第11卷 第1期 复合材料学报 Vol.11 No.1
1994年 3月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA March 1994

预测复合材料缺口强度的场强法

姚卫星 颜永年 俞新陆

(南京航空学院飞机系，210016) (清华大学机械工程系，北京100084)

摘 要 本文以复合材料缺口附近的应力应变场为参量，提出了预测复合材料缺口强度的场强法，给出了一个估计复合材料缺口强度的普遍表达式，并由此导出了一个易于使用的工程估算方法。通过对两种材料四组实验结果的分析表明：场强法的预测结果是比较满意的。

关键词 复合材料层合板，缺口强度，场强法

1 引 言

复合材料缺口强度的估算是复合材料结构强度估计的基本问题之一。近二十年来已有大量的实验数据正式发表，并提出了不少的断裂准则[1]。然而至今尚无一种普遍适用于各种实验数据的断裂准则，这除了少数实验数据不可靠外，还因为与金属材料不同，复合材料由于试件的铺层、试件的形式等条件的不同而造成了不同的破坏机理。

本文以复合材料缺口附近的应力应变场来衡量复合材料受载的严重程度，提出了预测复合材料缺口强度的场强法，给出了一个估计复合材料缺口强度的普遍公式，并由此导出了一个易于使用的工程方法。将本文的方法与二种材料的实验数据进行了比较，结果表明场强法是一个广泛适用的方法。

2 场 强 法

场强法认为含应力集中的构件的破坏是由应力集中区的应力应变场造成的，而不仅仅是应力峰值点[2]。因此构件的缺口强度应与缺口附近的应力应变场有关。与点应力准则不同，场强法以缺口附近某一高应力应变区中的某个参数作为衡量缺口强度的指标。因此它较好地反映了缺口试件的特点。

纤维复合材料缺口试件或构件的破坏机理比较复杂，要想找出一个与破坏机理直接相连且具有普遍意义的参量来反映缺口的强度是十分困难的，但是本文认为作为一个可被"唯象"

本文1990年4月3日收到

地确定的宏观参量应具有下述特点：

1.能反映缺口附近的多向应力状态；

2.当缺口应力集中系数退化到$K_T=1$，这一参量应是多向应力状态下的破坏参量；

3.缺口的场强区域应在某种程度上反映复合材料破坏的损伤区，且它只与材料有关。

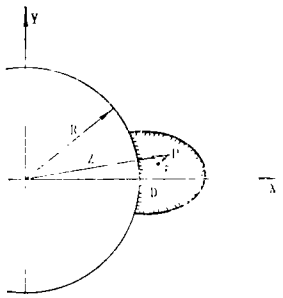

图1 场强法模型

为此可给出如下的缺口场强函数f_{RD}：

$$f_{RD}=\frac{1}{S}\int_D f(\vec{\sigma})\varphi(\vec{r})\mathrm{d}s \qquad (1)$$

式中的D是场强区域，S是区域D的面积，$\varphi(\vec{r})$是权函数，$f(\vec{\sigma})$是多轴应力下的破坏曲面，如对单向复合材料板可取$f(\vec{\sigma})$为$Tsai\text{-}Hill$多项式：

$$f(\vec{\sigma})=\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2+\left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2-\frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2}+\left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 \qquad (2)$$

式中的X、Y和S分别为复合材料的纵向、横向和剪切强度，显然对于光滑试件有断裂准则：

$$f(\vec{\sigma})=1 \qquad (3)$$

关于（1）式可作如下几点讨论：

（1）破坏曲面$f(\vec{\sigma})$

对单向板，破坏曲面$f(\vec{\sigma})$可采用（2）式或者$Tsai\text{-}Wu$张量多项式；对层合板应分层计算，可按首层破坏强度作为缺口强度，更细致的分析应考虑层间应力。在工程计算中，可将层合板作整体分析，则应按层合板理论，按首层破坏准则计算层合板的X、Y和S，并近似认为层合板的破坏曲面也为(2) 式。

