

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.05.011

基于数字图像相关的 PMMA 有限宽板圆孔应力集中研究

刘雯雯,王得志,段琨煜,王志

(郑州大学力学与安全工程学院,郑州 450001)

摘要: 有机玻璃[聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)]因其优异的性能在许多领域都得到广泛应用,以其为原材料的开孔构件会因孔边应力集中而导致结构的强度降低甚至失效。目前对于无限大板下圆孔应力集中的理论分析已经成熟,但对于有限宽板,由于自由边界和有限区域的存在,仍难以对圆孔孔边的应力分布进行精确计算。为了探究带孔 PMMA 有限宽板的孔边应力集中规律,针对 PMMA 材料,通过数字图像相关(DIC)对有限宽板下不同直径的圆孔孔边应力集中分布规律进行研究,实验结果表明:在固定板宽的情况下,随着孔径的增加,孔边最大应力集中系数提高,但圆孔远端应力低于板件所受平均应力,从而出现孔边应力趋于线性分布的现象。结合应力流原理对该现象进行了分析,并基于实验数据对有限宽板修正解进行验证,确定了有限宽板修正解的适用范围为:孔径/板宽之比 $Q \leq 0.3$ 。考虑到离面位移对 2D-DIC 测量小变形的应变带来的误差,结合孔边区域应变电测法与 2D-DIC 对比试验结果,提出了一种依据离面影响因数来确定取值范围的方法,从而获得准确的应变数据。

关键词: 数字图像相关;聚甲基丙烯酸甲酯;应力集中;圆孔;有限宽板

中图分类号: O343.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)05-0077-08

Research on stress concentration in circular holes under finite-width PMMA plate based on digital image correlation

LIU Wenwen, WANG Dezhi, DUAN Kunyu, WANG Zhi

(School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou 450001, China)

Abstract : Polymethylmethacrylate (PMMA) is widely used in many fields due to its excellent properties, and the open-hole components using it as the material can lead to the strength reduction or even failure of the structure due to the stress concentration at the hole edge. The theoretical stress concentration analysis in circular holes under the infinite plate was well established. However, for the finite-width plate, it is still difficult to accurately calculate the stress distribution at the hole edges of circular holes due to the existence of free boundaries and finite regions. To investigate the stress concentration law at the hole edge of PMMA finite-width plate with holes, the stress concentration distribution law at the hole edge of circular holes with different diameters under the finite-width plate by digital image correlation (DIC) for PMMA material was explored. The experimental results indicate that in a fixed width of the plate, with the increase of the diameter of the holes, the maximum stress concentration factor of the hole edge is increased, but the stress at the distal end of the holes is lower than the average stress applied of the plate, thus the phenomenon of linear distribution of the hole edge stresses appears. This phenomenon was analysed using the principle of stress flow, and based on the experimental data to validate the finite-width plate revised solution, it was determined that the applicable range of the finite-width plate revised solution is: ratio of diameter/plate-width $Q \leq 0.3$. Considering the error brought by off-surface displacement to the strain of small deformation measured by 2D-DIC, combining the results of the comparison test between the strain gauge and 2D-DIC in the area of the hole edge, a method to determine the range of values based on the off-surface influence factor was proposed, to obtain the accurate strain data.

Keywords : digital image correlation ; polymethyl methacrylate ; stress concentration ; circular hole ; finite-width plate

基金项目: 国家自然科学基金项目(52303047, 52178257)

通信作者: 刘雯雯, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光学测试方法的研究与应用工作

收稿日期: 2025-02-22

引用格式: 刘雯雯, 王得志, 段琨煜, 等. 基于数字图像相关的 PMMA 有限宽板圆孔应力集中研究[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(5): 77-84.

LIU Wenwen, WANG Dezhi, DUAN Kunyu, et al. Research on stress concentration in circular holes under finite-width PMMA plate based on digital image correlation[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5): 77-84.

塑料工业的快速发展为现代社会带来了轻量化、多功能化和低成本的材料解决方案。其中,聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),以其高透明度、优异的耐候性和易加工性,在航空航天、军工、汽车等工程领域得到了广泛应用,包括潜艇观察窗^[1]、复合装甲^[2]、汽车外饰^[3]和飞机座舱盖^[4]等。然而,随着应用领域的不断拓展,PMMA 构件面临的工况也日益复杂,例如经常会作为开孔构件进行使用。而开孔会造成孔边区域的应力集中,从而减少构件的寿命甚至造成结构的破坏。目前已有许多学者针对开孔结构问题进行了研究。刘欢等^[5]提出了一个理论模型,用于分析远程双轴载荷作用下有限厚度的圆孔板中的应力集中;董治男等^[6]基于 Mori-Tanaka 方法,预测了单向和二维 2 种分布形式的短纤维复合材料应力-应变曲线,并通过试验方法分析不同区域纤维取向对开孔板力学性能的影响;盖迪等^[7]对湿热环境下不同宽径比的带孔 CFRP 层合板进行了拉伸实验,研究了其破坏形貌、应力-应变曲线以及强度退化情况;鲁晓峰等^[8]通过应变电测法测量了在拉伸作用下孔径玻纤拉挤带孔板的应力集中情况,求出了孔边特定点的应力情况。Zhang 等^[9]研究了位置角对带双孔的 CFRP 层压板的拉伸性能以及应力集中的影响。

