复 合 材 料 学 报　　第21 卷　第6 期　12 月　2004 年
Acta Materiae Compositae Sinica　　Vol. 21　No. 6　December　2004

文章编号: 1000-3851(2004) 06-0039-08

取向玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀开裂研究

程基伟[1,*]，王天民[2]

(北京航空航天大学, 1. 材料科学与工程学院, 2. 理学院, 北京 100083)

摘　要:　应用断裂力学的理论和方法对±30°、±45°、±60°三种取向玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀开裂行为进行了研究，并与单向玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀开裂行为进行了比较。结果表明，纤维取向对玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀行为有很大影响。三种取向玻璃纤维增强塑料的耐应力腐蚀性能强弱顺序为: ±30°、±45°、±60°玻璃纤维增强塑料。与单向玻璃纤维增强塑料相比，三种取向玻璃纤维增强塑料有更高的应力腐蚀临界载荷值，低于该载荷，可以认为在可接受的时间范围内不会发生应力腐蚀。进一步的讨论证实纤维 基体界面在取向玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀中起着重要作用。随外加载荷的变化，取向玻璃纤维增强塑料与单向玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀裂纹扩展机理不同。

关键词:　应力腐蚀开裂; 玻璃纤维增强塑料; 纤维取向; 裂纹扩展

中图分类号:　TB332　　**文献标识码:** A

STRESS CORROSION CRACKING OF ORIENTED GLASS FIBRE REINFORCED PLASTICS

CHENG Jiwei[1,*], WANG Tianmin[2]

(1. School of Materials Science and Engineering, 2. School of Science,
Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Stress corrosion cracking of three kinds of oriented glass fibre reinforced plastics (GRP), including ±30°, ±45°, ±60° oriented GRP, were studied by fracture mechanics theory and compared with the stress corrosion cracking of unidirectional GRP. The results show that the fibre orientation affects on the stress corrosion cracking of GRP seriously. For the oriented GRP in this investigation, from better stress corrosion resistance to worse the order is ±30°, ±45°, ±60° oriented GRP. Compared with unidirectional GRP, oriented GRP demonstrate higher stress corrosion threshold loads, below which GRP can't fail in acceptable exposure time. Further discussions conform that fibre/matrix interface plays an important role in the stress corrosion cracking of oriented GRP and the crack growth mechanisms of oriented GRP and unidirectional GRP are different under different applied loads.

Keywords: stress corrosion cracking; glass fibre reinforced plastics; fibre orientation; crack growth

自上个世纪三十年代发明玻璃纤维增强塑料(俗称玻璃钢)以来，因其比强度高、耐酸碱腐蚀、价格低廉和良好的可设计性等，在军事、建筑、船舶、汽车等领域，尤其是耐腐蚀化学领域得到了广泛应用。玻璃纤维增强塑料在很多腐蚀环境中优于金属。自上世纪六、七十年代起，人们发现虽然玻璃纤维增强塑料在没有应力作用下对无机酸或碱特别耐蚀，但一旦存在外加应力，即使很低，玻璃钢容器和管道在使用一段时间后也会发生突然失效。与其在单纯应力作用下的失效相比，单向玻璃纤维增强塑料材料的应力腐蚀裂纹是直线形而且尖锐，整个断裂表面比较平齐。许多学者在腐蚀机理、腐蚀动力学、断面形貌等方面对此进行了深入研究，得到了很多有价值的成果[1~10]。因为有材料因素、环境因素、力学因素或上述三种因素协同作用等影响玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀性能，应力腐蚀开裂的机理非常复杂，所以在有关玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀开裂的研究中，绝大多数研究及研究成果都集中在单向玻璃纤维增强塑料材料。但是，这对全面了解玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀开裂现象

收稿日期: 2004-04-07; 收修改稿日期:2004-09-15
通讯作者: 程基伟, 讲师, 在职博士生, 主要从事材料腐蚀与防护方面的研究　E-mail: chengjw@buaa.edu.cn

和机理远远不够。此外，在工业实际应用中，由于单向复合材料的高度各向异性，单向纤维增强复合材料并不常用，常用的是各种取向纤维增强的复合材料。对取向玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀开裂的研究，不仅有重要的理论价值，进一步丰富对玻璃纤维增强塑料应力腐蚀现象和机理的深入认识，而且对其在工业实际应用中的寿命预测等也具有重要的实际意义。

本文中针对几种取向玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀开裂行为进行了研究，并与单向玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀开裂行为进行了比较。在此基础上，对玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀机理进行了深入探讨。

1　材料和实验

1.1　材料和试样

实验所用树脂为 REICHHOLD 公司生产的 NORPOL DION 9102-500 环氧乙烯酯树脂，玻璃纤维采用 COTECH 公司生产的单向 E 玻璃纤维布。采用真空灌注法制备玻璃纤维增强塑料板材，室温固化 24 h，80 ℃后固化 3 h。共制备了 ±30°、±45°、±60° 三种纤维取向的正交铺层的玻璃纤维增强塑料板(相对于加载方向)。作为比较，采用同样的方法制备了单向纤维增强塑料板材。经测定，所制得玻璃纤维增强塑料板材的纤维体积分数约为 40 %。

在玻璃纤维增强塑料板材的两面通过树脂覆以碳纤维增强塑料(采用与玻璃纤维增强塑料同样的方法制备)，在压力下固化，制成碳纤维增强塑料/树脂/玻璃纤维增强塑料/树脂/碳纤维增强塑料的“三明治”板材。利用数控铣床将该板材加工成应力腐蚀实验所用的带凹槽的双悬臂梁试样，保证凹槽处的实验部分是玻璃纤维增强塑料，其具体形状和尺寸如图 1 所示(图中还示出了加载方向和纤维取向的角度)。在静载荷下的复合材料的应力腐蚀实验中，这种形状的试样能够使在一定的应力腐蚀裂纹长度内裂纹尖端的应力强度因子保持恒定。

