3 种样品的 P-COD 曲线

Fig. 3 P-COD curves of three samples tested

2.1 典型脆性断裂行为

样品 A 断裂过程中裂尖沿 y 方向的应变场如图 4 所示。由图可见在断裂发生前,裂尖基本没发生明显的亚临界扩展。随着荷载增大,应变总体上单调增大,至最大荷载时,发生瞬间失稳破坏。断裂速率非常快,裂纹贯穿至底部,表现出明显的脆性特征。同步红外热像结果如图 5 所示,在 501N 荷载下,由于裂尖塑形区极小,因此该区域的温度变化基本可以忽略不计。当荷载增大至 913N 时,裂尖塑形区和弹性区受载,发生了由母相奥氏体向马氏体转变的一阶相变,并伴随潜热释放,温度比周边略高,从曲线分布上可见温度波峰即为裂尖所在位置。断裂瞬间,原本裂尖所在位置应力释放,发生较大温降,裂纹尖端从 0.92mm 瞬间失稳扩展至 10.83mm,扩展速率约 10^4 mm/s。

2.2 亚临界扩展脆性失稳断裂行为

样品 B 断裂过程中不同荷载下的裂尖应变场和温度场结果如图 6 所示。通过观察 P-COD 曲线特

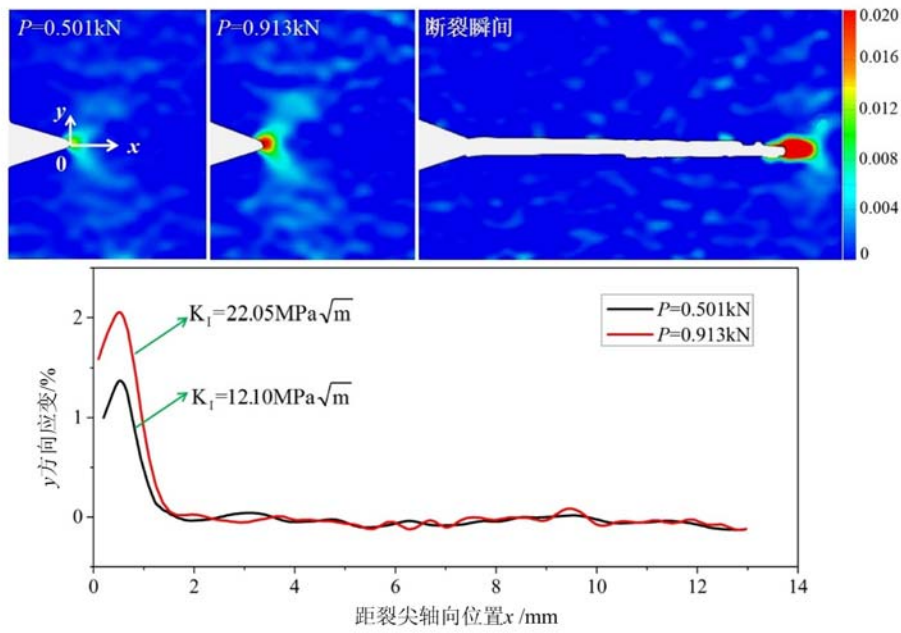


图4 样品A在不同荷载下:(a)裂尖沿y方向的应变场;(b)应变在x轴上随裂尖位置的分布曲线
Fig.4 Sample A at different loadings:(a) strain field along y direction of the crack tip;
(b) strain distribution with respect to the crack tip position along x axis