数字图像相关技术(DIC)是一种非接触的测量方法,有着全场测量、对环境要求低等特点,不少学者也利用该技术对圆孔的应力集中进行了研究^[10-13]。

然而,目前对于带孔板的应力集中实验研究大都基于无限大板的条件下进行,且研究的重点集中在孔边的应力集中处,很少对应力分布的情况进行讨论。因此,笔者对不同孔径圆孔的有限宽板进行单轴拉伸实验,通过数字图像相关技术获得试样的应变分布,得到应力集中系数,结合应力流理论对不同的孔径-板宽比下圆孔对应力集中的影响规律进行分析。同时,针对孔边区域的离面位移,提出了一种有效的取值方法进行了准确取值。

1 基本原理

1.1 DIC 原理

DIC 是一种非接触、全场性的力学测量技术,如图 1 所示,在参考图像中的感兴趣区域(ROI)内选定某一计算点 $P(x, y)$, 并以其为中心建立计算子区。假设变形前后计算子区的灰度不发生改变,且试样被处理为随机散斑,可认为不同计算子区的灰度值

各不相同,那么在变形后的散斑图像中以该计算子区为窗口寻找变形后的相似点 $P'(x', y')$, 即可获得该点的位移量,通过计算得到 ROI 内所有计算点的位移值,即可获得 ROI 的位移场和应变场。

除此之外,由于孔洞内的背景噪声会发生变化,导致 DIC 会将背景噪声的变化当作变形信息一起记录并进行计算,从而产生错误的位移和应变数据。因此,在对图像分析前,还需基于形态学填充法对图像进行预处理^[14-15],即将孔洞内的区域分割出来,将该区域的像素值标记为零,在后续计算过程中该区域不参与相关计算,从而提高 DIC 的计算速度和对孔洞边缘应变的计算精度。

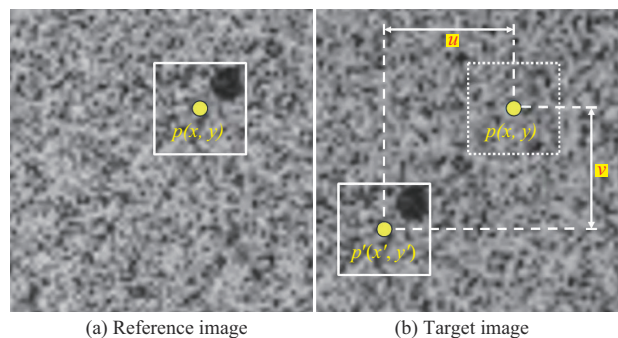


图 1 数字图像相关原理图

Fig. 1 Schematic of DIC

在对比参考图像和变形图像时,DIC 需借助相关函数来评价对比子区的相似程度。考虑到相关函数需具有可靠性、抗干扰性,笔者采用零均值归一化互相关函数^[16]进行分析,见式(1)。

$$C = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M (f(x_i, y_i) - \bar{f})(g(x'_i, y'_i) - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M (f(x_i, y_i) - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M (g(x'_i, y'_i) - \bar{g})^2}} \quad (1)$$

式中: $(2M+1) \times (2M+1)$ 为矩形计算子区的大小; $f(x_i, y_i)$ 为参考图像中计算点 (x_i, y_i) 处的灰度值; $g(x'_i, y'_i)$ 为变形图像中计算点 (x'_i, y'_i) 处的灰度值; $\bar{f}$ 和 $\bar{g}$ 分别为参考图像和变形图像中计算子区的平均灰度值。 C 代表了变形前后图像的相关性,其取值区间为 $[0, 1]$, 当函数结果为 1 时,表示参考点和变形点完全相关,成功匹配;反之,当函数结果为 0 时,参考点和计算点完全不相关。

1.2 带圆孔板件的孔边应力分布与应力集中系数

根据弹性力学,一块带有圆孔的无限大薄板在两端无穷远处受到均布拉应力 q 的作用下,以圆心

为原点建立直角坐标系,如图2所示。

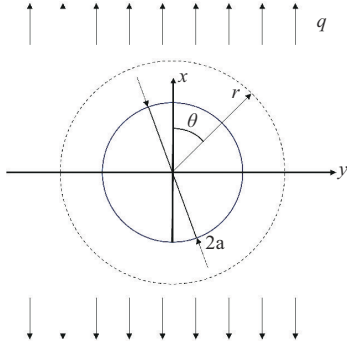


图2 无限大平板中圆孔的应力分布图

Fig. 2 Stress distribution schematic of circular hole in infinite plate

则圆孔附近的应力表达式见式(2)。

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{q}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{q}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta = \frac{q}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{q}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} = \frac{q}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ 分别表示径向应力、环向应力和剪切应力; θ 为与拉伸载荷方向的夹角; q 为薄板远端受到的拉应力; a 为圆孔的半径; r 为圆孔周围区域上任意一点与圆心的距离。

在所有应力中,最大应力为环向应力,其分布在圆孔左右两侧,根据式(2)可得出孔边沿着 x 轴的环向应力分布,见式(3)。

$$\sigma_\theta|_{\theta=90^\circ} = \frac{q}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{2r^4} \right) \quad (3)$$

