

45 号钢承载能力的原位三点弯曲试验研究

李 聪¹, 赵宏伟¹, 孙琳琳¹, 于秀娟²
(1. 吉林大学 机械与航空航天学院, 吉林 长春 130025; 2. 安徽工业大学 机械学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘 要: 利用自行研制的原位三点弯曲测试装置,研究了 45 号钢 V 型缺口试件在不同支撑跨距下和弯曲压头与试件中心线偏移量下的承载能力. 首先,从理论上分析了三点弯曲的载荷-挠度曲线与偏移量、跨距的关系. 然后,通过仿真模拟的 von Mises 应力最小塑性区半径估算了裂纹的萌生方向. 最后,通过 12 组 V 型缺口试件的原位三点弯曲试验,获得并分析了不同跨距和偏移量下的三点弯曲载荷-挠度曲线,以及实时采集了弯曲载荷作用下裂纹的扩展情况. 通过原位观测的方式建立了宏观力学性能与微观力学性能的联系. 从材料损伤机理的角度分析了材料在不同的三点弯曲试验参数下载能力的差异.

关 键 词: 三点弯曲; 偏移量; 跨距; 裂纹; 原位观测
中图分类号: O 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)06-0869-06

Research on Load Capabilities of 45[#] Steel via In-situ Three-Point Bending Tests

LI Cong¹, ZHAO Hong-wei¹, SUN Lin-lin¹, YU Xiu-juan²
(1. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China; 2. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma' anshan 243032, China. Corresponding author: ZHAO Hong-wei, E-mail: hwzhao@jlu.edu.cn)

Abstract: The load capabilities of 45[#] steel V-notched specimens under the spans of the supporters and the offsets between the punch and the mid-span of the specimens are studied by the self-made in-situ three-point bending device. Firstly, the relationship of load-deflection curves and offsets and spans are analyzed theoretically. Secondly, the simulated minimum plastic zone radius of von Mises stress is applied to estimate the initiation direction of the crack. Then the experimental three-point bending loading-deflection curves under various offsets and spans are achieved and analyzed by in-situ TPB tests with 12 groups of V-notched specimens. Finally, according to the differences among the load-deflection curves, combining the in-situ images of specimen micro-structures, the initiation and propagation of the cracks due to bending loads are analyzed in real time. The relationship between macro-mechanical properties and micro-mechanical properties are established by in-situ observation. The difference of the load capabilities of materials under different three-point bending test parameters is analyzed from the perspective of damage mechanism.

Key words: three-point bending; offset; span; crack; in-situ observation

三点弯曲试验方法在材料的弯曲模量、弯曲强度和裂纹扩展等方面的研究有着广泛应用^[1-5]. 国内外学者在开展三点弯曲试验时,已经分析了不同压头直径,以及压头与试件之间的摩擦力的影响^[6];也有学者研究了不同试件长度厚度比例对材料的破坏行为的影响^[7],以及不同缺口偏移量下材料三点弯曲载荷下的断裂机理^[8-9]. 由此可见,不同的三点弯曲试验参数(压头直径、跨距、偏移量、试件长厚比和摩擦力)的设置对材料力学性能测试结果的影响是十分重要

的.随着科学技术的发展,仿真分析与原位观测相结合的分析方法逐渐被研究人员所采用. Shafique 用仿真分析的方法研究了材料裂纹的扩展机理^[10]. Zuo 等通过原位力学试验的方法研究了材料的裂纹扩展规律^[8]. 但是,通过原位观测的试验方法分析 V 型缺口试件的裂纹萌生和扩展规律与三点弯曲参数(偏移量、跨距)之间关系的研究相对较少.

