层状复合材料裂纹在软层的扩展趋势

徐永君① 余俊波② 李 敏① 柳春图① 张传绪②

(①中国科学院力学研究所，北京；(②大庆油田第九采油厂，大庆)

摘 要：复合材料具有比强度大、比刚度高、抗疲劳性能好以及材料性能可设计等优点，工程用途极其广泛。层状复合材料在层间界面易于出现微观裂纹，裂纹逐渐扩展并导致结构失稳，丧失承载能力。断裂问题成为层状复合材料构件使用安全可靠性的关键因素之一，研究层状复合材料的裂纹扩展问题具有重要的理论价值和工程意义。本文主要研究层状复合材料裂纹由硬层扩展到软层时的进一步扩展趋势。在有限元分析软件 ANSYS 的基础上利用基于 Williams 特征展开的围线积分提取法对复合材料裂纹扩展到软层后的裂纹尖端区域的应力强度因子进行了计算，进一步得到应力应变场后利用最大环向应力理论、$K_{II}=0$ 理论、最大能量释放率理论和最小应变能密度理论对裂纹进一步扩展趋势进行了一系列研究。

关键词：层状复合材料；裂纹扩展趋势；Williams 特征展开；应力强度因子

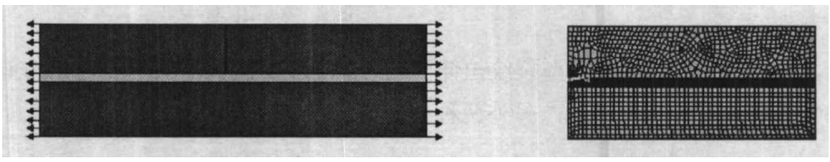
1 引言

Williams利用特征展开法研究了裂纹尖端场 [1]，文献[2]给出了奇异性应力的精确解表达式。文献[3]给出了含有裂纹的Reissner型板广义位移和广义应力的特征展开式。文献[4]给出了断裂问题特征根的完备求解，充分发挥有限元线法的优势和潜力，同时尽力发掘特征解的内在特性，提出了一系列计算应力强度因子的新方法。在层状复合材料的断裂研究方面，文献[5,6]在实验基础上建立了弹性相同而塑性不同的层合板模型，并用有限元法对不同取向裂纹的扩展力进行计算分析。文献[7]通过疲劳裂纹扩展试验和有限元建模计算，分析软层对裂纹扩展的屏蔽作用和界面分层的原因。文献[8]对破裂过程进行了模拟研究，指出由于软层对能量的耗散作用，表现出较好的韧性性能。本文基于文献[4]利用最大环向应力理论、$K_{II}=0$ 理论、最大能量释放率理论和最小应变能密度理论[9-13]对层状复合材料裂纹由硬层扩展到软层时的进一步扩展趋势进行了研究。

2 问题提出和应力应变场计算

如图 1a 所示，以 I 型裂纹问题为例，深色为硬层，浅色为软层，两端受拉 $\sigma=1$。当裂纹扩展到软层后，复杂受力状态下在软层内的继续扩展趋势对层状复合材料的性能具有很大的影响，对韧性及疲劳性能都很重要。利用有限元软件 ANSYS 取二分之一模型进行计算，裂尖局部网格加密。尽管裂尖网格足够细分，但在相应的很小区域仍无法直接用有限元计算结果详细描述裂尖区的应力应变场，所以基于围线积分提取法[4]在远场计算得到应力强度因子，利用 Williams 特征展开解得到裂尖区的应力应变场(限于篇幅，详细计算方法可参考相关文献)。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