（2）权函数$\varphi(\vec{r})$

权函数$\varphi(\vec{r})$的物理意义表示P点处的应力应变对峰值点（$\vec{r}=0$）处发生破坏所作的贡献。一般地缺口根部处的应力应变最严重，因此权函数$\varphi(\vec{r})$应满足下述几个基本条件：

(a) $0\leqslant\varphi(\vec{r})\leqslant 1$，且$\varphi(\vec{r})$关于$|\vec{r}|$广义单调降，

(b) $\varphi(0)=1$

(c) 当$K_T=1$时，$\varphi(\vec{r})\equiv 1$

由于层合板的性能和缺口的几何形状将影响缺口附近的应力应变场，所以权函数$\varphi(\vec{r})$是材料和几何形状的函数。按照上述几个性质可以构造出无穷多个权函数。作为一种近似可以认为场强区D内其它点对$\vec{r}=0$点的贡献只与距离$r=|\vec{r}|$有关，而与方向无关，并用其一阶近似来表示：

$$\varphi(\vec{r})=1-cr \tag{4}$$

(3) 断裂准则

对于光滑试件，$K_T=1$，由条件 (c)得 $\varphi(\vec{r})\equiv 1$，由于光滑试件中的应力场是均匀的，所以处处有$f(\vec{\sigma})=\mathrm{Const.}$，由 (1) 式得：

$$f_{RD}=f(\vec{\sigma}) \tag{5}$$

由 (3) 式可知当$f_{RD}=f(\vec{\sigma})\geqslant 1$时，光滑试件发生破坏。又因为 (1) 式同样适用于光滑试件和缺口试件，因此当缺口场强区中的场强函数f_{RD}满足：

$$f_{RD}\geqslant 1 \tag{6}$$

时，试件断裂。

(4) 区域D

复合材料缺口附近的真实损伤区是很难确切定义和确定的。如果认为场强区中其它点对峰值点的贡献只与距离有关，那么场强区D应为以峰值点为圆心的圆。如果认为场强区中其它点对峰值点的贡献与应变能密度有关，那么计算结果表明区域D近似为椭圆。为简单起见，本文取区域D为圆形。

(5) 讨论

考察 (1)式可以发现，点应力准则[3, 4]和平均应力准则[3, 4]只是场强法的特例。取区域D为$y=0$对称面上的一线段L，则(1)式可写为：

$$f_{RD}=\frac{1}{L}\int_{R}^{R+L} f(\vec{\sigma})\varphi(x)\mathrm{d}x \tag{7}$$

(Ⅰ)如果取$f(\vec{\sigma})=\dfrac{\sigma_y(x,0)}{\sigma_\circ}$，$\varphi(x)=1$，则可得到平均应力准则：

$$\sigma_\circ=\frac{1}{L}\int_{R}^{R+L}\sigma_y(x,0)\ \mathrm{d}x \tag{8}$$

式中的$\sigma_\circ$为光滑试件的破坏强度。

(Ⅱ) 如果取$\varphi(x)$ 为狄拉克δ函数，$\varphi(x)=\delta(x-d_\circ)\cdot L$，则可得到点应力准则：

$$\sigma_\circ=\sigma_y(d_\circ,0) \tag{9}$$

3 场强法的应用

3.1 Gr/Ep和Gl/Ep正交各向异性板中D和$\varphi(\vec{r})$的确定

文献[4] 给出了几组Gr/Ep和Gl/Ep 的缺口强度的实验结果。本文将层合板作为整体按

(1)式，并取 $\varphi(\vec{r})$ 为(4)式对场径D_0和衰减系数C作了分析计算。因为两种材料的试件均是π/4板，衰减系数C只与缺口形状有关，而场径D_0只与材料有关。按预测值与实验值平方误差最小得到的结果为：对 Gl/Ep，$D_0=0.85$mm，对 Gr/Ep，$D_0=0.92$mm。对圆孔，$C=0.70$，对裂纹$C=0.96$。图2为预测结果与实验结果的比较。并给出了按点应力准则和平均应力准则预测的结果。