由上式可得出最大应力值为 $3q$,且应力值在 x 轴上随着远离圆孔逐渐减小并在无穷远处趋向于 q 。

对于带有圆孔的无限大板,可用弹性力学理论求出其精确解。然而,对于带有圆孔的有限宽板来说,板件带有自由边界且属于有限区域,圆孔处横截面积有限,这就使得带有圆孔的有限宽板的孔边应力精确解难以求出。对此,有学者从无限大板和有限宽板的圆孔孔边应力分布的相似性出发^[17],对应力分布函数引入修正系数,则有限宽板下圆孔孔边沿着 x 轴的应力分布函数见式(4)。

$$\bar{\sigma}_\theta|_{\theta=90^\circ} = \mu \left[\frac{q}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{2r^4} \right) \right] \quad (4)$$

式中: μ 为孔边应力分布函数的修正系数,为一

待定参数。

假设板件宽度为 B ,圆孔半径为 a ,板件受到均布载荷 q 的作用,由于圆孔截面处的应力之和应等于板件端部所加载荷,则有式(5)。

$$\int_a^{\frac{B}{2}} \bar{\sigma}_\theta|_{\theta=90^\circ} dr = \mu \int_a^{\frac{B}{2}} \sigma_\theta|_{\theta=90^\circ} dr = \frac{qB}{2} \quad (5)$$

对上式进行积分并化简,可得式(6)。

$$\begin{cases} \mu = \frac{1}{1 - \frac{1}{2}(Q^2 + Q^4)} \\ Q = \frac{2a}{B} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Q 为带圆孔有限宽板的特征参数。

为更好地探究有限宽板下的孔边应力集中规律,还引入应力集中系数(SCF,简称 K)进行分析。SCF反映着材料的应力集中程度,指的是在弹性范围内,应力集中处的最大应力值 $\sigma_{\max}$ 和选取的基准应力值之比,笔者选取试样实验段两端的截面作为基准面,则该截面受到的拉应力 q 作为基准应力,见式(7)。

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{q} \quad (7)$$

1.3 应力流原理

应力流理论常常被用于解释缺口的应力集中现象^[18-19],如图3所示,当带孔板件的两端受到均布载荷 q 的作用时内部会产生应力。应力在介质内部中传递、转移,那么与磁感线类似,可将应力的传递比作水流,即应力流。当应力流在物体内部穿行时若遇到孔洞,则流动的方向会向孔洞两侧绕行,造成孔洞附近的应力流之间的距离减小,从而形成应力集中。

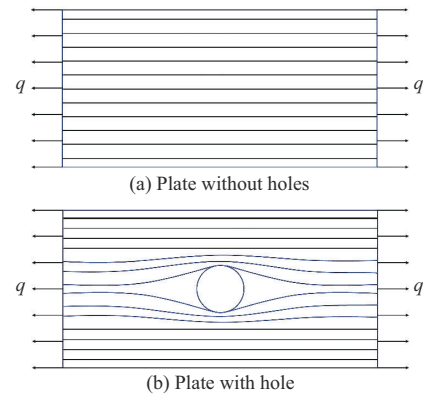


图3 应力流模型

Fig. 3 Stress flow model

2 实验部分

2.1 主要原材料

有机玻璃浇铸件,其材料为PMMA,密度为 1.16 g/cm^3 ,厚度为2 mm,温州御涂达有限公司。

2.2 主要仪器及设备

电子万能试验机:WDW-5C,上海华龙测试仪器有限公司;

CCD数字摄像机:堡盟电子有限公司;

DIC软件:上海大学。

2.3 试样制备

拉伸性能测试试样参照GB/T 1040.1-2018标准,并在同一板材上分别沿着 0° 、 45° 和 90° 进行机加工取样。

带孔试样由有机玻璃板材按照图4所示尺寸进行机加工得到,试样分为5组,每组试样的圆孔直径分别为2,4,6,8,10 mm。试样经过喷漆处理,表面带有高对比度的白底黑点随机散斑。

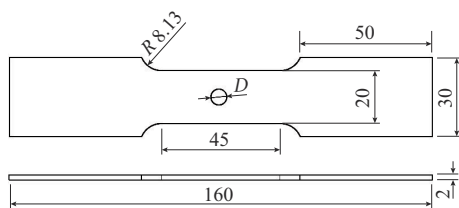


图4 试样尺寸图(mm)

Fig. 4 Schematic of specimen dimension(mm)

2.4 实验方法

拉伸性能以及带孔试样的准静态拉伸参照GB/T 1040.2-2006进行,加载速率为 1 mm/min ;对于带孔试样的拉伸实验,相机放置在试样带有散斑面的前方,相机镜头距试样表面约50 cm,并保持与试样表面平行,如图5所示。在对图像进行形态学预处理后,沿着孔边的取值线进行应变取值,每个取值点的间隔为1个像素,如图6所示。