a　　b

图 1　硬层断裂 I 型裂纹及二分之一网格划分示意图

3　裂纹扩展趋势分析

四种主要的判断理论和方法

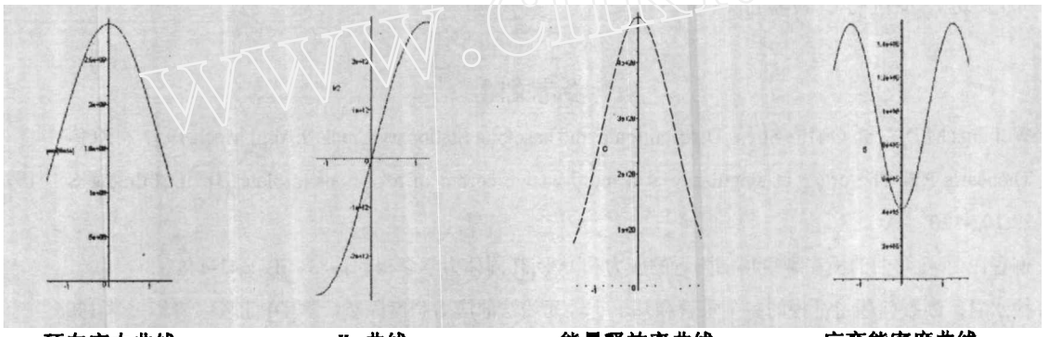
1) 最大环向应力理论[10]：Erdogan.F 和 Sih.在 1963 年提出，裂纹沿环向应力 σ_θ 最大的达到临界值 σ_c 开始进一步扩展。

2) $K_{II}=0$ 理论[11]：K. Palaniswamy 等人认为裂纹尖端区域存在 $K_{II}=0$，否则应力会在切线方向发生突变。

3)最大能量释放率理论[12]：根据能量平衡理论，裂纹沿着能产生最大能量释放率的方向起裂扩展，能量释放率达到某临界值时裂纹起裂扩展。

4)最小应变能密度理论[13]：G.C.Sih 和 B.Macdonald 提出应变能密度标准，认为裂纹扩展可通过应变能系数 S 和裂纹长度 a 的比率变化表现出来。

例一　I 型裂纹



环向应力曲线　　K_{II} 曲线　　能量释放率曲线　　应变能密度曲线

图 2　单材料 I 型断裂问题的四种理论对应的曲线示意图

如图 1a 所示，为层状复合材料 I 型裂纹拉伸问题，硬层与软层厚度比均为 5:1，当硬层与软层弹性模量比为 1 时，变为单材料 I 型拉伸问题。如图 2 所示，四种理论均在 α =0°时达到极值或零值。 图 3 给出了断裂角随硬层与软层弹性模量比变化情况。