1.2　应力腐蚀开裂实验

应力腐蚀实验采用如图 2 所示的施加静载荷的装置进行。腐蚀溶液为 1 M 的盐酸，实验温度恒定在 20 ℃ ±2 ℃。实验前，先用刀具预制尖锐裂纹。

实验过程中应力腐蚀裂纹的长度直接用一个竖立的游标卡尺进行测量。

断裂后的裂纹表面用 JSM6300 扫描电子显微镜进行观察。

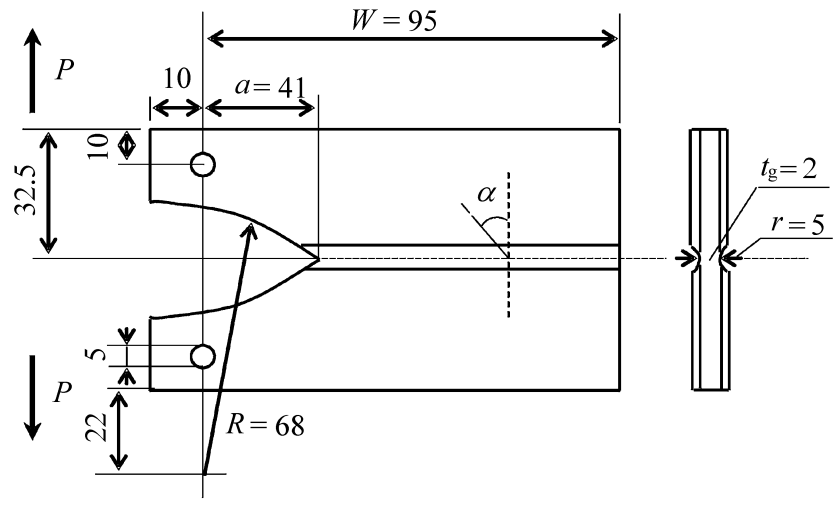


图 1　实验用带凹槽的双悬臂梁试样形状和尺寸示意图

Fig. 1　Tapered double cantilever beam specimen details in the stress corrosion cracking experiment (all dimension in mm)

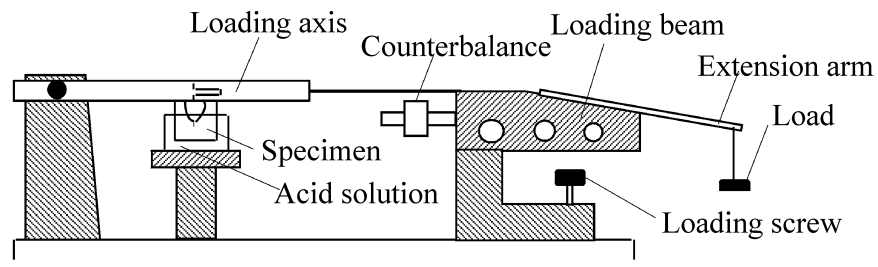


图 2　应力腐蚀开裂实验装置图

Fig. 2　Schematic representation of the rig used in the stress corrosion cracking experiment

1.3　力学性能测试

为了得到几种玻璃纤维增强塑料的力学参数，根据 ASTM D3039 M-00、ASTM D3410 M-95、ASTM D3518 M-94 分别进行了几种材料的拉伸、压缩和面内剪切实验。实验在 Instron6025 型试验机上进行。

为了确认所采用的双悬臂梁试样裂纹尖端应力强度因子 K_I 在一定裂纹长度范围内保持恒定，对应力腐蚀试样的柔度进行了测定。实验也在 Instron6025 型试验机上进行。

2　结果和讨论

2.1　断裂力学分析和柔度测试

实验测得的单向和取向玻璃纤维增强塑料的力学性能参数如表 1 所示。

对实验中所用的凹槽试样，Irwin、Kies 和 Mostovoy 等给出了裂纹扩展的应变能释放率和柔度之间的关系为[12,13]

$$G_I = \frac{P^2}{2t_g w}\frac{dC}{d(a/w)} \qquad (1)$$

式中：G_I 是应变能释放率(Ⅰ型)，P 是所施加的应力，t_g 是凹槽的厚度，也就是裂纹尖端前缘的试样

表1 单向和取向纤维增强塑料的力学性能参数

Table 1 The mechanical properties of the unidirectional and oriented GRP

Mechanical property	Unidirectional GRP	Oriented GRP		
		±30°	±45°	±60°
Longitudinal tension modulus/ GPa	33.75	19.29	12.84	11.26
Transverse tension modulus/ GPa	6.39	11.26	12.84	19.29
Poisson ratio	0.21	0.51	0.53	0.30
In-plane shear modulus/ GPa	4.18	4.80	5.04	4.80

厚度，w 是试样的宽度，$\frac{dC}{d(a/w)}$ 是试样的柔度微分。

Paris 和 Sih 对同质、各向同性的材料，在平面应变的条件下，给出了应力强度因子和应变能释放率的关系[14]

$$K_I^2 = \frac{EG_1}{1-\nu^2} \qquad (2)$$

式中：E 是材料的杨氏弹性模量，ν为泊松比。

对于各向异性材料，Sih 又推出了式(3) 的等效表达式，只是将其中的弹性模量用有效弹性模量 E_{ef} 来代替[15]

$$\frac{1}{E_{ef}} = \left(\frac{a_{11}a_{22}}{2}\right)^{1/2}\left(\frac{a_{22}}{a_{11}}\right)^{1/2} + \frac{2a_{12}+a_{66}}{2a_{11}}^{1/2} \qquad (3)$$

式中：$a_{11}=\frac{1}{E_{11}}$，$a_{12}=\frac{-\nu_2}{E_{22}}$，$a_{22}=\frac{1}{E_{22}}$，$a_{66}=\frac{1}{G_{21}}$，其中22 的方向是纤维方向。

