

纤维-基体界面脱粘能量释放率*

张双寅

(中国科学院力学研究所)

摘要 研究一个纤维拔出界面脱粘断裂能量释放率分析的简单模型, 给出纤维-基体界面断裂能 G_{II} 工程计算公式的推导过程. 用有限元法检查了该公式的可靠性与适用范围. 并提出一个修正表达式.

关键词 脱粘 界面 能量释放率 断裂

纤维-基体界面断裂性能对复合材料的宏观工程特性起着重要的作用. 它对预测材料力学特性、设计材料、改进复合工艺都有重要意义. 在诸多测定界面断裂能的方法中^[1], 单纤维-基体轴对称拔出试验是最令人感兴趣的方法, 因为它能直接反映断裂时纤维-基体界面脱粘(Debonding)和纤维拔出(Pull-out)过程中界面裂纹扩展时能量释放率的变化特征. 文献[2]对图1的试验给出了一个II型断裂能量释放率 G_{II} 的简单公式, 文献[3]给出了一个相似的公式, 但考虑了纤维与基体的泊松比. 作者分析了该方法的可靠性, 给出了 G_{II} 公式的推导过程, 评价了导出公式的基本假设的合理性, 对一系列符合树脂基复合材料(如碳-环氧)的参数用有限元计算检查了该公式的适用范围, 为扩大其适用范围, 又提出一个修正表达式.

1 能量释放率理论

由经典断裂力学理论, 令 W 为外力功, U 为应变能, A 为裂纹面积, 断裂能量释放率 $G = dW/dA - dU/dA$, 当裂纹扩展 da 之瞬间外载保持不变, 则 $dW/dA = 0$, 于是 $G = 0.5P^2 B^{-1} dC/dA|_{P=const}$. B 为裂纹宽度, C 为柔度. 参照图1b, 由力学平衡原则, 外加应力 T 与 $m-m$ 截面和 $n-n$ 截面中应力 σ_f 构成平衡, 即

$$Tr_f^2 = \int_0^{r_f} \sigma_f|_{m-m} 2rdr; \quad Tr_f^2 = \int_0^{r_f} \sigma_f|_{n-n} 2rdr + \int_{r_f}^{r_m} \sigma_m|_{n-n} 2rdr \quad (1)$$

当裂纹扩展 da , 即裂尖由 $m-m$ 扩展到 $n-n$ 时, 能量释放率为

$$G_{II} = -(2\pi r_f)^{-1} dU/dA = (2\pi r_f)^{-1} \left\{ \int_0^{r_f} \pi r E_f^{-1} (\sigma_f|_{m-m})^2 dr - \left[\int_0^{r_f} \pi r E_f^{-1} (\sigma_f|_{n-n})^2 dr + \int_{r_f}^{r_m} \pi r E_m^{-1} (\sigma_m|_{n-n})^2 dr \right] \right\} \quad (2)$$

* 国家自然科学基金资助项目. 1994年10月17日收到初稿; 1995年6月6日收到修改稿.
本文联系人: 张双寅, 北京市 100080, 中国科学院力学研究所

假设 I: 应力沿 m-m 与 n-n 截面均匀分布, 则由式(1), (2)得到 $T = \sigma_f + \sigma_m(f^{-1} - 1)$, 式中 f 为纤维的体积分数, $f = r_f^2 \cdot r_m^{-2}$.

$$G_{II} = T^2 r_f (4E_f)^{-1} [1 - \sigma_f^2 T^{-2} - \sigma_m^2 E_f (f^{-1} - 1) E_m^{-1} T^{-2}]$$

假设 II: 设在裂纹尖端前附近截面上纤维应变等于基体应变, 即 $\sigma_f \cdot E_f^{-1} = \sigma_m E_m^{-1}$. 再引入记号 $\lambda = E_m E_f^{-1}$, 则有 $\sigma_f = f T [f + \lambda(1-f)]^{-1}$; $\sigma_m = T f \lambda [f + \lambda(1-f)]^{-1}$, 以及

$$G_{II} = T^2 \lambda r_f \{4E_f [\lambda + f(1-f)^{-1}]\}^{-1} \quad (3)$$

式(3)可见于文献[2]. 基于断裂力学处理方法, 文献[3]对纤维-基体界面断裂能提出如下公式:

$$G_{II} = T^2 r_f (1 - 2Kv_f) \cdot \{4E_f [(1 - 2Kv_f) + \gamma / \lambda \cdot (1 - 2Kv_m)]\}^{-1} \quad (4)$$