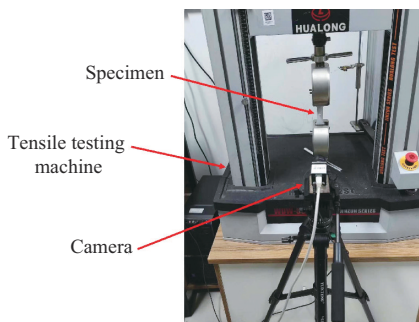


图5 DIC系统及万能试验机

Fig. 5 DIC system and universal testing machine

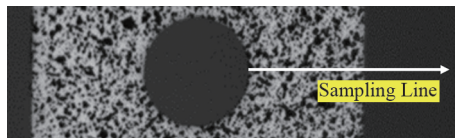


图6 应变取值线示意图

Fig. 6 Schematic of strain sampling line

对于DIC测量结果的精度验证是必要的。由于试样的厚度远远小于试样的长度和宽度,可忽略厚度对应变的影响,试样的正面与背面的平面应变是相同的。因此,还引入了电测法进行对比试验。如图7所示,在试样的背面粘贴应变片,实验过程中应变片与DIC进行同步测量。实验结束后,通过DIC处理软件在与应变片对应的试样正面区域中心位置处,设置与应变片相同长度的虚拟引伸计,将应变片的结果与虚拟引伸计的测量结果进行对比。

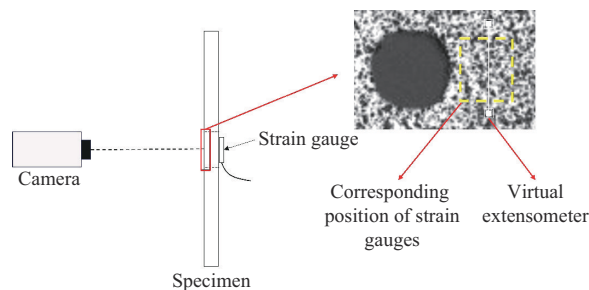


图7 对比实验示意图

Fig. 7 Schematic of comparison experiment

3 结果与讨论

3.1 有机玻璃原材料的拉伸测试分析

不同取样角度下试样的应力-应变曲线以及失效应力-应变关系图分别如图8和图9所示。可以发现,不同角度下PMMA试样的应力-应变曲线并无太大区别,且其失效应力-应变的分布十分集中。据此可推断,该PMMA的分子链为随机排列,因此各个方向上的物理性能一致,为各向同性材料。除此

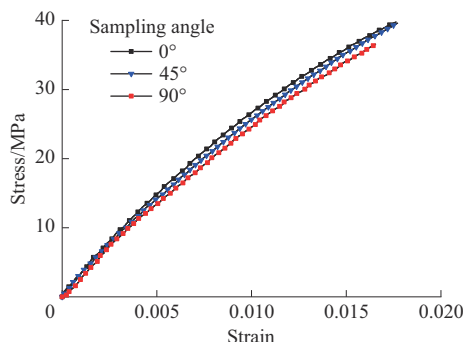


图8 不同角度下PMMA试样的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of PMMA specimens at different angles

之外,还得到PMMA的弹性模量2.81 GPa、泊松比0.3,以及拉伸强度39.12 MPa。

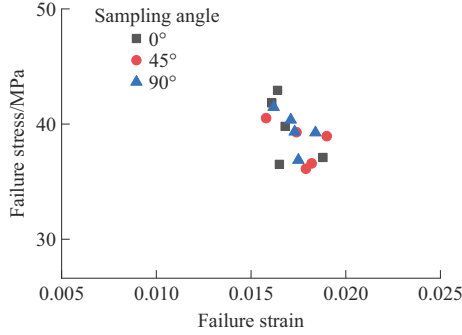


图9 不同角度下PMMA试样的失效应力-应变关系

Fig. 9 Failure stress-strain relationship of PMMA specimens at different angles

3.2 对比实验的结果分析

不同孔径下,孔边区域应变测量的对比如图10所示,并将应变片所测应变作为真实应变。由图10可以看出,在较小应变值的范围内,2D-DIC与应变片的误差与波动性较大。而在达到一定的应变值后,DIC与应变片的误差达到最小,保持稳定在10%及以下,笔者将该应变值定义为最小取值应变 ε_M 。