根据式(1) ～式(3)，可以得到应力强度因子 K_I 与外加应力 P 之间的关系为

$$\frac{K_I}{P} = \frac{E_{ef}}{2(1-\nu^2)}\frac{1}{t_g w}\frac{dC}{d(a/w)} \qquad (4)$$

从上式中可以看出，对施加的外载 P 而言，裂纹尖端的应力强度因子 K_I 仅依赖于试样的柔度微分。

图3 是几种材料的试样柔度微分随归一化的裂纹长度的变化曲线。从图中可以看出，对实验中所用的试样，在裂纹长度小于15 mm(相对于 a/ w= 0.59) 的范围内，可以认为其柔度微分基本不变，因此在15 mm 的裂纹范围内其尖端应力强度因子 K_I 基本保持不变。

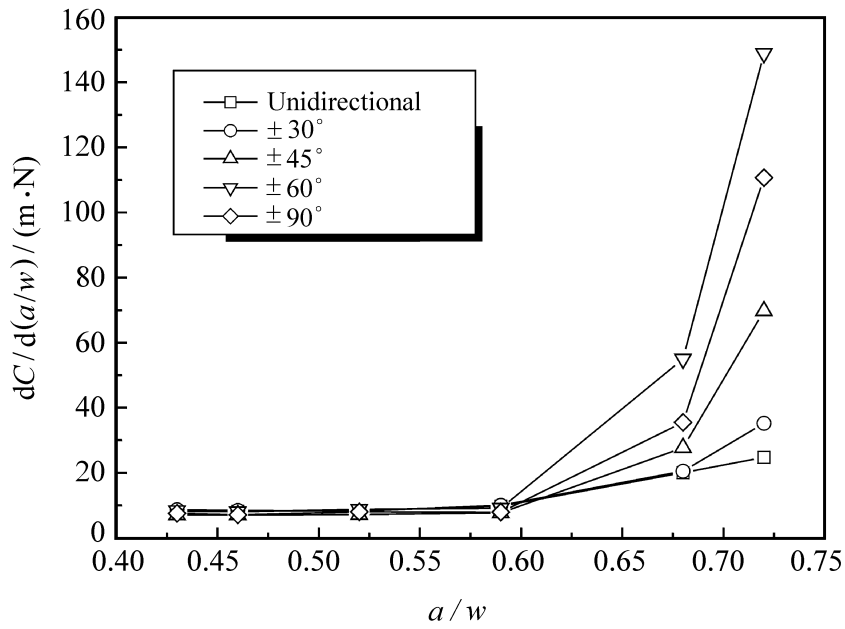


图3 单向和取向玻璃纤维增强塑料试样的柔度微分随归一化的裂纹长度的变化曲线

Fig. 3 Variation of compliance derivatives with normalized crack length of the unidirectional and oriented GRP

根据式(3)、式(4) 及图3 中所示的结果计算出的各类试样在15 mm 裂纹范围内的恒定尖端应力强度因子 K_I 值列在表2 中。

2.2 材料应力腐蚀的动力学

图4 给出了几种材料在不同外加载荷下的裂纹扩展随时间变化的曲线。从这些曲线以及具体实验过程，可以得到取向纤维增强塑料的应力腐蚀开裂的几个特点：

(1) 几种材料的应力腐蚀裂纹扩展的过程大致类似，基本可以分为三个阶段：裂纹萌生、在临界裂纹长度下的缓慢扩展以及裂纹的快速失稳扩展。

表2 各种取向纤维增强 GRP 在不同载荷下的 K_I 值

Table 2 The calculated constant K_I values of different oriented GRP under different loads MPa · $m^{1/2}$

GFRP	1000 N	900 N	800 N	700 N	600 N	500 N	400 N
Unidirectional GRP	20.48	18.44	16.39	14.34	12.29	10.24	8.19
±30° oriented GRP	21.64	19.48	17.31	15.15	12.96	10.82	8.66
±45° oriented GRP	19.41	17.47	15.53	13.59	11.65	9.71	7.77
±60° oriented GRP	17.33	15.59	13.86	12.13	10.40	8.66	6.93

其中第二个阶段，也就是在临界裂纹长度下的缓慢扩展阶段是玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀裂纹扩展的控制步骤。

(2) 如果用裂纹扩展随时间的变化和断裂失效的时间来表征材料的抗应力腐蚀性能，对实验所用的几种取向纤维材料，在所使用的应力范围内，抗应力腐蚀性能的强弱顺序是：±30°、±45°、±60°纤维增强塑料。从应力腐蚀曲线的比较中可以看出纤维取向对应力腐蚀裂纹扩展速率的影响很大。同时，外加应力的变化对取向纤维增强塑料应力腐蚀行为的影响和其对单向纤维增强塑料应力腐蚀行为的影响也有所不同。从图4 中的曲线可以看出，在实验所用的应力范围内，±30°纤维增强塑料始终表现出比单向纤维增强塑料好得多的耐应力腐蚀