式中 $K = (\lambda v_f + \gamma v_m) \cdot [\lambda(1 - v_f) + 1 + v_m + 2\gamma]^{-1}$; $\gamma = r_f^2 \cdot (r_m^2 - r_f^2)^{-1}$

2 有限元分析

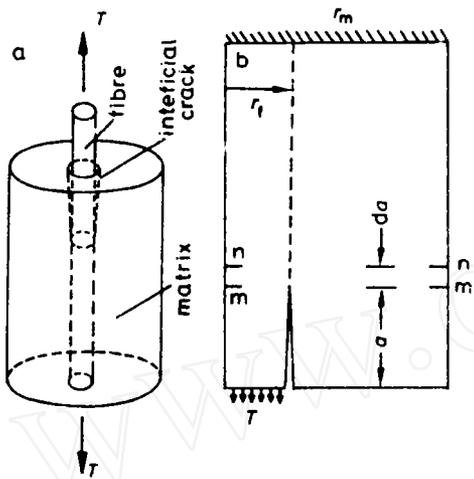


图 1 界面部分脱粘纤维拔出(a)和裂纹扩展(b)示意图

Fig.1 Schematic drawing of pull-out model with partially debonded interface fibre
a. interfacial crack matrix;
b. interfacial crack growth



图 2 有限元网格

Fig.2 Finite element mesh pattern

公式(2)的形式简单, 且不含裂纹长度 a , 兼之推导中所作的两个大胆的假设使人怀疑其可靠性与适用性. 所以, 进行有限元分析十分必要. 有限元网格如图 2 所示, 右端固定, 左端纤维受均匀拉应力 $T = 1 \text{ GPa}$, 根据断裂力学 J 积分原理和伪裂纹扩展方法计算 G_{II} .

首先用碳-环氧(T300 / 5208)组分的性能参数计算. 纤维模量 $E_f = 258.6 \text{ GPa}$, 泊松比 $v_f = 0.25$; 基体模量为 $E_m = 3.4 \text{ GPa}$, 泊松比 $v_m = 0.35$. 由图 3 可见, 应力与应变分布都不均匀, 纤维应变也不等于基体应变, 所以, 推导式(3)时所作的两个假设都与实际情况不符.

图 4 表明, 当 a 很小时, 公式(3)误差太大, 不能用; 当 $a > r_f$ 时, G_{II} 的公式解与有限元解越来越接近, 误差小于 1%. 证明当 a 足够长时式(3)可给出相当精确的结果. 为检查式(3)对广泛变化的基体模量的适用性, 对四个 E_m 值进行了比较计算. 结果列于表 1. 可见 E_m 与 E_f 差别越大, 式(3)的误差越大, 例如当 $E_m = 1.7 \text{ GPa}$, $\lambda = 0.00657$ 时, 有限元解与公式解的相对误差 $|(G_{II})_{有限} - (G_{II})_{公式}| / (G_{II})_{公式} = \delta\%$ 超过 10%, 而在基体模量值接近纤维模量时, 两种方法的结果符合甚好, 式(3)在 $\lambda = 0.015 - 0.5$ 的范围内可以预

测较准确的 G_{II} 值. 表中也列出了公式(4)的计算结果($r=4.5\text{mm}$), 可见公式(3)与(4)一致性很好.

为了扩大公式解的适用范围, 补偿 E_m 与 E_f 差别太大造成的误差, 提出如下修正公式:

$$G_{II} = T^2 \lambda^\alpha r_f \{4E_f [\lambda^2 + f(1-f)^{-1}]\}^{-1} \quad (5)$$

α 为修正因子, 是一个小于 1 且非常接近 1 的数, 例如, 当 $E_m = 1.7\text{GPa}$ 时, $\lambda = 0.00657$, 取 $\alpha = 0.97$, 可得 $G_{II} = 0.367 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$. 公式解与有限元解相差仅 5%, 满足工程需要.

