

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.016

含界面裂纹的 GFRP 沥青混合料巴西盘断裂力学分析

任大龙^{1,2}, 万 水¹, 李文虎²

(1. 东南大学 交通学院, 210096 南京; 2. 常州市建设工程结构与材料性能研究重点实验室(常州工学院), 213002 江苏 常州)

摘 要: 为研究 GFRP 沥青混合料界面裂尖力学特性, 对混合料进行强度分析, 设计了含预制界面裂纹的双材料巴西盘试件, 实测了加载角度在 25°~90°之间 27 个巴西盘试件断裂荷载、裂纹扩展路径和断口形式等试验数据, 结合试验数据建立了考虑 GFRP 正交异性双材料巴西盘有限元模型, 采用数值外插法反算了界面应力强度因子, 进行了 GFRP 沥青混合料巴西盘断裂力学性能的理论分析和试验研究. 结果表明, 含预制界面裂纹的双材料巴西盘试件能全面地反映 GFRP 沥青混合料的断裂形态, 是一种有效的试验方法; 以界面应力强度因子作为力学评价指标, 能够很好地解释试验现象; 含预制界面裂纹的 GFRP 沥青混合料巴西盘符合椭圆强度准则.

关键词: 桥面铺装; 沥青混合料; GFRP; 巴西盘; 界面裂纹; 应力强度因子

中图分类号: U441.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)03-0095-06

Fracture mechanics analysis of GFRP asphalt mixtures brazilian disk with interface crack

REN Dalong^{1,2}, WAN Shui¹, LI Wenhui²

(1. School of Transportation, Southeast University, 210096 Nanjing, China; 2. Changzhou Key Lab of Structure Engineering and Material Properties(Changzhou Institute of Technology), 213002 Changzhou, Jiangsu, China)

Abstract: The mechanics property near interface crack tip is studied in order to strength analysis, which interface is between GFRP and asphalt mixtures. Bimaterial Brazilian Disk specimens with prefabricated interface crack are designed. 27 Brazilian Disk specimens are tested by loading angle in the range of 25 degree to 90 degree, and experimental data are recorded, such as ultimate load, crack propagation path, fracture form, etc. Finite element model of GFRP asphalt mixtures Brazilian Disk is built, considering the GFRP orthotropic property. Interface stress intensity factors (SIF) are calculated applying numerical extrapolation method, and fracture mechanics performance of GFRP asphalt mixtures Brazilian Disk is studied by theoretical analysis and experimental research. The results show that the bimaterial Brazilian Disk specimens with prefabricated interface crack can fully reflect fracture types of GFRP and asphalt mixtures, which is an efficient experiment method, that interface SIF acting as mechanics evaluation parameter, can well explain experiment phenomena, and that GFRP and asphalt mixtures Brazilian Disk specimens with prefabricated interface crack are in accordance with elliptic strength criterion.

Keywords: deck pavement; asphalt mixtures; GFRP; brazilian disk; interface crack; stress intensity factor

GFRP (glass fiber reinforced plastics, GFRP) 沥青混合料是一种新型桥面结构形式, 与传统混凝土桥面系相比, 具有自重轻, 抗疲劳性能好、耐化学腐蚀性好、施工方便等优点. GFRP 沥青混合料是 GFRP 板与沥青混合料粘结而成的结合材料, 在结合界面附近往往存在缺陷, 会导致结合强度下降, 而且由于界面的存在而引发应力集中并产生残余应力

等, 使界面附近的材料处于较高的应力水平, 所以由结合材料结构的强度往往都取决于界面的强度^[1-2]. 结合材料具有界面端应力奇异性^[3-5], 界面本身与母材的强度也不同, 传统的强度评价方法, 如以应力为基本评价参数的材料力学的方法, 和以均质材料裂纹应力强度因子为基本评价参数的断裂力学的方法, 都不能用来评价结合材料的强度或断裂行为, 需要建立一套针对界面性能的评价方法, 为结合材料的强度提供必要的理论基础. 本文利用双材料巴西盘试件进行 GFRP 沥青混合料试验研究, 它可以通过改变加载角度模拟试件的各种破坏模态, 便于实

收稿日期: 2014-08-05.

基金项目: 国家自然科学基金(50978055);

江苏省高校自然科学基金(14KJB560002).

作者简介: 任大龙(1979—), 男, 博士研究生;

万 水(1960—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 任大龙, chongrdl@163.com.

现结合材料试件强度的全面研究.