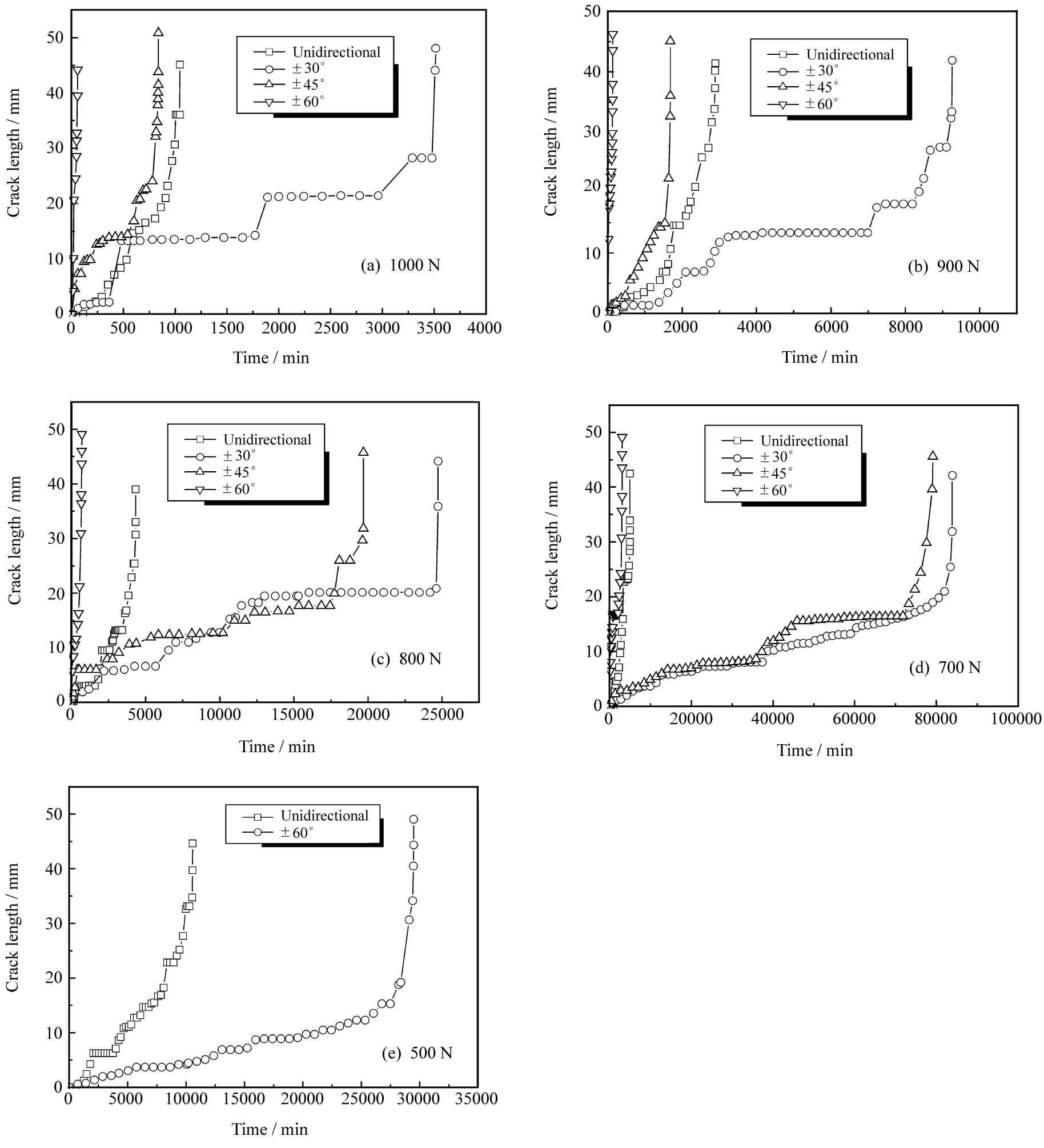


图4　单向和取向纤维增强塑料在不同载荷下的裂纹扩展随腐蚀时间变化曲线

Fig. 4　Curves of crack growth with time under different loads for unidirectional and oriented GRP

性。±45°纤维增强塑料，在1000 N 和900 N 时，其应力腐蚀裂纹扩展速率比单向纤维增强塑料的应力腐蚀裂纹扩展速率快，而在800 N 和700 N 时，其抗应力腐蚀性能高于单向纤维增强塑料。±60°纤维增强塑料和单向纤维增强塑料的比较也有同样的变化。在800 N～1000 N 的范围内，±60°纤维增强塑料的应力腐蚀失效比单向纤维增强塑料快得多，在700 N 时相差不大，而在500 N 时，±60°纤维增强塑料则显示出比单向纤维增强塑料好得多的抗应力腐蚀性能。非常明显，外加载荷的变化对取向纤维增强塑料的裂纹扩展速率的影响比对单向纤维增强塑料的裂纹扩展速率的影响更加显著。

(3) 在所进行的应力腐蚀实验中，在600 N 的外加载荷下，±30°和±45°纤维增强塑料在实验进行三个多月后都没有失效，裂纹在经历一个很短的扩展过程后一直处于停滞状态。±60°纤维增强塑料在400 N 的外加载荷的作用下也有同样的结果。而单向纤维增强塑料的试样在400 N 的外加载荷作用下33420 min 后应力腐蚀失效断裂。因此可以断定，取向纤维增强塑料比单向纤维增强塑料具有更高的应力腐蚀临界载荷，低于该临界载荷，材料在可接受的腐蚀时间内不发生应力腐蚀失效断裂。

在应用断裂力学理论对玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀开裂进行研究的过程中，许多研究者发现，在裂纹扩展速率 v 和裂纹前端应力强度因子 K_I 之间存在着幂函数的关系[8,11,16]