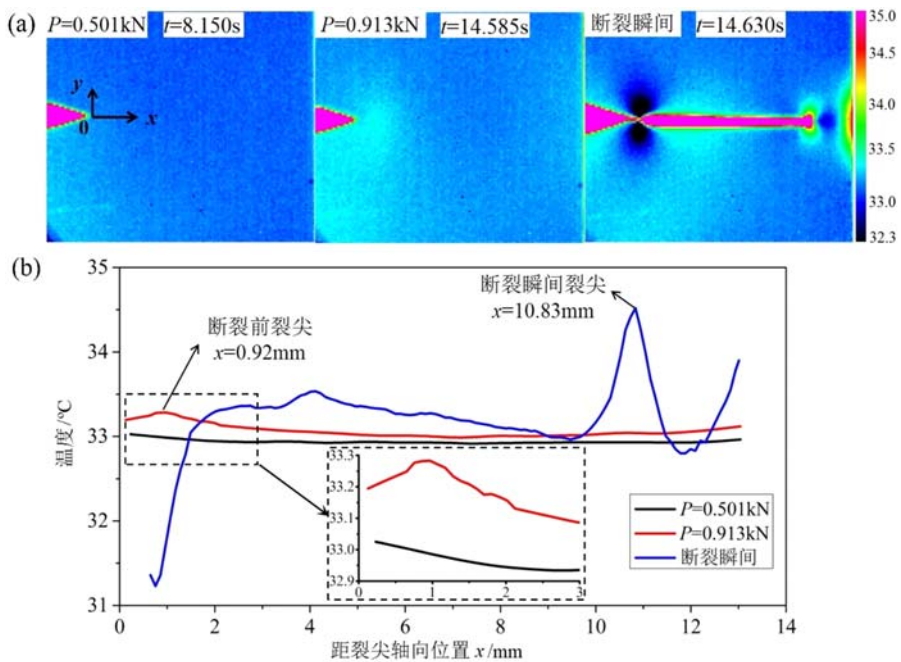


图5 样品A在不同荷载下:(a)温度场;(b)温度随裂尖位置的分布
Fig.5 Sample A at different loadings:(a) temperature field;(b) temperature
distribution with respect to the crack tip position

征,可以看出该样品在荷载高于 P_0 时发生了亚临界裂纹扩展^[21]。在不同荷载时刻下,DIC所测沿y方向的应变随裂尖位置的分布曲线如图7(a)所示,温度随裂尖位置的分布曲线如图7(b)所示。当荷载逐渐增大,裂尖沿y方向上的应变逐渐增大至6%左右时(接近 K_{IC}),裂纹产生微小的扩展;同时产生的表面能被相变消耗,使得裂纹在新位置应变降低。随着荷载的不断增大,应变再次升高直至下一次亚临界扩展出现。这种现象导致裂尖温度不断升高与耗散,裂尖尾迹处则不断出现卸载和温度降低的现象,从而形成了温度点的连续递进行为。应变场和温度场的现象很好地捕捉了裂纹的亚临界扩展,样品B的

断裂行为属于脆性失稳瞬断。

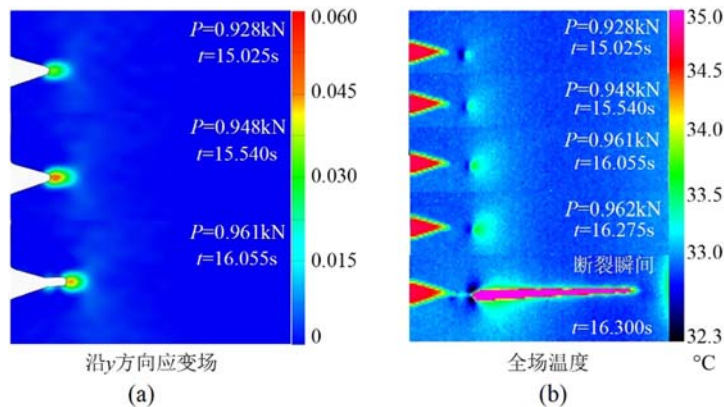


图 6 样品 B 在不同荷载下:(a)沿 y 方向的应变场;(b)温度场

Fig. 6 Sample B at different loadings: (a) strain field along y direction; (b) temperature field

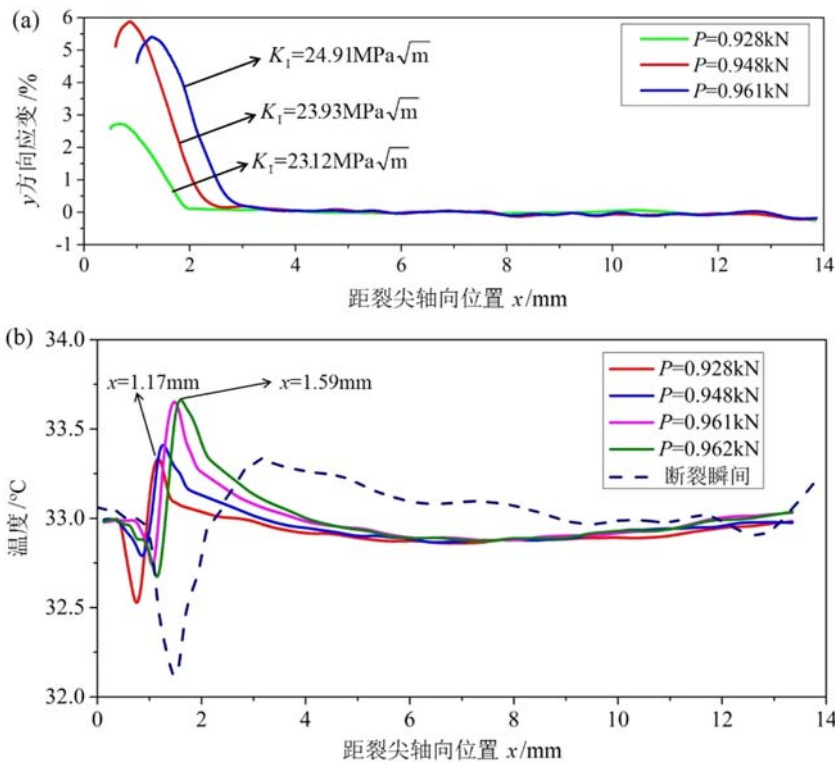


图 7 样品 B 在不同荷载下:(a)沿 y 方向的应变随裂尖位置的分布;(b)温度随裂尖位置的分布

Fig. 7 Sample B at different loadings: (a) strain along y direction with respect to the crack tip position;