1 界面裂纹描述

Williams^[1]最早采用特征函数法研究了各项同性弹性材料界面裂纹尖端附近的应力场和位移场的振荡奇异性,指出界面裂尖前沿应力场特征值为一对共轭复根 $\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \pm i\varepsilon$, 并给出应力场和开口位移解析表达式^[1-2,4]分别为

$$\sigma_{\theta j} + i\tau_{r\theta j}|_{\theta=0} = \frac{K_1 + iK_2}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r}{2a} \right)^{i\varepsilon}, \quad (1)$$

$$\delta_y + i\delta_x = \frac{K_1 + iK_2}{2(1 + 2i\varepsilon) \cosh(\varepsilon\pi)} \left\{ \frac{k_1 + 1}{\mu_1} + \frac{k_2 + 1}{\mu_2} \right\} \cdot \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left(\frac{r}{2a} \right)^{i\varepsilon}. \quad (2)$$

式中: ε 为振荡因子, β 为 Dundurs 参数^[5], E_i 为弹性模量, ν_i 为泊松比, μ_i 为剪切模量, k_i 为材料参数, K_1/K_2 为应力强度因子 SIF (stress intensity factor).

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{1 - \beta}{1 + \beta} \right),$$

$$\beta = \frac{\mu_1(k_2 - 1) - \mu_2(k_1 + 1)}{\mu_1(k_2 + 1) + \mu_2(k_1 + 1)},$$

$$k_i = (3 - \nu_i)/(1 + \nu_i) \text{ (平面应力)}.$$

Suo^[6]进一步分析了各向异性材料结合材料的界面问题. 对于图 1 所示正交各向异性材料界面裂纹, 当材料主轴方向与界面一致时, 裂尖前沿应力场和开口位移场的形式为

$$\sqrt{\frac{H_{22}}{H_{11}}} \sigma_y + i\tau_{xy} = \frac{K_1 + iK_2}{\sqrt{2\pi r}} r^{i\varepsilon}, \quad (3)$$

$$\sqrt{\frac{H_{22}}{H_{11}}} \delta_y + i\delta_x = \frac{2H_{11}(K_1 + iK_2) \sqrt{r}}{(1 + 2i\varepsilon) \sqrt{2\pi} \cosh(\varepsilon\pi)} r^{i\varepsilon}. \quad (4)$$

式中 H_{ij} 为汉密尔顿矩阵的分量为

$$H_{11} = \{2n\Gamma^{0.25} \sqrt{\beta_{11}\beta_{22}}\}_I + \{2n\Gamma^{0.25} \sqrt{\beta_{11}\beta_{22}}\}_{II},$$

$$H_{22} = \{2n\Gamma^{-0.25} \sqrt{\beta_{11}\beta_{22}}\}_I + \{2n\Gamma^{-0.25} \sqrt{\beta_{11}\beta_{22}}\}_{II},$$

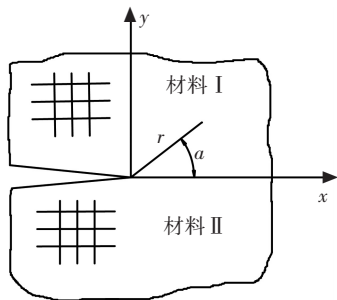


图 1 裂尖界面裂纹

$$\beta = \frac{\{\sqrt{\beta_{11}\beta_{22}} + \beta_{12}\}_{II} - \{\sqrt{\beta_{11}\beta_{22}} + \beta_{12}\}_I}{\sqrt{H_{11}H_{22}}},$$

$$\Gamma = \frac{\beta_{11}}{\beta_{12}}, \rho = \frac{2\beta_{12} + \beta_{66}}{2\sqrt{\beta_{11}\beta_{12}}},$$

$$n = \sqrt{\frac{1 + \rho}{2}}, m = \sqrt{\frac{1 - \rho}{2}},$$

$$\beta_{11} = \frac{1}{E_1}, \beta_{12} = \beta_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_1},$$

$$\beta_{22} = \frac{1}{E_2}, \beta_{66} = \frac{1}{\mu_{12}} \text{ (平面应力状态下)}.$$

将式(3)、(4)复变函数形式展开, 整理得到 K_1, K_2 , 应力法:

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} [\sigma_y \cos Q + (2w_1 \tau_{xy} + \frac{w_2}{w_1} (\sigma_y + 2w_2 \tau_{xy})) \sin Q], \quad (5)$$

$$K_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \left[\tau_{xy} \cos Q - \frac{1}{2w_1} (\sigma_y + 2w_2 \tau_{xy}) \sin Q \right]. \quad (6)$$

式中 $Q = \varepsilon \ln \frac{r}{ha}$.