$$v = \frac{da}{dt} = AK_I^n \qquad (5)$$

其中：A 和 n 是应力腐蚀裂纹扩展常数，K_I 由式(3) 和式(4) 求得。

用最小二乘法拟合几种材料的 log v-log K_I 直线关系如图5 所示。与图中各条直线相对应的拟合关系式为：

单向纤维增强塑料

$$\log v = -11.14 + 3.53 \log K_I \quad (R = 0.95897) \qquad (6)$$

±30°纤维增强塑料

$$\log v = -20.06 + 9.87 \log K_I \quad (R = 0.98672) \qquad (7)$$

±45°纤维增强塑料

$$\log v = -22.98 + 12.87 \log K_I \quad (R = 0.98182) \qquad (8)$$

±60°纤维增强塑料

$$\log v = -16.42 + 8.91 \log K_I \quad (R = 0.98388) \qquad (9)$$

从各条拟合直线的相关系数可以认为裂纹扩展速率和裂纹前端应力强度因子之间的幂函数关系规律是正确的，几种材料的幂函数关系分别为

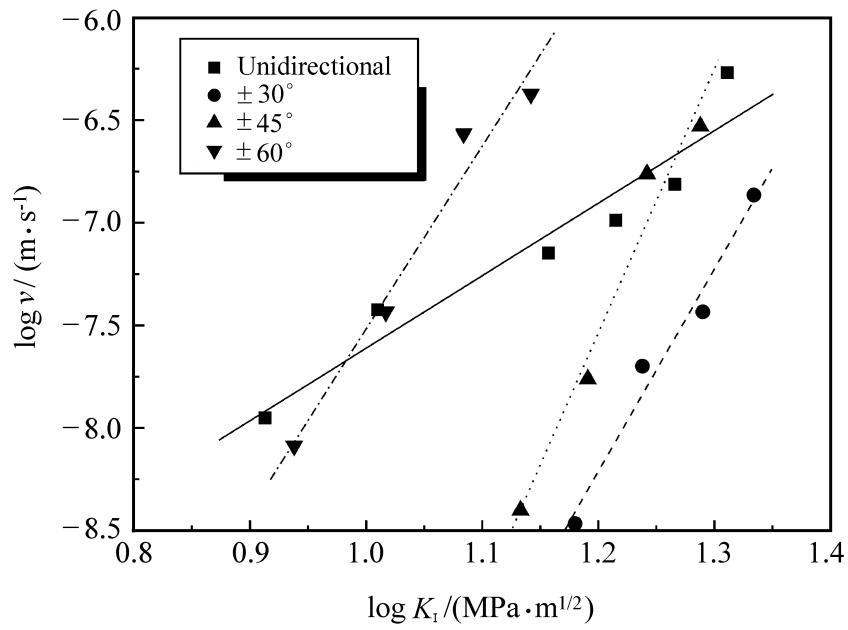


图5 单向纤维和取向纤维增强塑料应力腐蚀的 log v-log K_I 关系曲线

Fig. 5 Comparison of log v-log K_I among unidirectional and oriented GRP

单向纤维增强塑料：$v = \frac{da}{dt} = 7.24 \times 10^{-12} K_I^{3.53}$ (10)

±30°纤维增强塑料：$v = \frac{da}{dt} = 8.71 \times 10^{-21} K_I^{9.87}$ (11)

±45°纤维增强塑料：$v = \frac{da}{dt} = 1.05 \times 10^{-23} K_I^{12.87}$ (12)

±60°纤维增强塑料：$v = \frac{da}{dt} = 3.80 \times 10^{-17} K_I^{8.91}$ (13)

从以上公式中 n 值的差异及图5 中几条直线的直观比较可以看出，取向纤维增强塑料的裂纹扩展速率随 K_I 的变化(即随外加应力的变化) 比单向纤维增强塑料的裂纹扩展速率随 K_I 的变化大。由此可以进一步推断，取向纤维增强塑料和单向纤维增强塑料在应力腐蚀的机理上应该有所不同，这个差异在很大程度上应该和纤维/基体界面相关。在单向纤维增强塑料的应力腐蚀中，外加载荷的方向和纤维方向一致，裂纹和纤维方向垂直，很少发生相关的诸如脱粘、纤维拔出等界面破坏。而在取向纤维增强塑料的应力腐蚀中，外加载荷的方向和纤维方向存在一定角度，因此纤维/基体界面更容易受到破坏。而界面的破坏则会松弛裂纹尖端的应力场并会改变裂纹的扩展方向，因此对裂纹扩展产生较大的影响。

2.3 材料应力腐蚀的断面分析

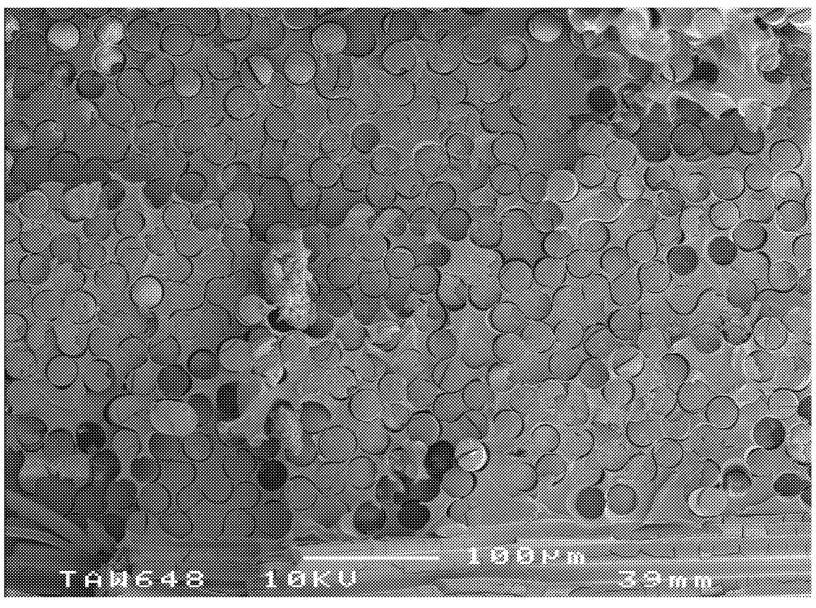
图6 示出了几种材料断裂表面的 SEM 照片。可以看出，单向纤维增强塑料试样的断面比较平整，几乎看不到纤维拔出、脱粘等的界面失效。与此相对照，取向纤维增强塑料试样的断面上有明显