(b) temperature distribution with respect to the crack tip position

从图 7(a)中 3 个荷载时刻的最大应变所在位置的变化可以看出裂尖应力集中、湮灭和反复连续递进的过程,温度曲线则显示了准确的裂纹尖端即时位置,其中从荷载为 928N 下的位置 1.17mm 处扩展至荷载为 962N 下的 1.59mm 的位置,每次裂尖的应力集中处即为下次扩展中裂纹的尾迹过冷区。DIC 与红外热像技术的同时使用,可建立像素和位移的联系,并实时获得裂纹亚临界扩展的长度。

2.3 延性断裂行为

样品 C 在不同荷载下的裂尖应变和温度分布结果如图 8 所示。结合 P-COD 曲线可以看出,该样品在断裂过程中表现出典型的延性断裂特征,裂纹扩展是连续的。在达到最大荷载前,裂尖出现微小的亚临界扩展,尖端应变逐渐增加,但扩展量非常小,如图 9(a)中实线所示。当荷载达到最大值后,裂尖的扩展变得更加明显,尖端应变最大值基本达到了饱和状态,如图 9(a)中虚线所示。应力场强度和温

度场也显示出了密切的相关性,从图 9(b)实线部分可以看出,裂尖温度的变化在裂尖亚临界扩展时较小,但是当荷载达到极限时,裂纹开始呈现延性扩展特征,此时裂尖主导区域的尺寸和温度均增大至饱和状态。应力场与温度场的表征结果可以充分展现出延性扩展的特征。

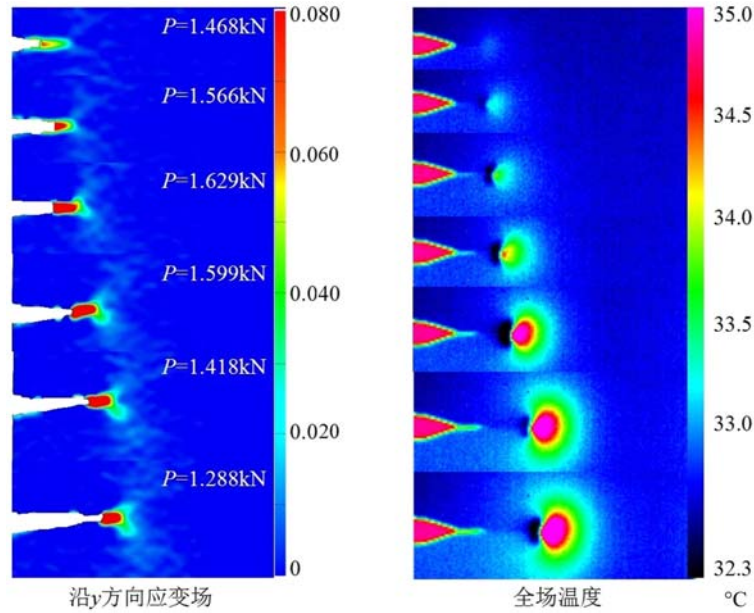


图 8 样品 C 裂尖在不同荷载下:(a)沿 y 方向的应变场;(b)温度场

Fig. 8 Sample C at different loadings: (a)strain field along y direction; (b)temperature field