本文采用有限元分析和原位三点弯曲试验相结合的方法,研究了 45 号钢 V 型缺口试件的承载能力. 首先,通过有限元分析确定三点弯曲载荷-挠度曲线和裂纹萌生趋势. 然后,通过自制的试验装置开展了 12 组原位三点弯曲试验,试验中偏移量分别设置为 0, 2, 4 和 6 mm,跨距分别设置为 40, 50 和 60 mm,最大弯曲挠度为 5 mm. 该原位三点弯曲试验获得了不同偏移量和跨距参数下的载荷-挠度曲线与缺口表面损伤的原位图像,并根据原位图像对试件的裂纹萌生和扩展角进行了

分析.从材料在弯曲载荷下损伤机理的角度总结了不同偏移量和跨距对试件承载能力的影响.

1 理论研究

本研究的原位三点弯曲试验采用均匀位移加载模式,移动压头加载速率为 $5.0\text{ }\mu\text{m/s}$. 因此,本研究可以看作准静态试验,瞬时状态下的理论模型如图 1a 所示. l 是固定支撑 A 和固定支撑 B 之间的跨距, Δ 是力的作用点和试件中心在 Z 方向的距离,即偏移量. h 和 b 分别是试件的宽度和厚度. F 是加载力, F_A 和 F_B 是支撑力. 为了减小摩擦力对试验的影响,在支撑件和试件之间采用滚动摩擦结构. θ_A 和 θ_B 是中性轴在载荷 F 作用下的偏转角; f_A 和 f_B 分别是支承 A 和支承 B 与试件之间的摩擦力. 试件的 V 型缺口可以提高应力,如图 1b 所示. 不同偏移量和跨距的简化模型如图 1c 所示.

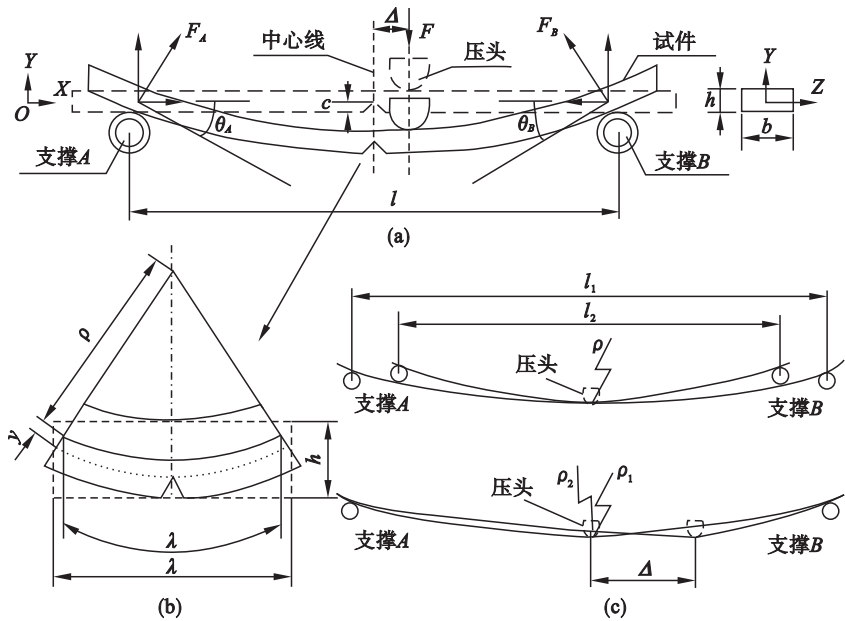


图 1 三点弯曲试验的理论模型
Fig. 1 Theoretical model of TPB tests

(a)—三点弯曲试验的理论模型; (b)—V 型缺口处放大视图; (c)—不同偏移量和跨距处的简化模型.