的纤维/基体界面的破坏和裂纹沿界面的扩展，形成了“山谷”状的形貌，因此，有理由推断纤维/基体界面在取向纤维增强塑料材料的应力腐蚀断裂中有重要作用。

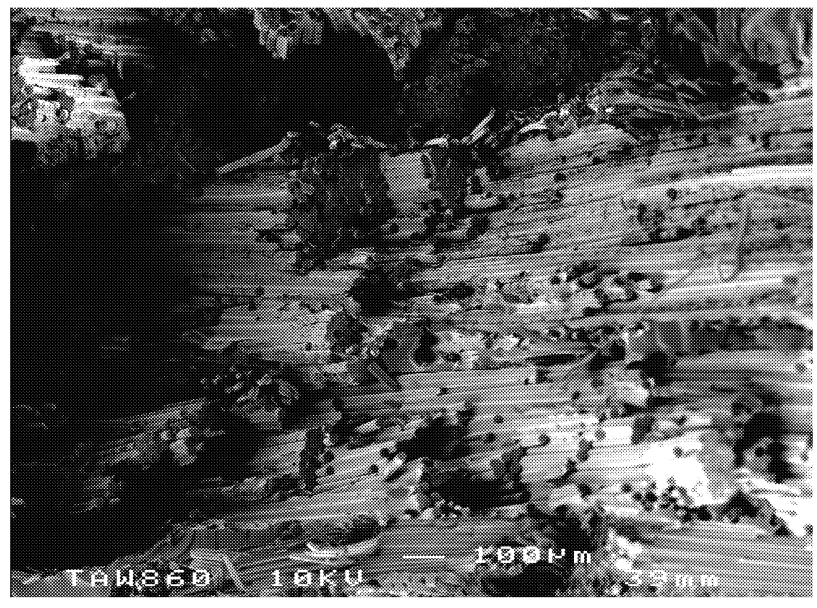
对比 Hogg 和 Hull 提出的单向玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀裂纹扩展的模型[17,18]，结合图6所示的取向纤维增强塑料的断面形貌，本文作者提出描述取向纤维增强塑料的应力腐蚀裂纹扩展模型如图7所示。当裂纹扩展到一个具有较弱界面的纤维时，在裂纹尖端应力集中的作用下，界面首先发生破坏，裂纹沿着纤维扩展(7(a))，使裂纹变钝，并使裂纹尖端应力场得到松弛。一旦界面发生破坏，腐蚀介质就能够渗透进来与纤维直接接触，发生离子交换反应。纤维在其最薄弱的截面上断裂(7(b))，使裂纹前的树脂发生破坏并允许介质渗透到下一根纤维，接着再发生离子交换反应和纤维断裂。但当裂纹扩展到另一根界面比较弱的纤维时，界面比纤维先发生破坏，从而再次改变裂纹扩展方向7(c)。因此，取向纤维增强塑料的断面远比单向纤维增强塑料的断面粗糙不平。

2.4　纤维/基体界面在应力腐蚀中的作用

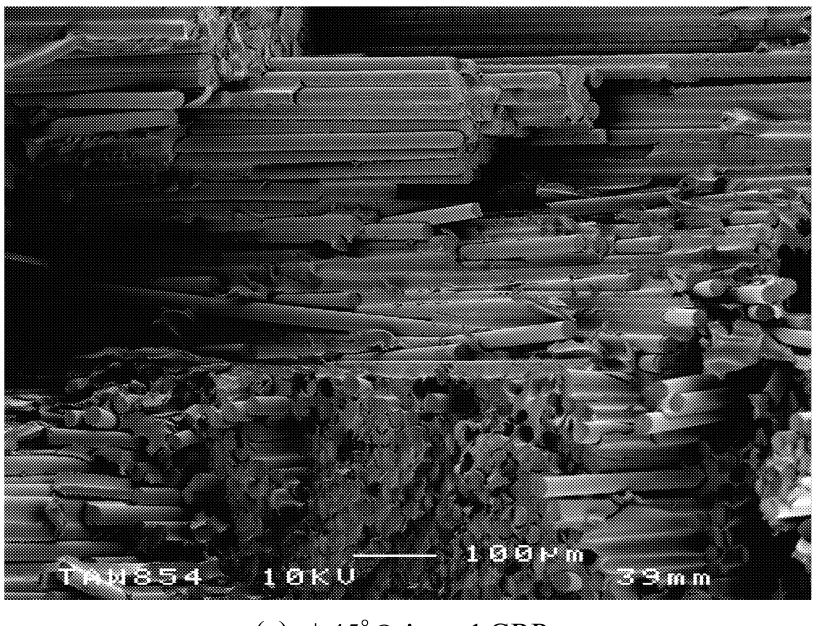
根据图7所示的模型，在取向玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀中，应该有两种应力作用影响着裂纹扩展速率和应力腐蚀性能，即沿纤维方向的应力和垂直于纤维方向的应力。进一步可以断定，作用在纤维上的使纤维/基体界面发生破坏的垂直于纤维方向的应力起重要作用。一旦这种界面发生破坏，会产生两方面的效应：(1) 松弛裂纹尖端的应力集中而延缓腐蚀；(2) 使腐蚀介质更容易和暴露出的纤维直接接触而加速腐蚀。这两种作用的结果影响着裂纹扩展的速率并改变着裂纹扩展的方向。结合2.2中所述的应力变化对三种取向纤维的影响规律，可以推断，在玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀开裂过程中，对于影响裂纹扩展速率的两种应力因