位移法:

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{C}{w_1} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [(S_1 w_1 - S_2 w_2) \Delta_1 - (S_1 w_2 - S_2 w_1) \Delta_2], \quad (7)$$

$$K_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{C}{2w_1} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [S_1 \Delta_2 + S_2 \Delta_1]. \quad (8)$$

式中:

$$C = \cosh(\varepsilon\pi)/(2H_{22}),$$

$$\Delta_1 = \delta_y - \frac{w_2}{2(w_1^2 + w_2^2)} \delta_x,$$

$$\Delta_2 = \frac{w_1}{2(w_1^2 + w_2^2)} \delta_x,$$

$$S_1 = (1 + 2\varepsilon w_2/w_1) \cos Q + (2\varepsilon - w_2/w_1) \sin Q,$$

$$S_2 = (2\varepsilon - w_2/w_1) \cos Q - (1 + 2\varepsilon w_2/w_1) \sin Q.$$

当材料由正交各向异性材料退化为各项同性的结合材料时, $2W_1 = 1, W_2 = 0$, 即可得到各项同性均质材料 K_1/K_2 .

2 GFRP 沥青混合料巴西盘试验

2.1 试验描述

试件由两个沥青混合料半圆、GFRP 板条粘结而成, 如图 2(a). 试件制作时, 首先将沥青混合料半圆、GFRP 板条固定在专用夹具上, 然后注入环氧树脂胶, 放入标准养护室养护不少于 48 h 方可试验. 界面裂纹在试件制作过程中预制, 在一侧沥青混合料半圆粘帖薄膜, 确保注胶时胶水不能进入薄膜和

沥青混合料空腔,待试件养护硬化后割掉沥青混合料侧面薄膜,形成界面预制裂纹.试件制作时,为了防止在界面端及无预制裂纹界面破坏,对这些部位进行了加强,如图2(b).

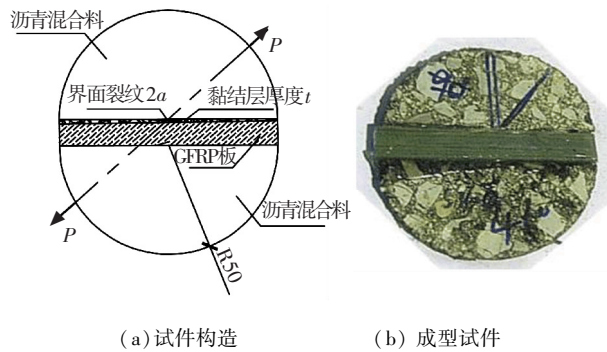


图2 巴西盘试件

沥青混合料为 AC-16F 环氧树脂改性沥青混凝土,通过沥青混合料弯曲试验测得 AC-16F 环氧树脂改性沥青混凝土在室温下弹性模量为 173 MPa,抗拉极限强度为 1.32 MPa,泊松比为 0.297. GFRP 板条采用 E 玻璃纤维和乙烯基树脂制成,其中纤维增强材料采用了无碱纱(1200Tex)、0/90 和-45/45 双轴布(双向比例为 1:1),基体为乙烯基树脂.板厚度为 10 mm,共有 4 层纱层,5 层纤维布层,均沿纵向铺设,对称铺层,各铺层厚度分别为:纱层 2.0 mm,双轴纤维布层 0.4 mm,GFRP 材料弹性常数见表 1.

表1 GFRP 材料弹性常数(x/y)

铺层	弹性模量/GPa	剪切模量/GPa	泊松比
纤维束层	8.8/8.8	3.1/3.3	0.326/0.275
双轴布层	19.6/19.6	2.6/2.6	0.098/0.098

试件参数:沥青混合料半圆半径 $r = 50\text{ mm}$,厚度 $b = 10\text{ mm}$;粘结层厚度 $t = 2\text{ mm}$;GFRP 板条长度、宽度、厚度分别为 100、10、10 mm;预制界面裂纹长度 $2a = 10\text{ mm}$.

巴西盘试件利用 SDS10KN 试验机加载,试件夹持采用混凝土专用夹具,如图 3 所示.位移模式加载,加载速度为 1 mm/min.加载角 β 分别在 25°、30°、40°、45°、50°、60°、70°、80°、90°时,加载角 β 为加载力 P 与界面层夹角.