试件在准静态位移载荷下受力分析如下:

1) 在任何瞬时挠度条件下,试件均处于机械平衡状态. 根据力的平衡原理^[11-12],在 Y 轴方向上的合力 F_y 和弯矩 M_A 均为 0.

$$\begin{cases} \sum F_y = 0, \\ \sum M_A = 0; \\ F = F_A \cos \theta_A + F_B \cos \theta_B - f_A \sin \theta_A - f_B \sin \theta_B, \\ F_A \cos \theta_A \cdot l = F \left(\frac{l}{2} - \Delta \right). \end{cases}$$

(1)

其中, $\left. \begin{matrix} f_A = \mu F_A, \\ f_B = \mu F_B \end{matrix} \right\}$, μ 是滚动摩擦系数,取值为 0.001 ~ 0.005. 因此, $f_A \ll F_A$ 和 $f_B \ll F_B$, 固定支承引起的滚动摩擦在本试验中可以忽略不计. 三点弯曲试件的断裂受弯矩 M_{mid} 控制,缺口位置处的力矩可按照式(2)计算.

$$M_{mid} = F_A \cdot \cos \theta_A \cdot l = \frac{1}{4} \cdot F \cdot (l - 2\Delta) \cdot \cos \theta_A. \quad (2)$$

2) 在试件的弹性阶段,根据三点弯曲变形几

何关系,挠度 v 可按照式(3)计算.

$$v=\frac{Fcx}{6EI}(l^2-x^2-c^2). \tag{3}$$

式中: E 是材料的弹性模量; I 是试件沿中性层的惯性矩; x 是固定压头和试件之间的距离. 则有 $x=l/2+\Delta$, c 是固定压头与试件之间的距离.

$$v=\frac{F\left(\frac{l}{2}-\Delta\right)\left(\frac{l}{2}+\Delta\right)}{6EI}\left[l^2-\left(\frac{l}{2}+\Delta\right)^2-\left(\frac{l}{2}-\Delta\right)^2\right]. \tag{4}$$

因此,可以得到 $F=192EIv/(l^2-4\Delta^2)^2$. 中性轴转动惯量近似按照 $I=bh^3/12$ 计算. 在施加相同的挠度时:当偏移量 Δ 恒定时,载荷 F 随跨距 l 的增大而减小;当跨距 l 恒定时,载荷 F 随偏移量 Δ 的增大而增大,如图 2 所示.

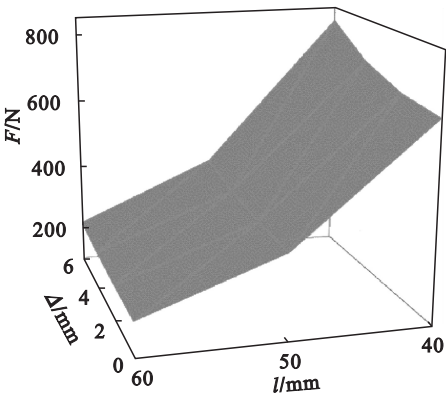


图 2 偏移量、跨距和弯曲载荷的理论关系
Fig. 2 Theoretical relation of offset, span and loading force

3) 弯曲力矩 M 与试样中点处的应力 σ 的关系为

$$\sigma=\frac{M_{\text{mid}}\cdot y}{I}. \tag{5}$$

式中 y 为缺口顶部到中性层的距离. 将式(2)和(4)代入式(5)得

$$\sigma=\frac{1}{4}\cdot F\cdot(l-2\Delta)\cdot\cos\theta_A. \tag{6}$$

因此,在试件缺口处的正应力 σ 与跨距 l 成正比,与偏移量 Δ 成反比.

4) 裂纹萌生与扩展的理论分析. 根据断裂力学理论,三点弯曲试件表面裂纹是 I 型和 II 型混合型裂纹. 与试件缺口尖端距离为 r , 可以表示为

$$r=\frac{9}{2\sigma_s}\left[\left(\frac{5}{36}+\frac{1}{18}\cos\theta-\frac{1}{12}\cos^2\theta\right)K_I^2+\left(\frac{1}{3}\cos\theta\sin\theta-\frac{1}{9}\sin\theta\right)K_IK_{II}+\left(\frac{5}{36}-\frac{1}{18}\cos\theta+\frac{1}{4}\cos^2\theta\right)K_{II}^2\right]. \tag{7}$$

其中 σ_s 是屈服应力. 裂纹出现之前,在试样的缺口位置处正应力达到最大值^[9]. 在应力集中下,微裂纹继续扩展,形成宏观裂纹^[10-12]. 裂纹沿塑性区的最小半径 r 方向扩展^[13-15].