图11为不同孔径所对应的最小取值应变 ε_M 。

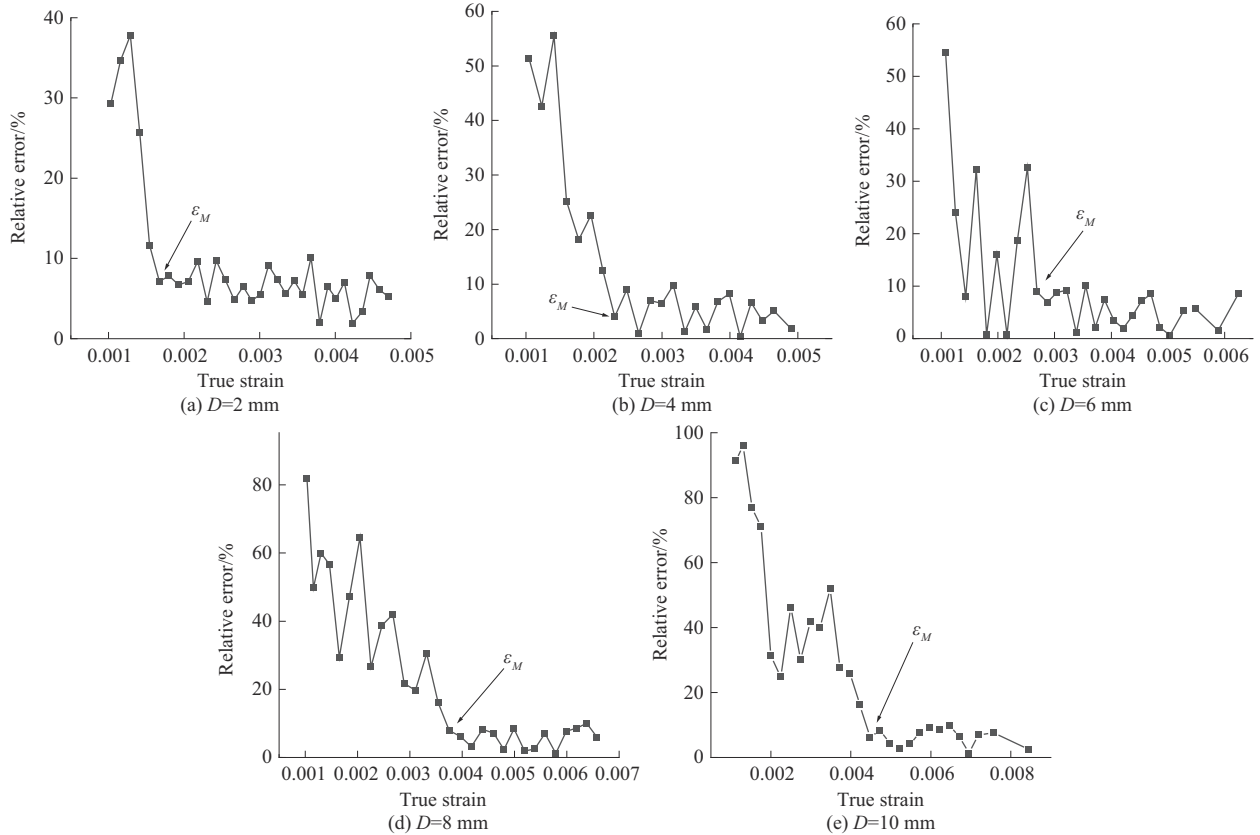


图10 不同孔径下DIC与应变片测量的对比结果

Fig. 10 Comparison of DIC and strain gauge measurements at different diameters of holes

根据Sutton^[20]的研究,测量平面产生的离面位移会使得2D-DIC难以对小变形进行准确测量。若要用2D-DIC测量小变形($\varepsilon \leq 0.001$),最大离面位移和相机光心到试样距离的比值需远小于试样的应变。由图11可看出,即使是直径为2 mm的孔径,其对应的 ε_M 也大于0.001,且 ε_M 随着孔径的增大而提高。由于本文已对图像进行预处理,可排除孔洞的背景噪声产生的误差。因此,笔者推断,孔边区域由于应力集中引起的变形会进一步加剧离面位移的产生。

对于离面位移对测量的影响可以用3D-DIC来解决,然而,在一些情况下,由于场地和实验条件的限制,2D-DIC相较于3D-DIC更有优势。此外,有学者利用双反射镜成像技术^[21],实现单相机的3D-DIC测量,但操作繁琐,计算量较大。倘若不要求对小应变的测量,那么只需确定2D-DIC的准确应变取值范围。对此,笔者提出一种2D-DIC孔边应变准确取值的简便方法,定义一种离面影响因数 $\eta = \frac{D}{S}$,其定义为圆孔直径 D 与相机镜头到试样表面距离 S 之比,用于表征圆孔尺寸对离面位移的影响,而本文实验过程中相机与试样的距离一直保持在50

cm左右。将 η 与 ε_M 的关系进行拟合,得到图12及式(8),那么在使用2D-DIC对圆孔孔边进行测量时,通过计算 η 得到相应的 ε_M ,在大于 ε_M 的范围即可得到准确的孔边应变数据。