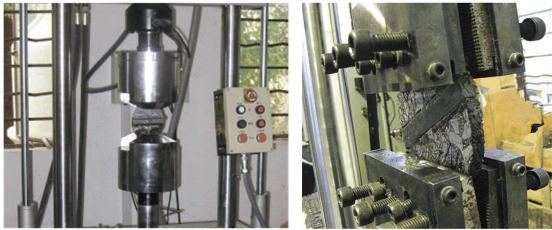


图3 试件加载

当试件出现下列情况之一时即认为破坏,停止试验并记录破坏荷载:1)试件界面可见裂纹;2)试件界面剥离;3)界面端出现裂纹或破坏;4)其他部位开裂.

2.2 试验结果描述

进行了 3 组巴西盘试验,每组 9 个试件,共 27 个试件.21 个试件界面裂纹破坏,两个在夹持端附近沥青混合料开裂,3 个界面端开裂,1 个因粗骨料附近缺陷开裂.

发生界面裂纹破坏的 21 个试件破坏形式分为两类:1)沿界面剪开破坏.裂纹首先自界面裂尖(左裂尖或右裂尖)开始扩展,随着荷载的施加,裂纹扩展迅速,很快发生界面剪开破坏,这类破坏发生在加载角度 β 为 25°~45°的试件,如图 4(a)所示;2)裂纹向沥青混合料曲折破坏和界面拉开破坏.裂纹扩展始于界面裂尖(左裂尖或右裂尖),随着荷载的施加,裂纹以斜线的形式向沥青混合料(母材弱侧)扩展,裂纹扩展较第一种类型破坏缓慢,直至裂纹贯通沥青混合料半圆,导致巴西盘破坏,这类破坏发生在加载角度 β 为 50°~90°的试件,如图 4(b)、4(c)所示,其中图 4(b)中斜线为裂纹扩展路径,图 4(c)中界面上微小突起为界面拉开破坏时,遗留着界面上的沥青混合料小块.裂纹在沥青混合料中扩展时,由于粗骨料的存在,可能会影响裂纹扩展路径.

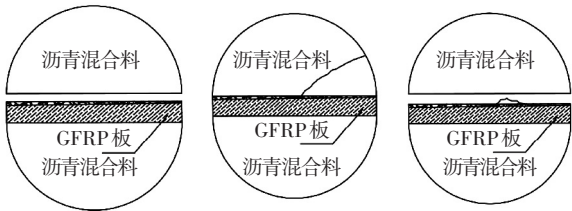


图4 试件典型破坏形式

剔除 6 个无效试件数据,21 个有效试件数据取相同试件的破坏荷载平均值作为最终试件破坏荷载值,试件在加载角度 β 为 25°、30°、40°、45°、50°、60°、70°、80°、90°时,对应的破坏荷载 P 分别为 1 972、1 793、2 256.7、1 501、1 270.2、1 502.1、1 648.9、1 910.7、1 802 N.

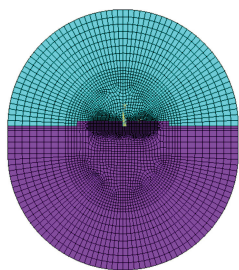
3 有限元分析

3.1 有限元模型

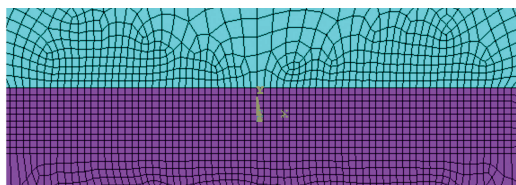
有限元分析的目的是将 GFRP 沥青混合料巴西盘试验荷破坏荷载 P 施加到巴西盘有限元模型,通过有限元计算的界面裂尖附近的奇异位移场数据,利用数值计算反推出界面裂尖奇异场的断裂力学参数^[7-9]界面应力强度因子 $SIF K_1/K_2$,进行 GFRP 沥