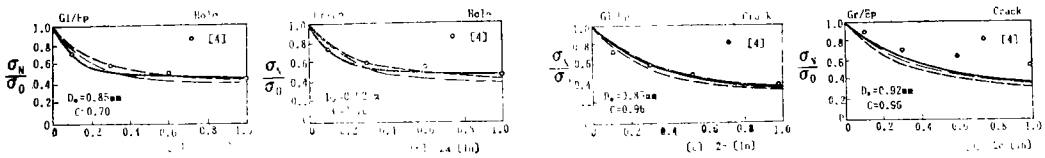

图2 预测结果与实验结果比较

3.2 缺口强度估计的工程表达式

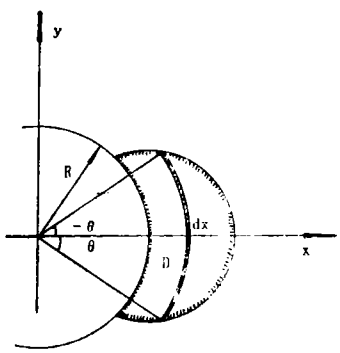

图3 工程估算法模型

实践中直接使用(1)式来估计缺口强度是很不方便的。下面根据场强法的概念导出一个缺口强度估计的工程表达式。(1)式可改写为（图3)

$$f_{RD}=\frac{1}{S}\int_{R}^{R+L}\left[\int_{-\theta(x)}^{\theta(x)} f(\vec{\sigma})\varphi(\vec{r})\mathrm{d}\theta\right]\mathrm{d}x \tag{10}$$

由积分中值定理，上式可写为：

$$f_{RD}=\frac{1}{L}\int_{R}^{R+L} f(\vec{\sigma})\psi(x)\mathrm{d}x \tag{11}$$

上式中$f(\vec{\sigma})$为破坏曲面，因为在$y=0$面上，主要应力为σ_y，所以可近似取 $f(\sigma)=\sigma_y/\sigma_0$，$\psi(x)$ 为权函数。对正交各向异性中心孔板，σ_y的近似表达式为：

$$\sigma_y=\sigma^{\infty}\left\{1+\frac{1}{2}\left(\frac{R}{x}\right)^2+\frac{3}{2}\left(\frac{R}{x}\right)^4-\left(K_T^{\infty}-3\right)\left[\frac{5}{2}\left(\frac{R}{x}\right)^6-\frac{7}{2}\left(\frac{R}{x}\right)^8\right]\right\} \tag{12a}$$

对正交各向异性中心裂纹板：

$$\sigma_y=\frac{x\sigma^{\infty}}{\sqrt{x^2-C^2}} \tag{12b}$$

一般地可写成$\sigma_y=\sigma^{\infty}\cdot\bar{\sigma}_y(x)$，则有：

$$f_{RD}=\frac{\sigma^{\infty}}{\sigma_0}\cdot\frac{1}{L}\int_{R}^{R+L}\bar{\sigma}_y\psi(x)\mathrm{d}x \tag{13}$$

当$f_{RD}=1$时，试件破坏，缺口强度$\sigma_N=\sigma^{\infty}$，所以有：

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_N}=\frac{1}{L}\int_R^{R+L}\sigma_y\cdot\psi(x)\,dx \tag{14}$$

式中的σ_0是光滑试件的强度，σ_y是单位载荷下$y=0$截面上的应力分布。

本文按(12)式和取$\psi(x)=1-C(x-R)$，对[4]给出的实验结果作了拟合分析。图4给出了分析结果，对Gl/Ep $L=3.31$mm，对Gr/Ep，$L=4.08$mm；对圆孔 $C=0$，对裂纹 $C=0.025$。图中还给出了点应力准则与平均应力准则的预测结果，对于圆孔 (14) 式的预测结果与平均应力准则预测的结果相同，图4的结果表明 (14)式的预测结果是比较满意的。