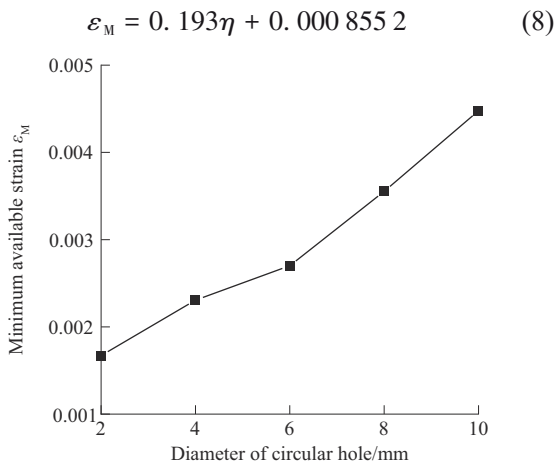


图11 圆孔尺寸与 ε_M 的关系

Fig. 11 Relationship of circular hole's diameter and ε_M

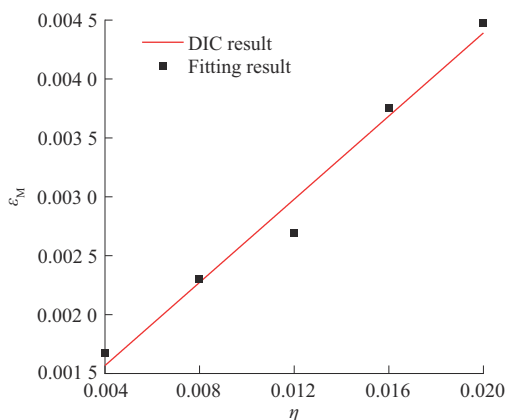


图12 η 与 ε_M 关系的拟合结果

Fig. 12 Fitting results of relationship between η and ε_M

3.3 有限宽板下圆孔孔边的应力集中系数分布

实验结果方面,依据3.2节,在孔边应变大于最小取值应变的范围进行取值。由于PMMA为各向同性材料,且实验过程中材料一直处于弹性范围,可直接通过胡克定律求出实际情况下的孔边SCF分布,并将式(7)与式(4)结合,得到式(6)中不同特征参数 Q 在有限宽板下圆孔孔边的 K 值修正解分布以进行对比。最后得到DIC测量结果与有限宽板修正解的对比,如图13所示。

可以看出,当 Q 为0.1,0.2时,DIC测量结果与修正解十分吻合,而此时的修正解与无限大板下孔边的应力分布情况基本一致,这一现象符合局部性原则,即圆孔对应力集中的影响主要集中在距孔边

1.5倍孔径的范围内(即 $Q < 0.25$),在此范围外的圆孔对应力集中的影响可忽略不计,此时带圆孔的有限宽板可看作无限大板的情况。

值得一提的是,目前对有限宽板孔边应力分布提出的修正解,实质上是有限宽板下的应力分布进行范围限制,再将无限大板下的孔边应力分布水平乘以某一系数,从而实现圆孔截面应力总和与板件所载荷的平衡。然而,在实际情况下,随着 Q 值的增加,孔边的 K 值分布更趋向于线性分布:当 Q 为0.3和0.4时,实验得出 K 值在距离孔边0~5 mm的范围内明显大于无限大板时的 K 值,但与修正解的结果相比仍有着较高的一致性,该范围内修正解还能对孔边的应力分布进行准确描述;超出了该范围后,实验所得的应力集中系数开始下降至低于理论解。在 $Q=0.5$ 时,实验结果的 K 值分布已接近线性分布,此时即使是修正解也不符合实际情况。

除此之外,为进一步验证实验结果的有效性,本文还将实验结果与公式(9)式所示经验公式^[22]的结果进行对比。

$$\begin{cases} K' = 3 - 3.14\left(\frac{D}{W}\right) + 3.667\left(\frac{D}{W}\right)^2 - 1.527\left(\frac{D}{W}\right)^3 \\ K = K' \frac{W}{W - D} \end{cases} \quad (9)$$

式中: K' 是以圆孔截面为基准面时的孔边最大应力集中系数; K 是以板件在所载荷处的截面为基准面时的孔边最大应力集中系数; D 和 W 分别为圆孔直径和板件宽度。

对比结果见图14和表1,实验结果与经验公式的平均误差为4.69%,这也进一步说明了实验结果的有效性。

根据1.3应力流原理,在板件宽度有限的情况下,留给应力流动的区域也是有限的,随着孔径的增加,孔洞中心剖面留给应力流动的面积也进一步被压缩,孔洞附近的应力流会更密集,应力流的间距也会更小,即特征参数的增大造成孔边最大应力集中系数 $K_{\max}$ 的增大。而对于有限宽度下圆孔对远端应力流产生影响,由表1可知,当 $Q \geq 3$ 时,距孔洞远端处的最小应力集中系数 $K_{\min}$ 明显小于1,说明该处的应力值小于板件所受到的平均拉应力。笔者推测这是由于特征参数 Q 的增加使得圆孔更能吸引远处的应力流向孔边区域移动,从而导致圆孔附近区域的应力流更加密集、圆孔远处的应力流变得稀疏,最终导致了板件边缘处的 K 值小于1。