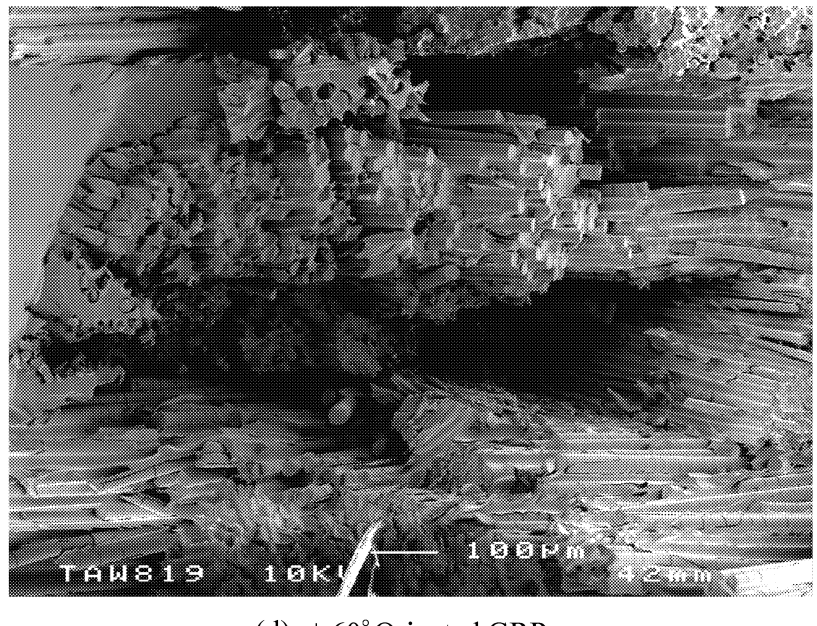
(a) Unidirectional GRP



(b) ±30° Oriented GRP



(c) ±45° Oriented GRP



(d) ±60° Oriented GRP

图6　单向和取向纤维增强塑料试样应力腐蚀断面的SEM照片

Fig. 6　Typical SEM photographs of the stress corrosion fracture surface of unidirectional and oriented GRP

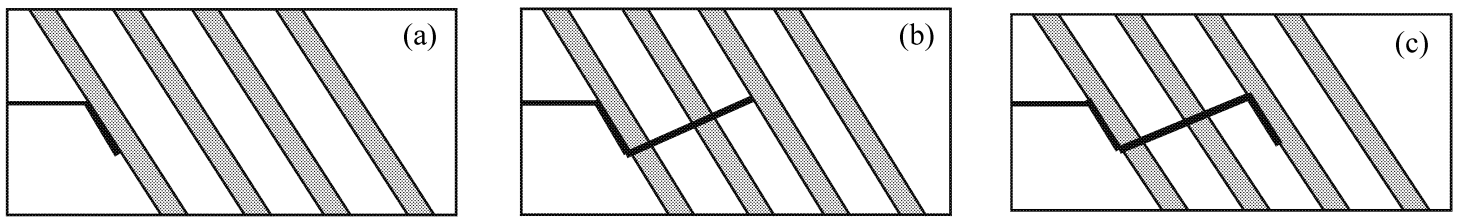


图7 取向纤维增强塑料的应力腐蚀裂纹扩展示意图(其中灰色部分为纤维)

Fig. 7 Schematic representation of crack growth through fibres (dark) and resin (light) in the stress corrosion cracking of oriented GRP

素, 如果垂直于纤维方向的应力大到能够使纤维/基体界面失效, 则腐蚀介质能够很快渗透到纤维并与之发生离子交换反应, 那么在这种情况下, 是该种垂直于纤维方向的应力更主要的影响了裂纹扩展速率, 此时裂纹扩展的快慢主要取决于玻璃纤维因离子交换反应而失效断裂的速率。如果垂直于纤维方向的应力不足以破坏纤维/基体界面, 那么沿纤维方向的应力更主要的影响了裂纹扩展速率, 此时裂纹扩展的快慢主要取决于腐蚀介质通过基体而到达纤维的速率。因此, 对本实验所用的取向玻璃纤维增强塑料, 在高应力作用下, 垂直于纤维方向的应力能够破坏纤维/基体界面, 裂纹扩展速率的控制步骤是纤维因为离子交换反应而失效的过程; 在低应力作用下, 垂直于纤维方向的应力不能够破坏纤维/基体界面, 裂纹扩展速率的控制步骤是腐蚀介质在基体中通过扩散和渗透到达纤维的过程。而对单向纤维增强塑料而言, 在同样的外加载荷下, 材料在垂直于纤维方向上的应力小于取向纤维增强塑料, 整个裂纹扩展过程中很少纤维/基体界面破坏, 在所使用的应力范围内, 裂纹扩展速率的控制步骤始终是腐蚀介质在基体中通过扩散和渗透到达纤维的过程。两类材料随外加载荷变化而不同的裂纹扩展机理, 是产生图4 和图7 中所示结果的根本原因, 也能够比较好的解释2.2 节中外加载荷的变化对取向纤维增强塑料裂纹扩展速率的影响比对取向纤维增强塑料的裂纹扩展速率的影响更加显著的结果, 也就出现了高应力下±45°、±60°纤维增强塑料的裂纹扩展速率高于单向纤维增强塑料, 而在低应力时却又表现出比单向纤维增强塑料好的抗应力腐蚀性能的现象。

3 结 论

(1) 取向纤维增强塑料的应力腐蚀开裂的断面远比单向纤维增强塑料的平面断口粗糙不平。

(2) 纤维取向对玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀性能有重要影响。对于本文中所采用的取向纤维增强塑料, 其抗应力腐蚀性能的强弱顺序依次为: ±30°、±45°、±60°纤维增强塑料。

(3) ±30°、±45°、±60°纤维增强塑料具有比单向纤维增强塑料高的应力腐蚀临界载荷, 低于该载荷, 可以认为在可接受的时间范围内材料不会发生应力腐蚀。

(4) 纤维/基体界面对取向纤维增强塑料的应力腐蚀有重要影响。在垂直于纤维方向的应力能够破坏纤维/基体界面的情况下, 裂纹扩展的控制步骤是纤维因离子交换反应而逐渐失效的过程。在垂直于纤维方向的应力不足以破坏纤维/基体界面的情况下, 裂纹扩展的控制步骤是腐蚀介质通过基体而到达纤维的过程。对单向纤维增强塑料而言, 在整个实验载荷内, 裂纹扩展的控制步骤都是腐蚀介质通过基体而到达纤维的过程。正是因为这种不同的腐蚀机理, 使外加载荷对取向纤维增强塑料的应力腐蚀裂纹扩展速率的变化有更显著的影响。

致谢: 作者之一(程基伟) 感谢国家留学基金委的资金支持, 同时感谢Queen Mary, University of London 大学材料系, 感谢Paul Hogg 教授对本人的指导, 感谢Colin Longdown 先生在实验方面所给予的协助, 感谢任国钢博士和王汝敏教授所给予的有益讨论。

参考文献:

[1] ogg P J. The stress corrosion of glass reinforced plastics [D]. Liverpool: University of Liverpool, 1981.