青混合料巴西盘强度评价。

GFRP 沥青混合料巴西盘有限元模型如图 5 所示,两个沥青混合料半圆和环氧树脂粘结层采用 shell63 单元;GFRP 条为正交异性材料,采用层单元 shell199 单元模拟,有限元模型中 GFRP 板材料与铺层参数见表 1。GFRP 板条与沥青混合料非预制裂纹界面区域采用接触单元 target169 和 conta171 模拟;沥青混合料半圆与 GFRP 之间预制界面裂纹区域网格加密,沥青混合料半圆与粘结层预制裂纹之间的界面自由,单元划分 3 级控制,中央界面区域网格加密,预制界面裂纹裂尖附近进一步细化,裂尖附近单元最小网格尺寸 0.25 mm,有限元模型共 6 005 个节点,5 918 个单元。



(a) 总体模型



(b) 裂尖单元

图 5 巴西盘试件有限元模型

3.2 界面 SIF 的数值计算方法

绝大多数结合材料的界面裂纹的应力强度因子没有解析解,也没有类似于断裂力学的 $1/4$ 奇异单元可用,只能通过数值计算求取^[10]。本文参考断裂力学常用的数值外插法^[11],利用界面裂纹尖端后缘的有限元张开位移计算界面 SIF^[12-13]。应力强度因子 K 为裂纹尖端出对应于 $r = 0$ 时的值,然而直接的数值计算无法达到 $r = 0$,因此采用外插法来计算 K 。在有限元计算中,界面裂纹尖端后缘的裂纹张开位移值 δ_{xi} 、 δ_{yi} 和那个对应的坐标值 r 可以直接获得。对应于每一个 $r_i > 0$,都有一组非奇异的位移值 δ_{xi} 、 δ_{yi} 及 K_i 。

构造函数 (r_i, K_{li}) ,利用最小二乘法原则,以函数数据点和设定曲线之间的方差小为目标进行拟合。假定 r_i 、 K_{li} 满足线性关系,则有

$$\tilde{K} = Ar + B. \quad (9)$$

当 $r = 0$ 时, $K_l \approx \tilde{K}_l(r = 0) = B$ 。从式(9)得,每个数据点处的偏差为 $(\tilde{K}_{li} - K_{li})$,得到方差 S ,即

$$S = \sum (\tilde{K}_{li} - K_{li})^2 = \sum (Ar_i + B - K_{li})^2. \quad (10)$$

根据最小二乘法原则,须满足

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial A} = 2 \sum (Ar_i + B - K_{li})r_i = 2(A \sum r_i^2 + B \sum r_i - \sum r_i K_{li}) = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial B} = 2 \sum (Ar_i + B - K_{li}) = 2(A \sum r_i + Bn - \sum K_{li}) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

得

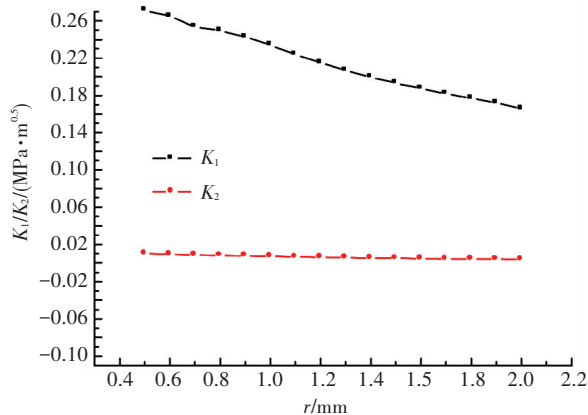
$$A = \frac{\sum r_i \sum K_{li} - n \sum r_i K_{li}}{(\sum r_i)^2 - n \sum r_i^2},$$

$$B = \frac{\sum r_i \sum r_i K_{li} - \sum r_i^2 \sum K_{li}}{(\sum r_i)^2 - n \sum r_i^2}. \quad (12)$$

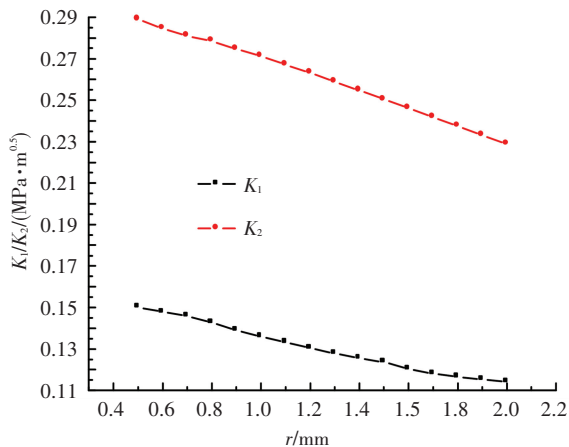
因此 B 值即为所求界面 SIF K_1/K_2 。

3.3 试验结果分析

图 6 表示加载角度 $\beta = 90^\circ$ 巴西盘试件界面 SIF K_1/K_2 与到界面裂尖距离 r 关系,外加荷载 P_{90} 为加载角度 $\beta = 90^\circ$ 时巴西盘试件对应的试验破坏值。