2 有限元分析(FEA)

根据 45 号钢在不同偏移量和跨距下的仿真载荷-挠度曲线,可以评价其承载能力. 仿真的塑性区半径应力云图可以估算主裂纹的起始位置. 试件的变形符合胡克定律^[16-17].

文献[17]中使用的参数及 45 号钢和 T10 的机械性能列在表 1 中.

表 1 FEA 参数
Table 1 Parameters in FEA

参数	数值
试件的强度系数/MPa	600
试件的应变硬化指数	0.21
压头与试件之间的摩擦系数	0.15
试件与固定压头之间的摩擦系数	0.001 ~ 0.005
45 号钢弹性模量/GPa	20.5
T10 弹性模量/GPa	21

在假定试件在 1.5 mm 的弯曲挠度下未发生裂纹的情况下,仿真载荷-挠度曲线如图 3 所示.

仿真结果与理论分析一致. 即当跨距相同时,45 号钢在越大的偏移量下承载能力越强,如图 3a 和图 3b 所示;当偏移量相同时,45 号钢在越小的跨距下承载能力越强,如图 3c 所示.

当跨距 l 分别为 40, 50, 60 mm, 加载挠度为 1.5 mm 时,不同偏移量下的 von Mises 应力云图如图 4 所示. 从图中可清楚地获得应力塑性区半径的最小位置. 裂纹的扩展方向是缺口尖端指向加载点的方向. 此外,随着跨距的增加,裂纹萌生角减小;随着偏移量的增加,裂纹萌生角增大.

3 原位三点弯曲试验

3.1 设备与试件

三点弯曲测试装置如图 5a 所示,该设备已通过商用设备校准,具有良好的可靠性. 为了使试验现象更加明显,试件中间预制了一个 V 型缺口. 试件尺寸如图 5b 所示.

3.2 原位三点弯曲试验结果

试验中,在跨距 l 分别为 40, 50 和 60 mm 的条件下,将偏移量 Δ 分别设置为 0, 2, 4 和 6 mm. 进行了 12 组正交对比试验.

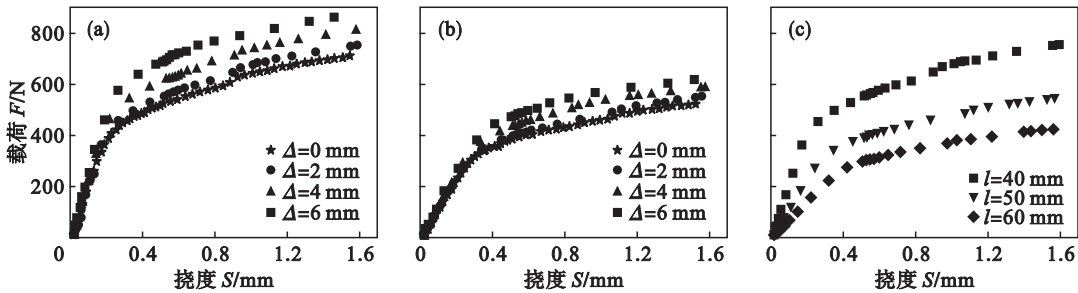


图 3 有限元分析的荷载 – 挠度曲线
Fig. 3 Load-deflection curves of FEA

(a)— $l=40\text{ mm}$; (b)— $l=50\text{ mm}$; (c)— $\Delta=2\text{ mm}$.