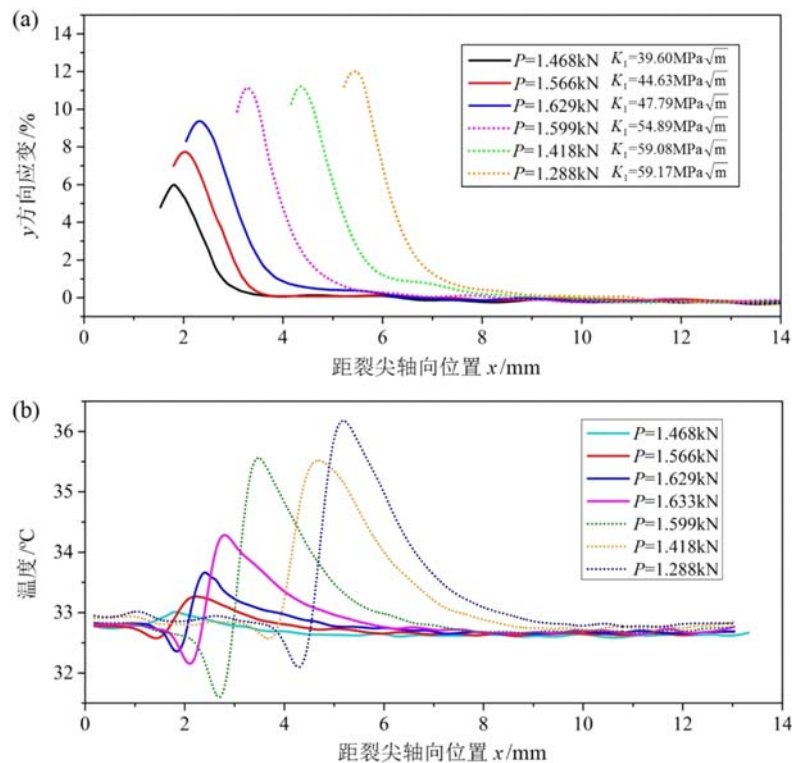


图 9 样品 C 在不同荷载下:(a)沿 y 方向的应变随裂尖位置的分布;(b)温度随裂尖位置的分布

Fig. 9 Sample C at different loadings: (a)strain along y direction with respect to the crack tip position; (b)temperature with respect to the crack tip position

2.4 断裂韧性分析评估

对于前 2 种试件,它们符合线弹性断裂理论中平面应变小范围屈服条件。通过工具显微镜进行断后分析来测量原始裂纹和疲劳预制裂纹的长度,并结合红外和 DIC 的同步标定结果来核对特征裂纹长度值。根据定量关系,获得 P_Q 对应的特征长度 a ,代入式(1)即可获得试样 A 和 B 的平面应变断裂韧性 K_{IC} 。

对于延性断裂样品 C 已不符合平面应变小范围屈服的条件,因此需用延性断裂韧性 J_{IC} 来评估。 J 积分按式(3)进行计算:

$$J = J_e + J_p \tag{3}$$

式中, J_e 、 J_p 分别为 J 的弹性分量和塑性分量。对于台阶型紧凑拉伸试样,有:

$$J_e = \left[\frac{P}{B W^{0.5}} \times f_2 \left(\frac{a}{W} \right) \right]^2 \left[\frac{(1-\mu^2)}{E} \right] \tag{4}$$

$$J_p = \left[\frac{\eta_p U_p}{B(W-a_0)} \right] \left\{ 1 - \left[\frac{(0.75 \eta_p - 1) \Delta a}{W-a} \right] \right\} \tag{5}$$

式中: μ 为泊松比; E 为弹性模量; η_p 由式(6)计算:

$$\eta_p = 2 + 0.522(1 - a_0/W) \tag{6}$$

式中, U_p 可由图 10(a) 给出的示意图测定。在图中, OA 表示曲线的线弹性部分, CB 为 OA 的平行线, OC 表示塑性分量位移, OD 表示弹性分量位移。由于样品 C 的 P -COD 曲线为连续型,其特征值用最大荷载 P_{max} 来表征,通过数值积分法可求出 P_{max} 对应的曲线中 U_p 面积。在 P -COD 曲线和同步红外温度曲线的基础上,找出相应时间下的 P 值。根据相应时刻下的 P 值,结合对应时刻下温度分布曲线的峰值确定起裂中心,得到裂纹长度 a ,减去原始裂纹长度 a_0 ,得到 Δa 。将对应的 P 和 a 值代入式(3)即可得到 J 值。实验值可通过将 J 与 Δa 进行筛选后绘制出 J - Δa 曲线,绘制实例可参考图 10(b) [22-23]。

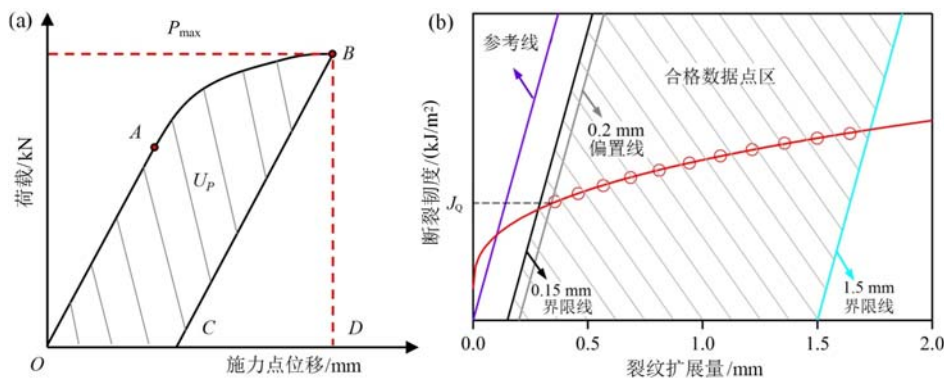


图 10 (a) U_p 测定示意图; (b) J - Δa 曲线绘制示意图 [23]

Fig. 10 (a) schematic diagram of U_p measurement; (b) schematic diagram of J - Δa curve plotting [23]