(a) $\beta = 90^\circ$



(b) $\beta = 45^\circ$

图 6 界面 SIF K_1/K_2

图6可以看出,界面SIF K_1/K_2 与到界面裂尖距离 r 表现出良好的线形,这说明式(9)假定是合理的,由式(12)可以计算得到两个加载工况下的界面SIF K_1/K_2 : 加载角 $\beta = 90^\circ$ 时界面SIF 数值 $K_1 = 0.303 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$, $K_2 = 0.012 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$; 加载角 $\beta = 45^\circ$ 时界面SIF K_1/K_2 数值 $K_1 = 0.312 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$, $K_2 = 0.173 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$.

从图6可以看出,当加载角度 $\beta = 90^\circ$,即I型模态下,界面SIF K_2 也不等于0,这是由于模态I、II型界面SIF K_1/K_2 不仅仅与单独的 δ_{xi} 或 δ_{yi} 有关,而是同时与 δ_{xi} 、 δ_{yi} 均有关,所以界面SIF K_1/K_2 与均质材料裂纹 K_I/K_{II} 有本质区别(为了区别于均质材料,界面应力强度因子记为 K_1/K_2). SIF $K_2 = 0.012 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$, 原因是受到界面振荡因子 ε 的影响,本文双材料巴西盘振荡因子 $|\varepsilon| = 0.106$,数值较小,在奇异位移场支配区域内, K_1 主要由 δ_y 决定, K_2 主要由 δ_x 决定,这一点由式(4)也不难分析得到.

加载角度 β 分别为 25° 、 30° 、 40° 、 45° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 、 90° 加载工况下,巴西盘试件界面SIF K_1/K_2 数值计算结果汇总如表2所示.

表2 不同加载工况下界面SIF K_1/K_2 数值计算结果

$\beta/^\circ$	$K_1/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	$K_2/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	$K/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	$\gamma/^\circ$
25	0.056	0.388	0.392	81.83
30	0.111	0.362	0.379	72.99
40	0.165	0.345	0.382	64.47
45	0.173	0.312	0.357	61.02
50	0.202	0.261	0.33	52.29
60	0.252	0.216	0.332	40.62
70	0.275	0.103	0.342	20.54
80	0.288	0.076	0.338	14.79
90	0.303	0.012	0.303	2.27

表2表明,当加载角由 25° 到 90° 变化时,界面SIF K_1 逐渐增大, K_2 逐渐减小. 当加载角 $\beta = 90^\circ$ 时, $K_1 = 0.303$, $K_2 = 0.012$, $K_2/K_1 = 4.0\%$, 即界面裂尖奇异位移场支配区以 δ_y 为主,但 δ_x 也起作用; 当加载角 $\beta = 25^\circ$ 时, $K_1 = 0.056$, $K_2 = 0.388$, $K_1/K_2 = 14.4\%$, 即界面裂尖奇异位移场支配区以 δ_x 为主, δ_y 也起作用.

当加载角在 $25^\circ \sim 45^\circ$ 之间时,巴西盘试件界面SIF K_2 远大于 K_1 , 即位于这个加载角度范围的巴西盘试件,试件破坏模态由 K_2 控制,断裂首先自界面裂尖处起裂,沿着界面扩展,直至界面完全剪开,这与试件试验现象完全一致,如图4(a)所示. 试件所用的粘结胶脆性很大,所以整个裂纹扩展和破坏过程试件很短.

随着加载角由 $50^\circ \sim 80^\circ$ 增大,巴西盘试件界面SIF K_1 逐渐增大、 K_2 逐渐减小,两者数值相当,此时加载的巴西盘试件断裂模态由复合应力强度因子 $K = \sqrt{K_1^2 + K_2^2}$ 控制,断裂自界面裂尖处起裂,然后开始向弱侧母材曲折(与GFRP板相比,沥青混合料为弱侧母材),裂纹扩展路径表现为斜线,最后由于沥青混合料被拉断导致试件破坏,如图4(b)所示. 加载角度在 $50^\circ \sim 80^\circ$ 之间的试件,由复合应力强度因子 $K = \sqrt{K_1^2 + K_2^2}$ 控制试件的破坏模态.