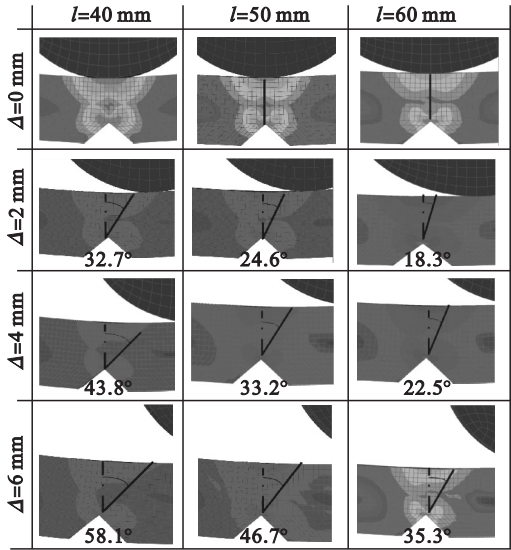


图 4 裂纹萌生方向的 von Mises 应力仿真结果
Fig. 4 von Mises stress simulation results with crack initiation direction

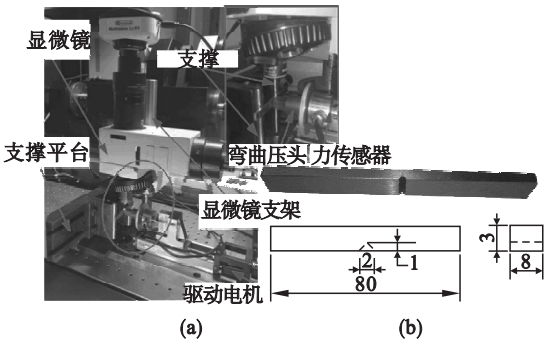


图 5 原位试验设备及试件
Fig. 5 In-situ experimental equipment and specimen
(a)—设备; (b)—试件尺寸 (mm).

图 6 中荷载 – 挠度曲线的结果趋势与图 4 的有限元分析结果趋势一致. 但是, 由于微裂纹萌生过程的出现, 试验曲线与模拟曲线存在一定的数据差异, 这与仿真分析时假设了材料不发生裂纹有关. 当荷载超过试件材料能力时, 出现裂纹, 当

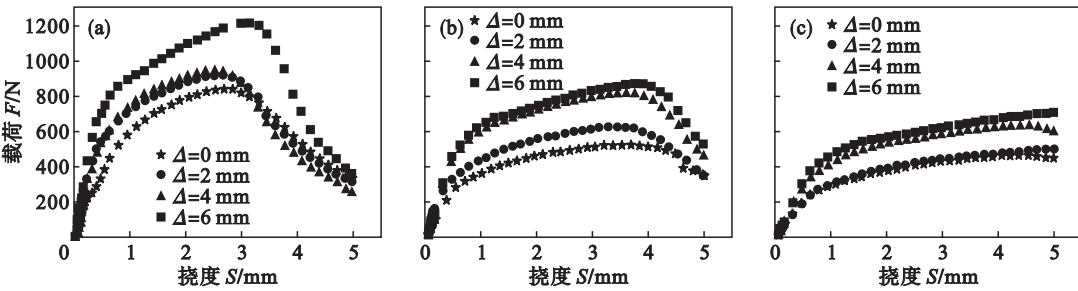


图 6 荷载挠度试验曲线
Fig. 6 Load-deflection curves

(a)— $l=40\text{ mm}$; (b)— $l=50\text{ mm}$; (c)— $l=60\text{ mm}$.

裂纹逐渐扩展时, 产生相同挠度所需的荷载小于无裂纹时的荷载. 这也是测试曲线和模拟曲线之间的差异的原因.