首先,根据 ASTM E1820 标准的规定,在原点绘制一条斜率为 2σ 的参考线,其中 σ 为相变应力 σ^r 和极限抗拉强度 σ^{TS} 的平均值。然后,在横坐标 0.15mm 和 1.5mm 处分别画出平行于参考线的左、右界限线,在这 2 条界限线之间的数据点被认为是有效数据。最后,采用幂函数规律 $J = C_1 \Delta a^{C_2}$ 对实验点进行拟合,得到有效的 J - Δa 曲线,作一条平行于参考线的偏移线,该偏移线在 0.2mm 处与横坐标相交,并且与拟合曲线相交,该交点即为 J_Q 。当同时满足: $B \geq 25 J_Q / \sigma$ 、 $W - a_0 \geq 25 J_Q / \sigma$,并且幂函数拟合曲线在点 $(\Delta a_Q, J_Q)$ 处斜率 $dJ/d\Delta a < \sigma$ 时,则认为 J_Q 为样品的延性断裂韧性 J_{IC} 。基于上述处理,可获得延性样品 C 的 J - Δa 曲线,如图 11 所示。根据 0.2mm 偏移线与拟合曲线的交点,代入判定条件,均满足要求,因此样品 C 的 J_{IC} 为 29.3kJ/m²。基于上述方法,不同样品的各项指标与断裂韧性见表 1。

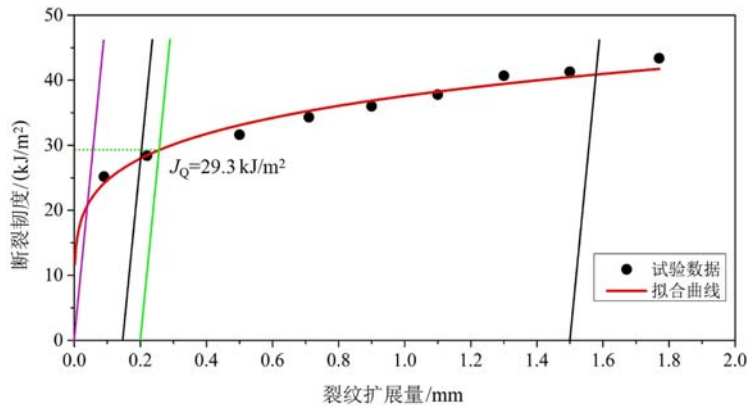


图 11 延性断裂样品 C 的 $J-\Delta a$ 曲线

Fig. 11 $J-\Delta a$ curve of ductile sample C

表 1 不同样品的各项指标与断裂韧度

Tab. 1 Parameters and fracture toughness of the different samples tested

样品	σ^s /MPa	P_{max}/P_Q	a_0 /mm	K_Q /(MPa \sqrt{m})	K_{IC} /(MPa \sqrt{m})	U_p /(mm \cdot N)	J_{Ic} /(kJ/m ²)
A	1.487	1	0.92	22.44	22.44	—	—
B	1.278	1.08	1.16	22.14	22.14	—	—
C	1.248	1.12	1.76	39.26	—	65.6	29.3

2.5 塑性区尺寸分析评估

传统课程在实验手段上对于裂纹塑性区和弹性区主导范围的测量部分较为缺乏,而多场耦合同步测量技术可以填补这一方面的空缺。对于厚板材料,在接近平面应变情况下,裂纹尖端附近的主应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2}) \\ \sigma_2 &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2}) \\ \sigma_3 &= 2\nu \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: r 为裂纹尖端到测点的距离; θ 为测点到裂纹尖端的极角。Von Mises 屈服条件为

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2 \sigma^s{}^2 \quad (8)$$

将式(7)代入式(8),得平面应变塑性区边界方程为

$$r = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma^s} \right)^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[(1 - 2\nu)^2 + 3 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (9)$$

式中, σ^s 为材料的有效屈服强度。对于厚度较小的材料,其表面状态更接近于平面应力的状态,因此其表面塑性区边界方程为

$$r = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma^s} \right)^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[1 + 3 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可知,对于给定材料,在方位角 θ 确定的情况下,塑性区的半径大小取决于应力强度因子 K_I 和相变应力 σ^s 的大小。在平面应力和平面应变条件下,塑性区的最大半径特征方向不同。在平面应变下, θ 值接近 90° 时最大;而在平面应力状态下,半径最大的区域一般为 $60^\circ \sim 75^\circ$ 。通过对红外热像和 DIC 应变演化过程的分析,本文实验所选3种不同样品有如下特征:

(1) 样品 A 和 C 的表面相变区和弹性区呈 2 片对称的叶瓣状,这 2 个区域的最大半径所在角度均为 $60^\circ \sim 75^\circ$,因此表面更接近平面应力状态;而样品 B 的表面叶瓣较淡,弹性区半径角度接近 90° ,因此该样品表面更接近平面应变状态。