当加载角度达到 $80^\circ \sim 90^\circ$ 时,巴西盘试件界面SIF K_1 在试件破坏模态中起主导作用,此时巴西盘试件裂纹依然自界面裂尖处起裂,向母材弱侧沥青混合料作微小曲折,然后随着荷载的增大沥青混合料被拉断,沥青混合料的断口近似平行于界面. 在加载角度 $80^\circ \sim 90^\circ$ 有效试件为5个,加载角度 80° 试件3个,加载角度 90° 试件2个. 2个 90° 试件是沥青混合料沿着界面被拉断,断裂近似为一条直线,而且断口上能分辨出界面裂纹起裂向沥青混合料扩展的痕迹,如图4(c)所示. 3个 80° 试件中,2个试件断口为斜线,1个试件断口为直线,可能的原因是 80° 时SIF K_1 大于 K_2 ,但两者的差值还没达到 K_1 起主导作用的程度,加上试验误差,使得加载角度为 80° 的3个试件破坏断口出现了分化.

将表2的数值计算结果以模态角 $\gamma = \arctan(K_2/K_1)$ 和断裂破坏时的复合应力强度因子 K 之间的关系图来表示,如图7所示. 可以看出,在不同模态角下试件断裂破坏时的临界复合应力强度因子 K_{ic} 是不同的,所以在进行GFRP沥青混合料界面强度评价时不能单单以 $K_i \geq K_{ic}$ 作为破坏准则,还需要考虑 K_{ic} 对应的模态角.

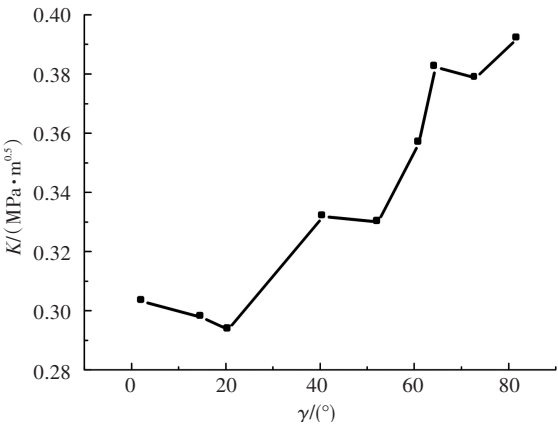


图7 各种模态下界面裂纹复合应力强度因子

界面复合应力强度因子 K_i 达到临界复合应力强度因子 K_{ic} 时,界面裂纹将开始扩展,可能的扩展路径有沿界面、向沥青混合料一侧曲折和向GFRP板一侧曲折3个方向,决定界面裂纹实际起裂的参

数是模态角 γ . 当界面裂纹有向较强材料 GFRP 一侧曲折趋势时, 先达到界面破坏条件, 此时 GFRP 还未达到破坏条件, 发生界面破坏. 当界面有向较弱材料沥青混合料一侧曲折趋势时, 如果模态角较小, 则会先达到沥青混合料曲折破坏条件, 发生曲折破坏; 如果模态角较大, 则会先达到界面破坏条件, 发生界面破坏. 以加载角 25° 试件为例, 界面复合应力强度因子 K_I 达到临界复合应力强度因子 K_{Ic} 时, 对应的模态角 $\gamma = 81.8^\circ$, 发生界面破坏.

根据表 2 所列 K_I/K_2 数值计算结果, 整理成图 8 的形式, 并对数据进行拟合. 可以看出 GFRP 沥青混合料巴西盘试件断裂破坏时应力强度因子表现为椭圆分布形式. 拟合椭圆强度曲线的长轴、短轴分别记为 K_{2c}^* 、 K_{1c}^* , 即界面的断裂韧性.