4 试验分析

4.1 原位图像分析

当偏移量 $\Delta=2\text{ mm}$ 时, 在不同跨距 l 下, 45

号钢在 $0\sim5.0\text{ mm}$ 弯曲变形过程中, 原位观测点的裂纹扩展状态与荷载 – 挠度曲线的关系如图 7 所示. 点 P_1, P_2, P_3 和 P_4 是原位图像点. 可见, 在同一偏移量下, 随着挠度的增加, 裂纹萌生越明显; 当跨距增大时, 材料裂纹萌生需要较大的挠度. 在点 P_2 , 在跨距 40 和 50 mm 的试件上可以看到明显的裂纹萌生. 在点 P_3 , 跨距为 60 mm 的裂纹萌生才是可见的. 当到达点 P_4 时, 可以看到各

试件上明显的裂纹扩展. 随着压头接触面积的逐渐增大, 可以观察到在裂纹萌生阶段产生几个微小裂纹. 原位图像显示了材料表面的显著变化. 在准静态试验过程中, 跨距或偏移量越大, 裂纹越小.

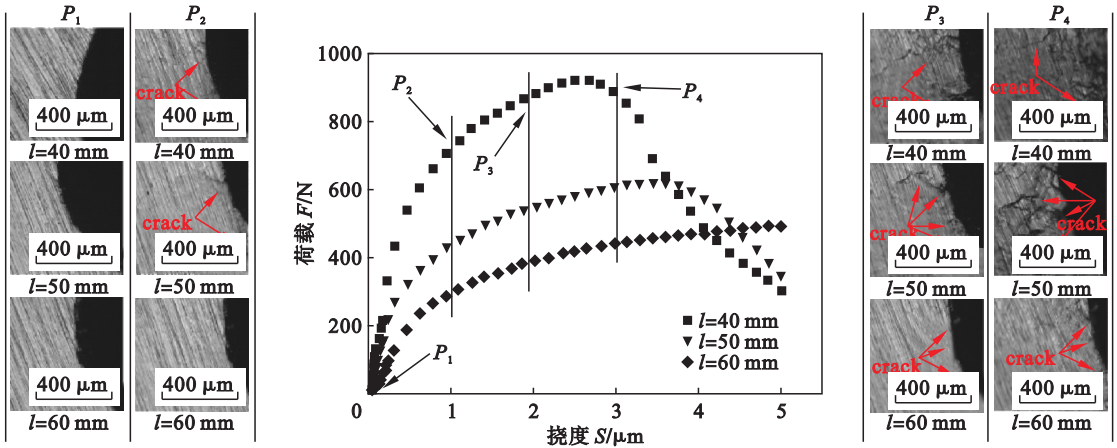


图 7 V 型缺口点的原位图像
Fig. 7 In-situ images of V-notch point

图 7 中裂纹的萌生和扩展过程表明: 裂纹萌生初期存在较多细小裂纹, 随着荷载的增加, 裂纹沿主裂纹方向扩展. 当弯曲挠度加载到点 P_2 时, 跨距为 60 mm 的试件没有萌生裂纹. 因此, 加载同样的挠度下, 较小跨距的结构具有较强的承载能力. 原位图像中的黑色区域是 V 型缺口位置. 从 P_3, P_4 可以看出, 由于原位透镜跟随裂纹产生位置, 导致原位观测位置发生变化. 因此, 通过对 von Mises 应力云图的仿真分析得到裂纹萌生位置的方法是有效的.

4.2 原位图像在挠度为 5 mm 时裂纹分析

如图 8 所示, 当挠度为 5 mm 时, 裂纹萌生和扩展路径随偏移量和跨距的变化而变化. 裂纹萌生发生在 V 型缺口尖端的薄弱位置, 并且向载荷作用点方向变化.