(2) 当裂纹处于静态阶段(K_I 小于 K_{IC}) 时, 随着荷载的增加, 裂尖应力强度因子 K_I 、裂尖应变与塑性区半径都单调增加, 3 种样品的静态裂纹在不同 K_I 下均表现出这种趋势。

(3) 样品 A 因具有较大的有效屈服强度 σ_s , 其静态裂尖塑性区半径相对其他样品较小。

(4) 在亚临界和延性扩展过程中, 随着裂纹尖端应力强度因子的增加, 尖端塑性区和相变区产热单调增加, 尾迹应力的释放会导致过冷区的存在。不同材料之间, 由于本征物相形态不同, 塑性区和过冷区的温度变化大小并不能完全代表应力强度因子的高低。

3 实验教学探索

根据以上多场耦合同步断裂实验的内容, 进行了实验课程探索。基于同一材料, 通过设定的热处理工艺, 获得几种典型的断裂性质与行为, 有助于深化学生对材料基本性能和断裂特征的理解。在传统课程单一指标评定的基础上添加了同步多场耦合实验测定环节。该实验的课程内容包括: 紧凑拉伸材料的制备、热处理工艺对材料的影响、疲劳预制裂纹、高质量散斑制作工艺、多场耦合测量装置与测试技术介绍、断裂现象记录、断裂性质判定与裂纹长度标定、2 种断裂韧度的测定及塑性区的尺寸评估等, 课程具体流程如图 12 所示。课程分为 4 个学时, 断裂测试前的准备部分设计 1.5 个学时: 课前为学生准备好线切割试样, 备齐安全眼罩和手套, 让学生按照热处理工艺进行操作, 获得不同韧性材料; 利用刀口开刃打磨, 在调试好疲劳试验机荷载幅值与频率的情况下, 使用外部光源和放大显示设备, 监测预制裂纹的扩展; 预制完毕后, 在实验室通风口处让学生操作喷涂散斑, 并利用工具显微镜核查喷涂质量。多场同步测试部分设计 2.5 个学时: 提前调试好各台设备, 向学生介绍同步触发器的使用方法, 并核定各台设备的同步性; 安装稳固试件后, 在固定焦距和画幅下, 标定红外热像中像素与长度的关系; 对不同材料进行固定速率拉伸破坏, 获取同步断裂信息, 标记裂纹扩展特征, 记录不同特征裂纹下的同步荷载; 根据 P-COD 曲线和荷载特征值判定线弹性和弹塑性情况。线弹性情况可利用工具显微镜和红外测定与校核 a_0 , 使学生清楚认识国标和新测试方法间的联系与区别。延性韧度的测定需找出 6 个以上的有效点的裂纹长度特征值, 并标定对应时刻下的荷载, 做好记录。综合实验报告中不仅包括新设实验内容的的数据记录与处理部分, 还体现断裂行为特征, 如决定裂尖塑性区大小的因素、最大特征角度的记录分析与断裂方式(脆性失稳、亚临界扩展、延性扩展)等。学生通过该课程, 对材料断裂性能标定准则的含义和断裂行为的特征可有更深的认知。

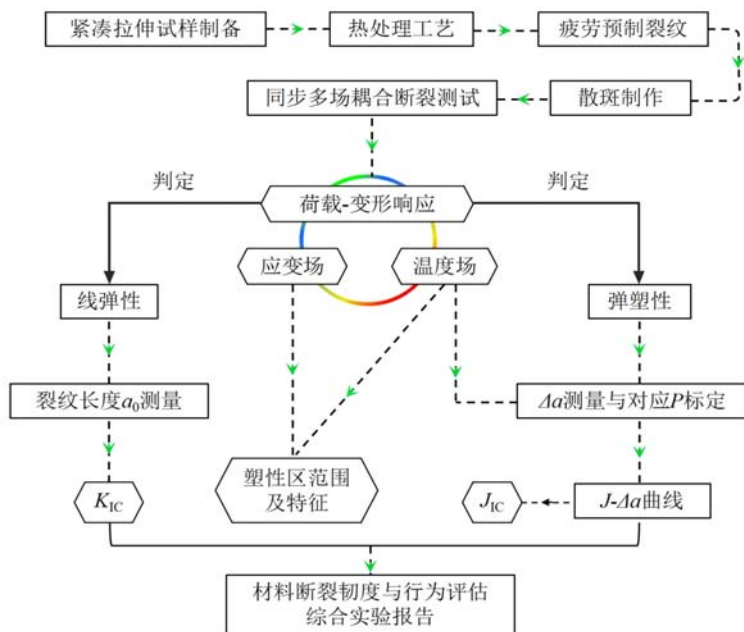


图 12 多场耦合断裂力学实验课流程

Fig. 12 Process of the experimental multi-field-coupled fracture mechanics course