此外, 还对不同 r_m 即不同纤维体积分数 f 进行了对比计算, 结果见表 2, 可见, 当 r_f 不变, r_m 变大时, 即 f 变小时, G_{II} 的式(3)解误差变大. 然而, 在 $f = 0.1 - 0.066$ 范围内, 式(3)可以给出较好的结果, 此结果提示我们, 在利用图 1 所示方法测定 G_{II} 时, 基体半径 r_m 不宜太大.

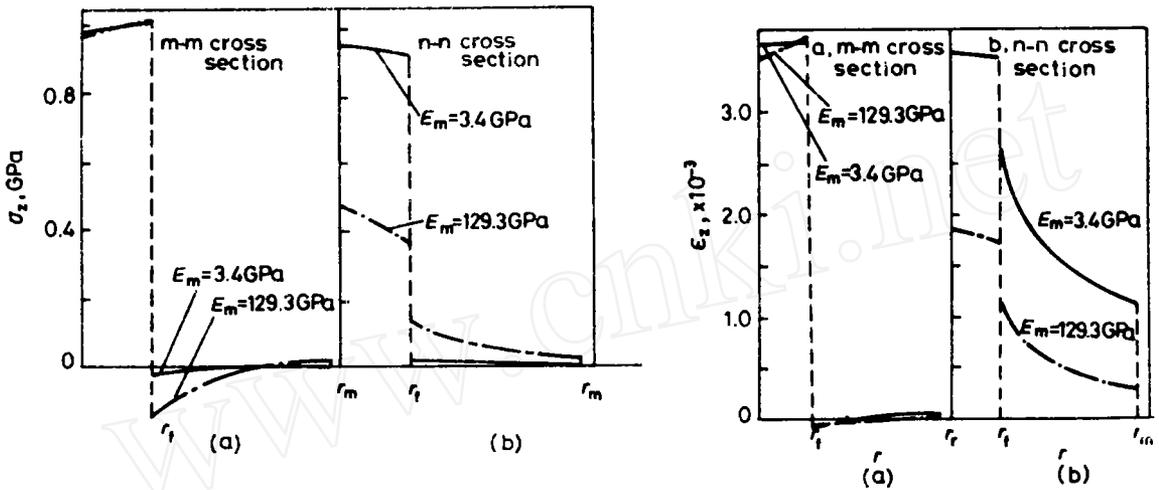


图 3 裂尖前、后二截面上应力(左)和应变(右)分布

Fig.3 Stress (left) and strain (right) distributions in (a) m-m and (b) n-n cross section

3 讨 论

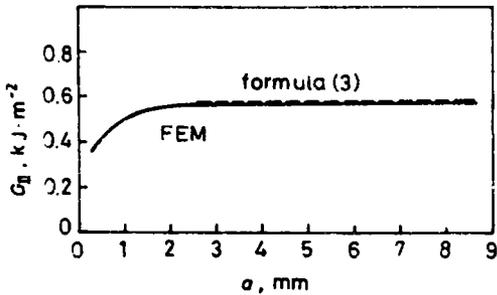


图 4 G_{II} 随 a 的变化曲线

Fig.4 Plot of G_{II} against a

1. 有限元计算结果表明, 裂尖前横截面上应力与应变分布与推导式(3)时所作的两个假设相去甚远. 然而, 当 $a \gg r_f$ 时, 在 λ 和 f 在相当大范围内, 式(3)仍能得出较好的预测. 这是由于 G_{II} 主要取决于试件整体变形状况, 裂尖附近的应力与应变分布状况的作用较为次要. 经典断裂力学 J 积分与积分路径无关的原理与此相一致.

2. 表 1 表明 λ 愈小, 即 E_m 与 E_f 相差越远, 式(3)解与有限元解相对误差越大. 为深究其原因, 对 E_m 为 3.4 和 129.3GPa 两种情况计算了应力与应变分布, 曲线绘于图 3 中. 可

见, 相对于 $E_m = 3.4\text{GPa}$ 而言, $E_m = 129.3\text{GPa}$ 时 ε_f 与 ε_m 的差别要小些. 这可以解释 $E_m = 129.3\text{GPa}$ 时的公式解与有限元解的差别较小原因.