在裂纹扩展过程中, 由法向应力而不是剪切应力支配, 即 I 型分量和 II 型分量支配裂纹扩展角和材料的承载能力. 从跨距 60 mm 的图像可以看出, 在裂纹萌生时存在很多细小裂纹. 从裂纹扩展的原位图像来看, 裂纹开始时 II 型分量大于 I 型分量, 越小的跨距下, 材料的承载能力越强. 当 l 为 40 mm 时, 角 α 随最大裂纹偏移量的增大而增大, 即 $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \alpha_4$. 当 l 为 50 mm 时, 扩展角也增大, 即 $\beta_1 < \beta_2 < \beta_3 < \beta_4$. 在挠度加载过程中, 随着偏移量的增大, 同一跨距的载荷将增大. 不同跨距对裂纹扩展角的影响也比较明显. 随着跨距的增加, 材料裂纹萌生时需要较大的挠度. 这主要是因为弯曲力矩随着曲率的减小而减小. 裂纹扩展角由 I 型分量和 II 型分量共同决定. 在相同的偏移量下, 跨距越小裂纹扩展角越大. 偏移量越大, 裂纹

扩展角越大. 试样的断裂是由正应力控制的.

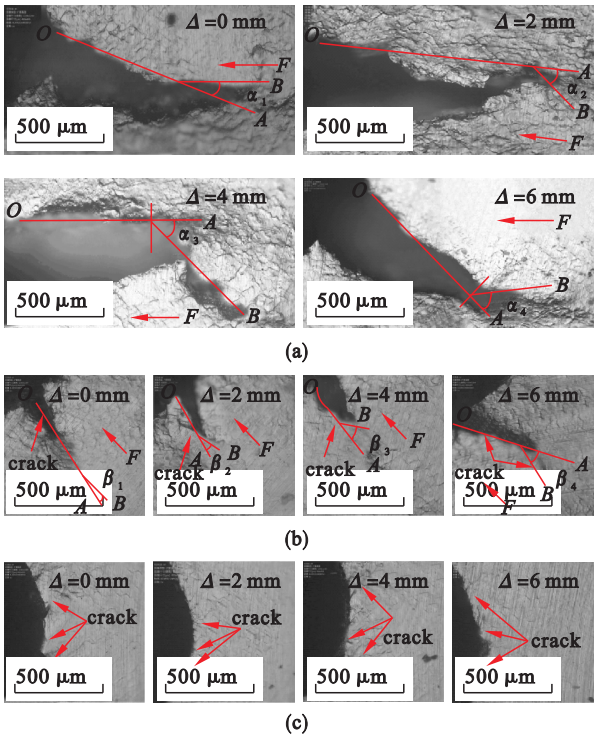


图 8 主裂纹原位图像
Fig. 8 In-situ images of main cracks at notch
(a)— $l=40\text{ mm}$; (b)— $l=50\text{ mm}$; (c)— $l=60\text{ mm}$.

由表 2 可知, 随着偏移量 Δ 与跨距 l 比值的增加, 裂纹扩展角增大. 该数据与理论分析结论相一致. 并且试验获得的裂纹扩展角数值小于仿真云图中的最小塑性区半径方向, 原因是: 裂纹萌生阶段产生多条裂纹, 致使主裂纹处的应力下降, 并且裂纹的扩展受材料晶界的影响; 在弯曲试验过程中, 随着移动压头的运动, 塑性区半径的方向与力作用线方向的夹角也在减小.

表 2 试验变量与裂纹扩展角数值				
Table 2 Data of test variables and crack angles				
$\frac{l}{\text{mm}}$	$\frac{\Delta}{\text{mm}}$	Δ/l	裂纹扩展方向	最小塑性区 半径方向
40	0	0	0°	0°
	2	0.05	22.3°	32.7°
	4	0.1	33.4°	43.8°
	6	0.15	48.2°	58.1°
50	0	0	0°	0°
	2	0.04	17.3°	24.6°
	4	0.08	28.1°	33.2°
	6	0.12	39.6°	46.7°

5 结 论

45 号钢 V 型缺口试件在不同偏移距和跨距下的三点弯曲试验中表现出不同的承载能力. 同时,由原位图像可知,由于法向应力的作用,同一跨距下的裂纹角随偏移量的增加而增大;在同一偏移量下,裂纹角随跨距的增大而减小. 在相同的弯曲变形作用下,载荷随偏移量的增大而增大,随跨距的增大而减小. 因此,本研究对确定结构支撑位置和损伤源的确定具有指导意义.