[2] Hogg P J, Price J N, Hull D. Stress corrosion of GRP [A]. In: 39th Annual Conference, Reinforced Plastics/Compostes Institute, USA: The Society of the Plastics Industry, Inc. [C]. 1984. Session 5-c, 1-6.

[3] Price J N. Stress Corrosion Cracking in Glass Reinforced Composites [A]. In: Fractography and Failure Mechanisms of Polymers and Composites [M]. UK: Elsevier, 1989.

[4] Hogg P J. A model for stress corrosion crack growth in glass reinforced plastics [J]. Com Sci Tech, 1990, 38(1): 23-42.

[5] French M A, Pritchard G. Environmental stress corrosion of hybrid fibre composites [J]. Com Sci Tech, 1992, 46(2):

257 - 263.

[6] Leetham R, Kukureka S N. Stress corrosion of GRP tensile strength members in optical fibre cables [A]. In: The 3rd European Conference on Advanced Materials and Processes [C]. Paris: [s. n.], 1993. 1637 - 1646.

[7] Frankle R S. Stress corrosion cracking in fibre glass composite structures ——A case study [J]. Poly & Poly Com, 1998, 6(5): 269 - 277.

[8] Sekine H, Beaumont P W R. On a simple power law for macroscopic crack propagation rate due to stress-corrosion cracking in unidirectional GFRP composites [J]. Mat Sci Eng A, 2000, 285: 298 - 302.

[9] Ely T, Kumosa M. The stress corrosion experiments on an E-glass/Epoxy unidirectional composite [J]. J Com Mat, 2000, 34(10): 841 - 878.

[10] Bergman G. Stress corrosion failure of FRP structures used for chlorine-dioxide-containing environments in pulp mills [A]. In: 10th International Symposium on Corrosion in the Pulp and Paper Industry [C]. Helsinki, Finland: [s. n.], 2001. 337 - 361.

[11] Sapalidis S N. The stress corrosion of glass reinforced plastics at elevated temperatures [D]. London: Queen Mary University of London, 1998.

[12] Irwin G R, Kies J A. Critical energy rate analysis of fracture strength [J]. Weld J Res Supp, 1954, 33: 193 - 198.

[13] Mostovoy S, Ripling E J. Fracture toughness of an epoxy system [J], J Appl Poly Sci, 1966, 10: 1351 - 1371.

[14] Paris P C, Sih G G. Fracture toughness testing and its applications [R]. ASTM STP 381, 1964. 30 - 83.

[15] Sih G G, Paris P C, Irwin G R. On cracks in rectilinearly anisotropic bodies [J]. Int J Frac Mech, 1965, 1: 189 - 203.

[16] Price J N. The propagation of stress corrosion cracks in aligned GRP [D]. Liverpod: University of Liverpool, 1985.

[17] Hogg P J, Hull D. Micro mechanisms of crack growth in composites materials under corrosive environments [J]. Metal Science, 1980, 14: 441 - 449.

[18] Hogg P J, Hull D. BPF Reinforced Plastics Congress [M]. London: British Plastics Federation, 1982. 115 - 120.

(上接第26 页)

类似的文摘还有:

*动力学环境是空间光学遥感器极其组件研制中不可忽视的一个重要因素, 因为它会对整机或组件造成结构性的破坏, 所以在其研制的不同阶段必须进行充分的动力学环境试验。空间光学系统是执行重要任务的子系统, 在结构及其性能、工作精度要求、密封性、可靠性方面均有比较特殊的要求。组件乃至系统必须经历动力学环境试验的严格考核, 而且必须在此基础上通过其它相关试验做进一步测试。*针对空间光子组件及系统的特点和要求, 对各种因素进行了综合研究并编制了各类组件的动力学环境试验大纲, 同时对试验中的控制、监测、试验夹具安全等诸方面技术实施做了分析和探讨。

*纳米材料具有奇异结构和特异功能, 使材料的电学、力学、磁学及光学性质发生了巨大的变化。*本文综述了纳米材料的制备及纳米烧结方法, 介绍了纳米材料科学研究的最新研究动向, 纳米材料研究过程中遇到的问题, 并对纳米材料的发展进行了展望。

*管成型以其易于实现零件的轻量化, 强韧化, 高效精确低耗的特点, 而成为先进塑性成型技术发展的一个重要方向。管先进塑性加工技术的的诞生、应用和发展离不开对重要基础问题的研究和掌握。*本文围绕管轴压精密成型和管精确弯曲领域的基础问题进行了研究。

4. 限制文摘只表示新情况, 新内容, 过去的研究细节可以取消。

5. 不说无用的话, 如“本文所谈的有关研究工作是对过去老工艺的一个极大的改进”, “本工作首次实现了...”, “经检索尚未发现与本文类似的文献”等词句切不可进入文摘。

6. 作者在文献中谈及的未来计划不纳入文摘。

7. 尽量简化一些措辞和重复的单元, 如:

不用	而用
at a temperature of 250 ℃ to 300 ℃	at 250 ℃～300 ℃
at a high pressure of 2000 psig	at 2000 psig (应换算成Pa)
at a high temperature of 1500 ℃	at 1500 ℃
discussed and studied in detail	discussed

8. 文摘第一句应避免与题目(Title) 重复。

(下转第69 页)