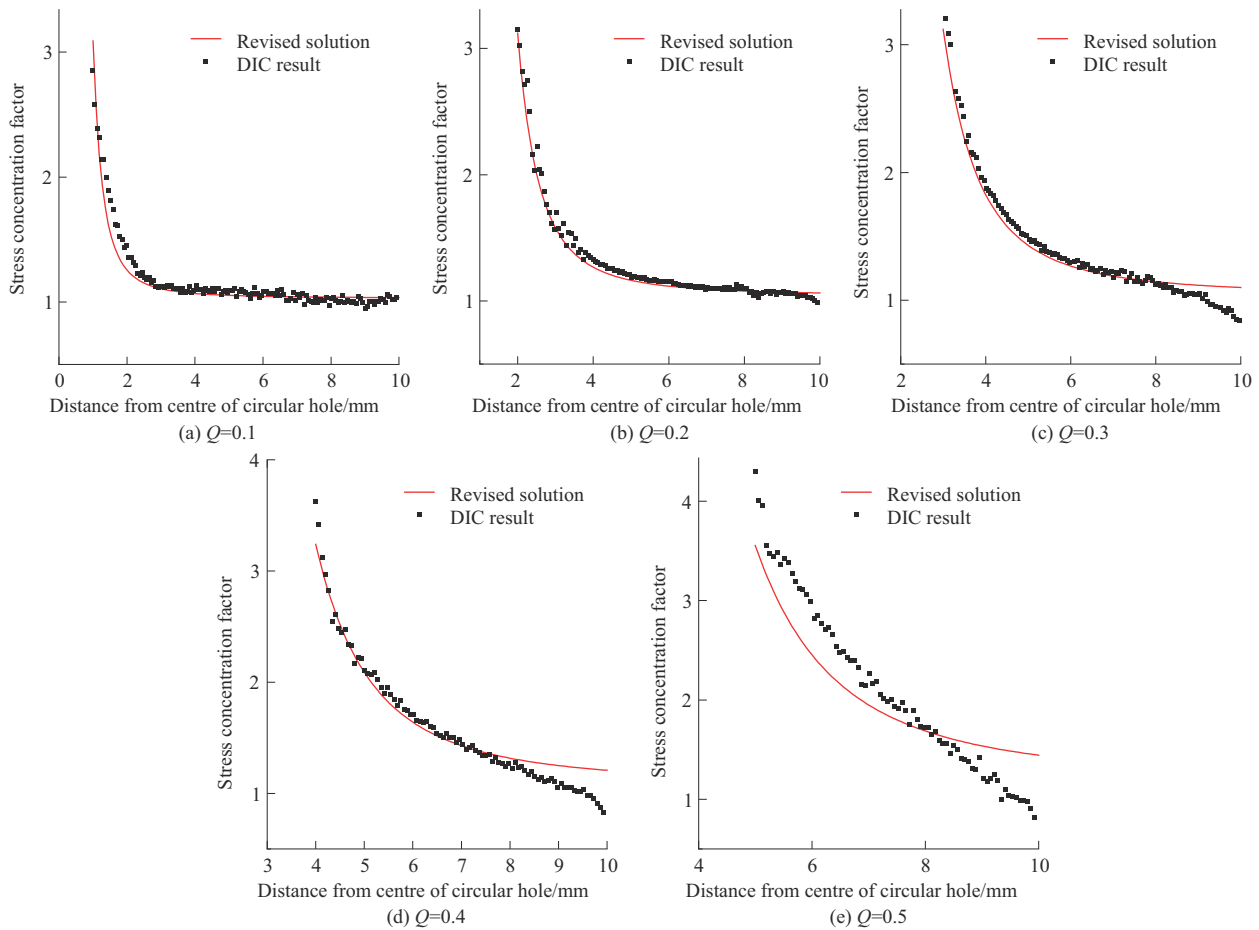
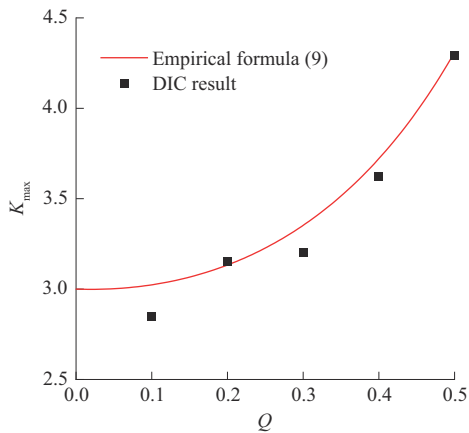
图13 不同 Q 值下圆孔孔边应力集中系数的分布Fig. 13 Distribution of stress concentration factor around circular holes at different Q 

图14 DIC结果与理论值的对比

Fig. 14 Comparison of DIC with oretical result

4 结论

通过2D-DIC研究了有限宽板下不同直径的圆孔对应力集中的影响规律,并与电测法进行对比,得出以下结论:

(1)圆孔变形会造成孔边区域产生离面位移,且离面位移与圆孔尺寸成正相关,从而影响二维DIC

表1 不同特征参数 Q 和不同位置下的应力集中系数

Tab. 1 Stress concentration factors for different characteristic parameters and different locations

Q	$K_{\max}$	$K_{\min}$	Relative error between $K_{\max}$ and empirical formula/%
0.1	2.85	1.02	5.74
0.2	3.15	0.99	5.40
0.3	3.20	0.86	4.55
0.4	3.62	0.83	2.73
0.5	4.29	0.81	5.04

Notes: $K_{\max}$ is the Maximum SCF of edge of circular hole; $K_{\min}$ is the minimum SCF of edge of specimen.

对孔边测量的精度。对此,提出了一种离面影响因数 η ,通过建立关系式确定离面影响因数所对应的最小取值应变,可得到二维DIC对孔边应变的准确取值范围。

(2)随着特征参数 Q 的增加,孔边的最大应力集中系数 $K_{\max}$ 也会随之增大,当 $Q \geq 0.3$,圆孔远端的应力值低于试样所受平均应力,且孔边的应力趋向于线性分布,因此有限宽板修正解只适用于 $Q \leq 0.3$

时的情况。该现象产生的原因是特征参数 Q 的增加使得圆孔对应力流的吸引力增大,造成了圆孔远端的应力流分布变得稀疏。

(3)本研究为有限宽板下不同孔径圆孔的孔边应力分布提供了数据支持,后续应继续深入针对有限宽板下圆孔孔边应力分布的理论研究,并开展有限宽板下圆孔孔边的结构优化和补强措施的研究工作。