参考文献:

[1] Sunnegardh-Gronberg K,Peutzfeldt A,van Dijken J W V. Flexural strength and modulus of a novel ceramic restorative cement intended for posterior restorations as determined by a three-point bending test [J]. *Acta Odontologica Scandinavica*,2003,61(2):87 – 92.

[2] Wang N Z,Chen X,Li A. Three-point bending performance of a new aluminum foam composite structure [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*,2016,26(2):359 – 368.

[3] Xu S L,Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture. Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams[J]. *International Journal of Fracture*,1999,98(2):151 – 177.

[4] Caminero M A,Rodriguez G P,Munoz V. Effect of stacking sequence on Charpy impact and flexural damage behavior of composite laminates [J]. *Composite Structures*,2016,136(1):345 – 357.

[5] Swetha C,Sato N,Folke T. Fracture toughness and failure mechanism of graphene based epoxy composites [J].

Composites Science and Technology,2014,97(16):90 – 99.

[6] Hou P L,Zhao H W,Ma Z C. Influence of punch radius on elastic modulus of three-point bending tests[J]. *Advances in Mechanical Engineering*,2016,8(5):1 – 8.

[7] Liu C,Du D D,Li H G. Interlaminar failure behavior of GLARE laminates under short-beam three point bending load [J]. *Composites Part B:Engineering*,2016,97(15):361 – 367.

[8] Zuo J P,Wang X S,Mao D Q. SEM in-situ study on the effect of offset-notch on basalt cracking behavior under three-point bending load [J]. *Engineering Fracture Mechanics*,2014,131(1):504 – 513.

[9] Xeidakis G S,Samaras I S,Zacharopoulos D A. Trajectories of unstably growing cracks in mixed mode I-II loading of marble beams[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,1997,30(1):19 – 33.

[10] 李一凡,董世明,黎坤运. 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 Yi-fan, Dong Shi-ming, Li Kun-yun. Numerical simulation and experimental study of three-point bending specimen's I / II mixed mode fracture [J]. *Experimental Mechanics*,2018,33(4):557 – 566.)

[11] 夏雨,黄山,聂宏涛. 基于塑性损伤模型的三点弯曲梁裂缝扩展规律研究[J]. *广西大学学报(自然科学版)*,2017,42(3):1170 – 1178.

(Xia Yu, Huang Shan, Nie Hong-tao. Research of dynamic crack propagation of three-point bending beam based on damage model[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*,2017,42(3):1170 – 1178.)

[12] 朱万成,唐春安,杨天鸿. 偏三点弯曲岩石试件中裂纹扩展过程的数值模拟[J]. *东北大学学报(自然科学版)*,2002,23(6):592 – 595.

(Zhu Wan-cheng, Tang Chun-an, Yang Tian-hong. Numerical simulation of crack growth process in rock specimens with partial three-point bending [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*,2002,23(6):592 – 595.)

[13] Khan S,Khraisheh M K. A new criterion for mixed mode fracture initiation based on the crack tip plastic core region [J]. *International Journal of Plasticity*,2004,20(1):55 – 84.

[14] Hou P L,Fan Z Q,Zhang L, et al. An in situ three-point bending study on pre-notch 7075 aluminium alloy with acoustic emission[J]. *Materials Transactions*,2015,56(12):1977 – 1983.

[15] 盖尔 J M,古德诺 B J. 材料力学[M]. 北京:机械工业出版社,2011.

(Gere J M, Goodno B J. Strength of materials[M]. Beijing: China Machine Press,2011.)

[16] Meyers M A,Chawla K K. Mechanical behavior of materials [M]. Cambridge: Cambridge University Press,2009.

[17] 樊兆馥. 机械设备安装工程手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2004.

(Fan Zhao-fu. Mechanical equipment installation engineering handbook[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2004.)