4 结论

当前断裂力学实验主要关注断裂性能指标的测定,其中裂纹长度这一关键指标主要基于对断裂后的试样断口进行测量,缺乏对断裂过程中裂纹扩展行为的直接观测和分析。本文对断裂力学实验课程中不同条件下的断裂韧性测试进行了整合优化,拓展了裂尖应变场和温度场演化等实验内容。通过对特定选材进行热处理,获得几种典型的本征断裂特性。对试样表面进行高质量散斑喷涂,利用高精度高频红外热像与高速显微 DIC 技术,对不同材料断裂全过程进行了荷载-变形响应、应变场和温度场的同步测量。实验结果表明,该技术手段实现了对裂纹实时位置的精确测定,获得了裂尖丰富的热力学信息,包括塑性区尺寸、应变分布与大小、应力强度因子等,可成功对亚临界、失稳和延性扩展断裂行为特征进行分类和标定。该实验课程不但提供了一种获得不同条件断裂韧性特征值的方法,而且直观地将整个断裂行为和裂尖演化信息呈现给学生,深化了学生对韧性标定准则和断裂行为特征的认识。

参考文献:

- [1] 尚福林,北村隆行,平方宽之.微纳米材料及其结构的界面强度的实验研究[J].力学进展,2008,38(4):437-452 (SHANG Fulin, KITAMURA Takayuki, HIRAKATA Hiroyuki. Experimental study on interface strength of micro/nano-materials and their structures[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(4):437-452 (in Chinese))
- [2] 于翀,宋昊.航空结构件孔边裂纹监测技术研究综述[J].航空科学技术,2021,32(12):1-17 (YU Chong, SONG Hao. Summary of research on hole edge crack monitoring of aviation structures[J]. Aeronautical Science and Technology, 2021, 32(12):1-17 (in Chinese))
- [3] 李一凡,董世明,黎坤运,等.三点弯曲型试件 I/II 复合型断裂的数值与实验研究[J].实验力学,2018,33(4):557-566 (LI Yifan, DONG Shiming, LI Kunyun, et al. Numerical simulation and experimental study of three-point bending specimen's I/II mixed mode fracture[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(4):557-566 (in Chinese))
- [4] 王彬文,陈先民,苏运来,等.中国航空工业疲劳与结构完整性研究进展与展望[J].航空学报,2021,42(5):6-44 (WANG Binwen, CHEN Xianmin, SU Yunlai, et al. Research progress and prospect of fatigue and structural integrity for aeronautical industry in China[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(5):6-44 (in Chinese))
- [5] 师俊平,赵蕾,汤安民.平面应变断裂韧性测试的有效性研究[J].应用力学学报,2009,26(3):432-436,621 (SHI Junping, ZHAO Lei, TANG Anmin. Plane strain fracture toughness testing[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2009, 26(3):432-436, 621 (in Chinese))
- [6] 嵇醒.断裂力学判据的评述[J].力学学报,2016,48(4):741-753 (JI Xing. A critical review on criteria of fracture mechanics [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4):741-753 (in Chinese))
- [7] 林红,陈国明,陈养厚.含裂纹金属拉伸断裂过程的热像检测方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2008(5):97-101 (LIN Hong, CHEN Guoming, CHEN Yanghou. Thermographic detection method of tensile fracture process for cracked metal specimens[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008(5):97-101 (in Chinese))
- [8] 郝文峰,原亚南,马寅佶.数字梯度敏感方法及其在航空透明件断裂力学中的应用[J].实验力学,2015,30(5):607-612 (HAO Wenfeng, YUAN Yanan, MA Yinji. Digital gradient sensing (DGS) method and its application in fracture mechanics of transparent parts used in aviation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(5):607-612 (in Chinese))
- [9] 杨迪迪,施伟,杨晓光,等.电位法测量微缺口试样的数值分析[J].推进技术,2020,41(7):1587-1593 (YANG Didi, SHI Yi, YANG Xiaoguang, et al. Numerical analysis of potential drop test on micro-notched specimen[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(7):1587-1593 (in Chinese))
- [10] 张军峰,张博平,王海,等.图像处理技术在疲劳裂纹长度测量中的应用[J].航空工程进展,2012,3(4):442-446 (ZHANG Junfeng, ZHANG Boping, WANG Hai, et al. Application of digital image to processing technique fatigue crack growth measurement[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3(4):442-446