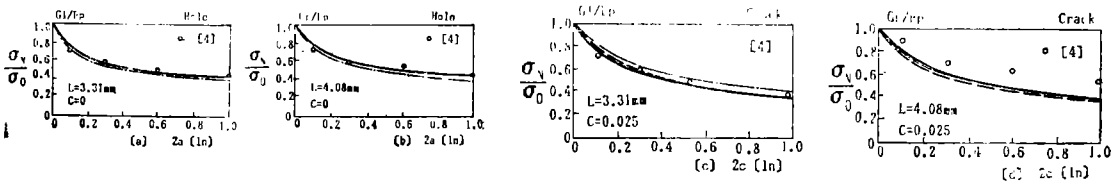

图4　分析结果

4 结　论

本文提出的预测复合材料缺口强度的场强法具有较好的力学基础，广泛适用于各种材料的缺口强度估计。由此导出的缺口强度估计的工程表达式使用方便。对实验结果的预测比较满意。

参 考 文 献

1 Awerbuch J, Madhukar M S.Notched Strength of Compostite Laminates: Predictions and Experiments —— A Review. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1985; 4: 3-159

2 Yu Xinlu, Yan Yongnian, Zheng Chuhong. The Intensity of Stress Field Method —— A New Criterion for Fatigue Design. ASM International Conference and Exposition on Fatigue, Dec. 1985, Salt Lake City, USA

3 Whitney J M, Nuismer R J. Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentration. Journal of Composite Materials, 1974; 8:253-265

4 Nuismer R J, Whitney J M. Uniaxial Failure of Composite Laminates Containing Stress Concentrations. Fracture Mechanics of Composites, ASTM STP 593, 1975: 117-142

THE METHOD OF STRESS FIELD INTENSITY FOR PREDICTING NOTCHED STRENGTH OF COMPOSITES

Yao Weixing
(Dept. of Aircraft, Nanjing Aeronautical Institute)
Yan Yongnian Yu Xinlu
(Dept. of Mech. Eng., Tsinghua University)

Abstract This paper presents a new method for predicting notched strength of composites -- the method of stress field intensity, in which the intensity of stress field near the notch was taken as the parameter to estimate the notched specimen, but not only the peak stress value at the notch root. A general expression for predicting notched strength was given and a formula for use easily was deduced. The results of predicting some experimental data using this method show that this new method is satisfactory.

Key words composite laminate, notched strength, stress field intensity

（上接第66页）

该公司这次开发的830# 其固化温度为70～80℃，比通常的预浸料低50～60℃，比820#低10℃，更能够较容易地进行成型加工。还有，如果提高固化温度到110℃以上，固化时间可缩短到仅10分钟，使成型制品的批量化生产成为可能。

830#与820#一样，其常温下的保存性良好，同时成型制品的机械性能也与使用通常预浸料时没有区别。

830#预浸料的特点如下：

1. 在70～80℃的低温度下完全固化（标准固化时间是，在70℃下为3小时，或在80℃下为1小时）；
2. 把固化温度提高到110℃以上，固化时间可大幅度缩短；
3. 由于是无溶剂型（热熔型）预浸料，所以没有溶剂味，很少生成气孔；
4. 克服了低温固化预浸料的弱点，复合材料的机械性能，特别是层间剪切强度和横向强度性能优良；
5. 同一固化条件下的成型物耐热性良好；
6. 通过后固化，可以提高成型物的耐热性；
7. 成型方法可采用真空成型、热压罐成型以及压塑成型；
8. 预浸料的使用寿命，常温下为3～4个星期，在低温下保存则可大幅度延长使用寿命。

申 摘自EPJ第556号