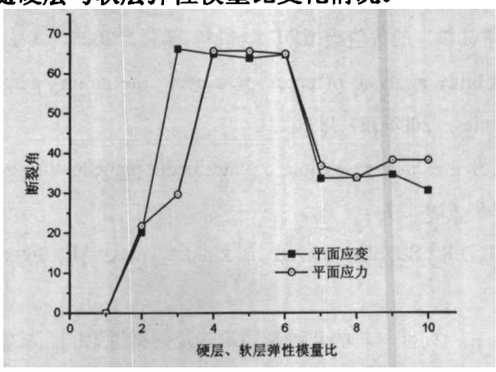


图 3　I 型裂纹问题断裂角随硬、软层弹性模量比变化示意图

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

例二　混合型裂纹

如图 4 所示，为层状复合材料混合型裂纹拉伸问题，图 5 表明最大环向应力理论与最大能量释放率理论两种判断理论分析结果相近，另外两种判断理论分析结果相近。

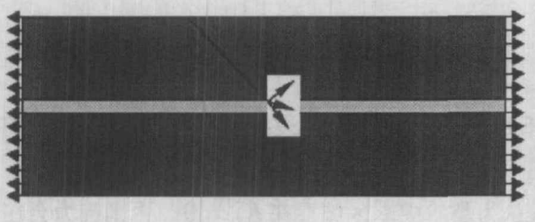


图 4. 混合型裂纹示意图

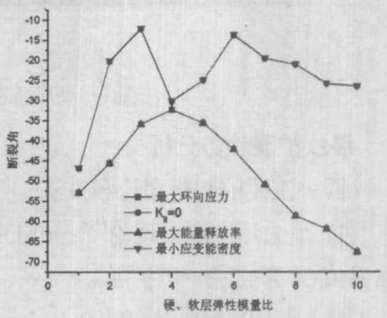


图 5　混合型裂纹问题断裂角随硬、软层弹性模量比变化示意图

4　结论

数值算例显示，利用四种理论进行层状复合材料裂纹扩展到软层后的进一步扩展趋势研究，对于纯 I 型裂纹问题，四种理论相似。而实际工程中多为复杂受力状态，数值算例显示，最大环向应力理论与最大能量释放率理论两种判断理论分析结果相近，另外两种判断理论分析结果相似，需要进一步进行试验验证。

参考文献

1　Williams M.L, et al. On the Stress Distribution at the base of a Stationary Crack, J.Appl.Mech.1957,24:109-114

2　Theocaris P.S, The order of singularity at a multi-wedge corner of a composite plate [J]. Int.J.Engng Sci, 1974, 12:107-120

3　柳春图.承受弯曲的板在裂纹顶端附近的应力和变形[J].固体力学学报，1983，3：441-448

4　徐永君．断裂问题特征根的完备求解和基于有限元线法的应力强度因子计算[D].北京：清华大学,1996

5　Kim A.S, Suresh S, Plasticity effects on fracture normal to interfaces with homogeneous and graded compositions [J]. Int.J.Solids Structures, 1997, 34:3415-3432

6　Wappling D, Gunnare J, Stahle P, Crack growth across strength mismatched biomaterial interface [J]. Int.J.Fracture, 1998, 89:223-243.

7　贾普荣，何家文等.双金属层状板中软界面层对裂纹扩展的影响[J].应用力学学报，2003，20(3):71-73

8　常旭等.层状复合陶瓷增韧机理的数值模拟[J].无机材料学报，2005，20(2)：459-464

9　Zacharopoulos D.A, Stability analysis of crack path using the strain energy density theory[J], Theoretical and Applied Fracture Mechanics，2004:327-337

10　ERDOGAN F, SIH G.C.on the crack extension in plates under plane loading and transverse shear[J].ASME, Journal of Basic Engineering, 1963,519-527

11　COTTERELL B, RICE J.R. Slightly curved or kinked cracks [J], International Journal of Fracture, 1980, 16(2):155-169

12　汤安民，朱文艺，卢智先．韧性材料的几种断裂形式及判据讨论[J]．机械强度, 2002, 24(4): 566-570

13　SIH G.C, MADENCI E.fracture initiation under gross yielding strain energy density griterion[J]. Journal of Fracture

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Mechanics, 1983, 18(3):667-677

Interface Fracture Mechanics Analysis on Stratified Ccomposite Structures

Xu Yongjun①, Yu Junbo②, LI Min①, Liu Chuntu①, Zhang Chuanxu②

(①Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China)

(②The 9th Oil Production Plant of Daqing Oilfield, Daqing, China)

Abstract: The thesis aims at analysis of the crack-extending tendency, especially, when the crack reaches/is in the soft layer. Based on ANSYS, the stress intensity factors can be computed accurately by using the contour integral extraction method and the stress and strain field near the vertices of crack can be obtained. Finally four algorithms are used to analyze the possible crack-extending tendency, namely, the maximum tangential stress theorem, the maximum energy release rate theorem, the minimum strain energy density theorem and the $K_{II}=0$ theorem.

Keywords: stratified composite material; Williams eigen-function expansion; the tendency angle of crack expand; stress intensity factor

作者简介：

徐永君：（1964-）男，副研究员，主要从事疲劳断裂、计算力学、工程力学等研究工作。

地址：北京

邮编：100190

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net