- (in Chinese))
- [11] 郝元灏, 李艳杰, 张昊, 等. 基于 DIC 的退火 NiTi 合金断裂力学行为研究[J]. 实验力学, 2022, 37(2):243—252 (HAO Yuanhao, LI Yanjie, ZHANG Hao, et al. Study on the fracture behavior of annealed NiTi alloy based on DIC[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(2):243—252 (in Chinese))
- [12] 于宁宇, 李群. 基于数字散斑相关实验测量的材料构型力的计算方法[J]. 实验力学, 2014, 29(5):579—588 (YU Ningyu, LI Qun. On the algorithm of material configurational force based on digital image correlation measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(5):579—588 (in Chinese))
- [13] 邹广平, 汪艳伟, 唱忠良, 等. 基于数字散斑相关法的紧凑拉伸试样断裂韧性实验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(3):275—281 (ZOU Guangping, WANG Yanwei, CHANG Zhongliang, et al. Experimental study of compact tension specimen fracture toughness based on digital speckle correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(3):275—281 (in Chinese))
- [14] 范永法, 郑长宏. 用于表面裂纹自动检测的图像识别算法[J]. 机械设计与制造, 2002(4):80—82 (FAN Yongfa, ZHENG Changhong. Image identification algorithm used in automatic inspection of surface cracks[J]. Machine Design and Manufacture, 2002(4):80—82 (in Chinese))
- [15] 朱奇, 郝文峰, 陈雷, 等. 微尺度散斑制备方法研究及应用进展评价[J]. 实验力学, 2018, 33(1):77—84 (ZHU Qi, HAO Wenfeng, CHEN Lei, et al. On the fabrication method of micro-scale speckle and evaluation of its application progress[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(1):77—84 (in Chinese))
- [16] 黄凯, 尹函彬, 孙庆平. 红外热像技术测量 I 型裂纹应力强度因子的研究[J]. 工程力学, 2017, 34(11):231—239 (HUANG Kai, YIN Hanbin, SUN Qingping. Research on using infrared imaging techniques to measure mode-I crack stress intensity factors[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(11):231—239 (in Chinese))
- [17] 王喜丰. 基于红外热像技术的应力分析关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008 (WANG Xifeng. The research on key technology of stress analysis based on infrared thermographic technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008 (in Chinese))
- [18] 李云飞, 陈成, 曾祥国. NiTi 合金的相变-塑性统一本构模型与数值算法[J]. 航空材料学报, 2018, 38(1):26—32 (LI Yunfei, CHEN Cheng, ZENG Xiangguo. Unified constitutive model and numerical implementation of NiTi alloy involving phase transformation and plasticity [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(1):26—32 (in Chinese))
- [19] Ahadi A, Sun Q P. Grain size dependence of fracture toughness and crack-growth resistance of superelastic NiTi [J]. Scripta Materialia, 2016, 113:171—175.
- [20] 李智慧, 师俊平, 汤安民. 金属材料脆性断裂机理的实验研究[J]. 应用力学学报, 2012, 29(1):48—53, 117 (LI Zhihui, SHI Junping, TANG Anmin. Experimental research on the brittle fracture mechanism in metal material [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2012, 29(1):48—53, 117 (in Chinese))
- [21] 李维红. 脆性材料的亚临界裂纹扩展和双向应力影响的数值模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(增刊 2): 1112—1116 (LI Weihong. Numerical simulation of subcritical crack growth in brittle materials and influence of biaxial stress[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(S2): 1112—1116 (in Chinese))
- [22] 周峰峦, 孙晓阳. 几种 J 积分测试标准的比较[J]. 物理测试, 2019, 37(4):45—48 (ZHOU Fengluan, SUN Xiaoyang. Comparison of several J -integral test standards[J]. Physics Examination and Testing, 2019, 37(4):45—48 (in Chinese))
- [23] Haghgouyan B, Hayrettin C, Baxevanis T, et al. Fracture toughness of NiTi-Towards establishing standard test methods for phase transforming materials[J]. Acta Materialia, 2019, 162:226—238.

Multi-field-coupled testing and experimental teaching discussion of material fracture properties

WANG Zhengzhi, PENG Qingyue, CHEN Ruohong, YAN Shuogeng, HUANG Kai

(Department of Engineering Mechanics, School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: The fracture test experiment of metal materials is an important part to comprehensively understand the mechanical properties of materials. At present, the method widely used in experimental teaching is to measure the characteristic crack length of the fracture surface of the sample after fracture to obtain the fracture toughness. The lack of direct observation of the whole process of crack evolution limits the students' in-depth understanding on the fracture index criterion, failure form and fracture mechanism. In order to make students master fracture mechanics experiment and understand fracture behavior more intuitively and comprehensively, this paper proposes a teaching mode of multi-field coupling synchronous testing material fracture behavior. The real-time detection of the temperature field and strain field at the crack tip was carried out by using high-frequency high-precision infrared and high-speed microscopic DIC technology. The synchronous and accurate measurement of the crack length, the visual characterization of the plastic zone at the crack tip, and the capture and analysis of the fracture characteristics were realized. Based on the classical fracture mechanics theory, the teaching experiment of fracture toughness under different conditions is explored and improved. The preliminary practice teaching shows that the rich experimental contents and novel observation phenomena of this course deepen the students' understanding of fracture mechanics theory, and expand the students' ideas to solve practical scientific problems.

Keywords: fracture mechanics; high speed camera; infrared thermal image; crack length; teaching experiment