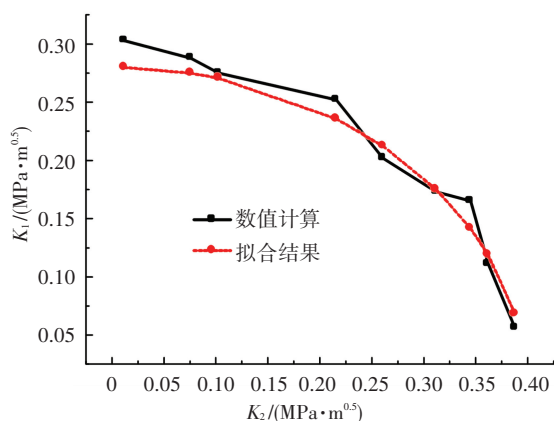


图 8 界面破坏的椭圆强度准则

K_{1c}^* 表示 GFRP 沥青混合料抵抗界面拉开的能力, K_{2c}^* 表示 GFRP 沥青混合料抵抗界面剪切的能力. 在图 8 的椭圆强度拟合曲线中 $K_{2c}^* = 0.398$, $K_{1c}^* = 0.263$, $K_{2c}^* > K_{1c}^*$, 表明 GFRP 沥青混合料抵抗界面剪切的能力强于抵抗界面拉开的能力, 即 GFRP 沥青混合料发生界面拉开破坏的可能大于界面剪切破坏.

4 结 论

1) 采用含预制界面裂纹的双材料巴西盘进行了 GFRP 沥青混合料的断裂力学性能分析, 讨论了不同加载角度下界面预制裂纹试件的破坏规律. 含预制界面裂纹的双材料巴西盘试验能很好地反映 GFRP 沥青混合料在拉伸、拉剪等不同荷载作用下的断裂过程和破坏形式.

2) 加载角度在 $25^\circ \sim 45^\circ$ 的巴西盘试件, 试件破坏模态由 K_2 控制, 发生界面剪开断裂; 加载角度在 $50^\circ \sim 80^\circ$ 时, 巴西盘试件断裂模态由复合应力强度因子 K 控制, 发生界面曲折破坏, 断裂裂纹扩展路径表现为斜线, 沥青混合料被拉断; 加载角度在

$80^\circ \sim 90^\circ$ 时, 试件破坏模态由 K_I 控制, 发生界面拉开破坏, 沥青混合料的断口近似平行于界面. GFRP 沥青混合料应力强度因子 K_I/K_2 表现为椭圆分布, 符合椭圆强度准则.

3) 利用界面裂尖后缘裂纹张开位移外插计算的界面 SIF K_I/K_2 , 计算方法简单实用, 可以作为 GFRP 沥青混合料界面强度的评价参数.

参考文献

- [1] WILLIAMS M L. The stresses around a fault or a crack in dissimilar media [J]. Bull Seismol Soc Am, 1959, 49 (2): 199–204.
- [2] RICE J R, SIH G C. Plane problems of cracks in dissimilar media [J]. App Mech, 1965, 32: 418–423.
- [3] ERDOGAN F. Fracture problems in composite materials [J]. Eng Fract Mech, 1972, 4: 811–840.
- [4] COMNINOU M. Interface crack with friction in the contact zone [J]. J Appl Mech Trans ASME, 1977, 44: 780–786.
- [5] DUNDERS J. Effect of elastic constants on stress in a composite under plane deformation [J]. Composite Materials, 1967, 1: 310–322.
- [6] SUO Z G. Singularities, interface and cracks in dissimilar anisotropic media [J]. Proc Roy Soc, 1990, A427: 331–358.
- [7] XU J Q, YUUKI R. Stress intensity factors for interface cracks between dissimilar orthotropic materials [J]. Trans of JSME, 1994, 60(577): 1943–1950.
- [8] LEE G H, CUI C B, BEOM H G. Edge delamination in an orthotropic bimaterial consisting of a thin film and a substrate [J]. Acta Mech, 2014, 225: 2583–2594.
- [9] MANKOUR A, BACHIR B B, BELHOUARI M. Brazilian disk test simulation intended for the study of interfacial cracks in bi-materials [J]. Computational Materials Science, 2012, 43: 696–699.
- [10] LEVESQUE G, ARAKERE N K, MECHOLSKY J, et al. Numerical and experimental investigation of mixed-mode fracture parameters on silicon nitride using the Brazilian disc test [J]. Fatigue & Fracture of Engineering, 2013, 33 (8): 490–503.
- [11] 解德, 钱勤, 李长安. 断裂力学中的数值计算方法及工程应用[M]. 北京: 中国科学出版社, 2009: 7–15.
- [12] ZHONG Zhipeng, REN Dalong, WAN Shui. A new numerical method for determining collapse load-carrying capacity of structure made of elasto-plastic material [J]. Journal of Central South University of Technology, 2014, 21(1): 398–404.
- [13] 钟志鹏, 万水, 任大龙. 巴西圆盘中心裂纹摩擦接触问题的逐点 Lagrange 乘子法 [J]. 东南学报 (自然科学版), 2012, 42(5): 994–999.

(编辑 魏希柱)