参考文献

- [1] 郑梦瑶,吴国庆,姜旭胤,等.潜水器观察窗用有机玻璃的损伤与破坏行为[J].工程塑料应用,2023,51(2):126–132,144.
ZHENG Mengyao, WU Guoqing, JIANG Xuyin, et al. Damage and failure behaviors of PMMA used in deep-sea submersible observation windows[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2):126–132, 144.
- [2] 张彬,彭刚,冯家臣,等.弹道侵入下透明复合装甲动态变形参数的测量分析[J].工程塑料应用,2022,50(9):121–125,131.
ZHANG Bin, PENG Gang, FENG Jiachen, et al. Measurement and analysis of dynamic deformation parameters of transparent composite armor under ballistic penetration[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):121–125, 131.
- [3] 孟小林,张继祥,李义兵,等.汽车B柱外饰板双色注塑翘曲变形分析及工艺优化[J].工程塑料应用,2023,51(2):54–59.
MENG Xiaolin, ZHANG Jixiang, LI Youbing, et al. Warpage deformation analysis and process optimization of automotive B-pillar exterior panel with two-color injection[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2):54–59.
- [4] 于泽宗,芮涵钦,郑梦瑶,等.边缘连接结构对飞机座舱盖透明件拉伸及疲劳性能的影响[J].工程塑料应用,2024,52(12):144–151.
YU Zezong, RUI Hanqin, ZHENG Mengyao, et al. Influence of edge connection structure on tensile and fatigue properties of transparent parts of aircraft canopy[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12):144–151.
- [5] LIU H, DENG L, WANG W. 3D stress concentration around circular hole under remote biaxial loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 268. DOI: 10.19936/j.cnki.2096-8000.20230228.016.
- [6] 董治男,徐峰祥,郭巍,等.基于Mori-Tanaka方法的短纤维复合材料开孔板分析[J].中国塑料,2020,34(7):61–68.
DONG Zhinan, XU Fengxiang, GUO Wei, et al. Analysis of opening plate injection-molded by short-fiber-reinforced thermoplastic composites based on Mori-Tanaka method[J]. China Plastics, 2020, 34(7):61–68.
- [7] 盖迪,冯雪健,张磊,等.湿热环境下不同宽径比的CFRP层合板拉伸性能预测[J].塑料科技,2024,52(10):119–124.
GAI Di, FENG Xuejian, ZHANG Lei, et al. Prediction of tensile properties of CFRP laminates with different aspect ratios under hot and humid environments[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(10):119–124.
- [8] 鲁晓峰,李占营,杨玉荣,等.开孔玻纤拉挤板孔边应力集中[J].复合材料科学与工程,2023(2):122–125,132.
LU Xiaofeng, LI Zhanying, YANG Yurong, et al. Stress concentration at the hole edge of open-hole glass fiber reinforced pultrusion plate[J]. Composites Science and Engineering, 2023(2): 122 – 125, 132.
- [9] ZHANG J J, HE Y X, ZHANG G B, et al. Tensile behavior of double-hole CFRP composite with different holes position[J]. Applied Composite Materials, 2024, 31(3):983–1005.
- [10] 喻苏婷,蒋明.三维数字图像相关法在带孔洞试件力学行为研究中的应用[J].苏州科技大学学报(自然科学版),2022,39(1):41–46.
YU Suting, JIANG Ming. Application of 3D digital image correlation method in mechanical behavior of specimens with holes[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 39(1):41–46.
- [11] TREFNY F N, GLYDE M, HOSGOOD G, et al. Effect of plate length on construct stiffness and strain in a synthetic short-fragment fracture gap model stabilized with a 3.5-mm locking compression plate[J]. Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology, 2025, 38(2):63–70.
- [12] ZHANG S R, QIU S L, JIANG Q, et al. Mechanical and cracking behavior of granite specimens containing various inclusions[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 167. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2006.00246.x.
- [13] XIONG Z H, MENG Y, ZHAO C Y, et al. Fatigue performance investigation of perforated and bolted pultruded glass fiber reinforced polymer laminates based on experiment and digital images [J]. Journal of Composite Materials, 2024, 58(6):709–721.
- [14] WANG L, LIU G Y, XING T Z, et al. Boundary deformation measurement by mesh-based digital image correlation method[J]. Applied Sciences, 2021, 11(1). DOI:10.3788/CJL201946.1009002.
- [15] 赵杰,孙伟,徐中达,等.基于形态学预处理的数字图像相关方法研究[J].实验力学,2022,37(5):629–637.
ZHAO Jie, SUN Wei, XU Zhongda, et al. Study on the method of digital image correlation based morphological pre-processing[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(5):629–637.
- [16] PAN B, XIE H M, WANG Z Y. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching[J]. Applied Optics, 2010, 49(28). DOI:10.6052/1000-0879-11-388.
- [17] 张铮,王来.带孔有限宽板孔边应力集中系数的修正解法[J].力学与实践,2012,34(6):58–59.
ZHANG Zheng, WANG Lai. Modified solution of stress concentration factor at hole edge of finite width plate with hole[J]. Mechanics in Engineering, 2012, 34(6):58–59.

(下转第101页)