表 1 不同基体模量的有限元解和公式解的比较

Table 1 Computational results by FEM and formulas (3), (4) for different E_m
 $E_f = 258.6\text{GPa}$, $r_f = 4.5\text{mm}$, $r_f = 16.2\text{mm}$, $f = 0.077$

E_m , GPa	λ	G_{II} , $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$			Deviation δ , %
		FEM	formula (3)	formula (4)	
1.7	0.00657	0.354	0.318		11.4
3.4	0.0132	0.578	0.585	0.583	1.2
80.0	0.309	3.492	3.421		0.23
129.3	0.500	3.724	3.724		0

表 2 不同基体半径下有限元解和公式解的比较

Table 2 Computational results of FEM and formula (3) for different r_m . $E_f = 258.6\text{GPa}$, $r_f = 4.5\text{mm}$

E_m , Gpa	r_m , mm	f	G_{II} , $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$		Deviation δ , %
			FEM	formula (3)	
3.4	17.5	0.0657	0.688	0.676	1.78
	16.2	0.0772	0.578	0.585	1.20
	14.0	0.103	0.438	0.443	1.13
80.0	14.0	0.103	3.155	3.172	0.5

4 结 论

1. 利用公式推导和有限元计算进一步研究了测定纤维/基体界面断裂能量释放率 G_{II} 试验方法及预测式(3)的可靠性. 研究表明, 尽管在推导式(3)时所作的两个假设与真实情况出入很大, 但公式(3)在较大参数范围内仍可准确预测 G_{II} .

2. $E_m < E_f$ (如 $\lambda < 0.01$) 时, 式(3)的结果误差较大; 修正式(5)可以改进预测结果.

3. 计算表明, 尽管式(4)考虑了材料泊松比效应, 但数值结果却几乎与式(3)的完全相同.

参 考 文 献

- 1 Gao H C, Evans A G. Mechanics of Materials, 1989, 7:295
- 2 Charalambides P G, Evans A G. J Am Ceram Soc. 1989, 72(5):746
- 3 Kim J-K, Baillie C, Mai Y-W. J Mat Sci, 1992, 27:3143

DEBONDING ENERGY RELEASE RATE OF FIBRE / MATRIX INTERFACE

ZHANG Shuangyin

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

ABSTRACT An investigation on the test method for measuring the interfacial debonding fracture energy of fibre pull-out from matrix was presented. The formula of fibre / matrix interfacial energy release rate G_{II} is derived to look into its validity. Comparison calculation results are given between the formula and finite element method and show that for quite large range of variation of the parameters, the given formula yields good prediction of G_{II} . However, if the young's modulus of the matrix is far smaller than that of the fibre, the inaccuracy of the formula will be large; for this case, this paper proposes a modified formula, which improves the prediction noticeably.

KEY WORDS debonding interface energy release rate fracture

Correspondent: ZHANG Shuangyin, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

基金委金属材料学科将启用新的学科代码

由于 1993 年版至 1995 年版学科代码中的金属材料学科代码是配合建立同行评议专家库制订的, 实践表明该代码在项目申请中严重干扰了指南的导向作用, 因此将于 1996 年度起启用新代码, 务请各单位基金主管部门和项目申请人注意. 新代码如下:

新型金属结构材料及制备基础

E010101 金属间化合物
E010102 其它新型金属结构材料

结构与缺陷

E010701 金属的晶体结构与缺陷
E010702 界面问题

金属基复合材料及制备基础

E010201 纤维、颗粒增强金属基复合材料
E010202 其它金属基复合材料

形变与断裂

E010801 金属的形变与损伤
E010802 金属的断裂
E010803 金属的强化与韧化

非晶态、准晶和纳米晶材料及制备基础

E010301 金属非晶态
E010302 金属准晶
E010303 金属纳米晶块体材料

凝固与结晶学

E010901 金属的非平衡凝固与结晶
E010902 其它金属凝固与结晶理论

特殊条件使用的和传统的金属材料

E010401 特殊条件使用和传统的金属材料
E010402 传统金属材料的基础性研究

表面改性

E011001 金属表面处理
E011002 载能束金属表面改性

(下转 576 页)