

时间相关的聚合物基复合材料失效准则

Time-Dependent Failure Criteria for Polymer-Matrix Composites

武汉理工大学 陈建中 朱四荣

[摘要] 聚合物基复合材料的黏弹性导致其力学性能随着服役时间的增加而下降,为了合理设计聚合物基复合材料结构,需要建立时间相关的失效准则。将幂律模型与波尔兹曼叠加原理相结合,以最大应变理论为基础建立了一种时间相关的聚合物基复合材料失效准则,并采用双移位因子法来考虑不同服役条件的影响。根据该失效准则,可以获得聚合物基复合材料结构在服役条件下的失效时间或满足设计使用年限要求的最小初始性能参数。

关键词: 聚合物基复合材料 失效准则 黏弹性 双移位因子法 最大应变理论

[ABSTRACT] The mechanical property of polymer-matrix composites (PMCs) structure may decrease with the increase of service time due to viscoelastic. In order to design PMCs structure, time-dependent failure criteria is needed. The power law model and Boltzmann superposition principle are combined. A time-dependent failure criteria for PMCs is established based on the maximum strain theory. Double shift factor method is used in the failure criteria to consider the effect of different service conditions. According to this failure criteria, failure time of PMCs structure can be obtained under service conditions and the minimum initial parameters which the design requirement can be determined.

Keywords: Polymer-matrix composites (PMCs) Failure criteria Viscoelastic Double shift factor method Maximum strain theory

材料的失效准则是对材料在某一条件下是否发生失效进行判定的原则与方法。材料的失效破坏是一个非常复杂的问题,而复合材料的失效尤为复杂。失效准则的建立需要以理论为基础,以试验为支撑,以应用为目标。为便于实际工程应用,在满足基本理论和试验结果的前提下,失效准则的具体形式应尽可能简单。复

合材料常见的失效准则包括最大应力准则、最大应变准则、张量多项式准则以及改进的和简化的 Tsai-Wu 准则等,均没有考虑时间因素^[1-6]。

聚合物基复合材料具有黏弹性能,其失效具有明显的时间相关性。随着聚合物基复合材料在工程结构中越来越广泛的应用,如玻璃纤维增强塑料管已成为给排水领域的主要管材之一。作为工程结构,必须保证在长期服役条件下具有足够的安全可靠性。因此,对于聚合物基复合材料的失效分析中不能仅仅考虑初始静强度或只通过某一安全系数进行折减的处理方式,必须考虑到服役时间的增加对其性能的影响,在失效准则中加入时间因素,建立其时间相关的失效准则^[7-12]。

1 应力应变分析

黏弹性材料力学行为的基本特点是时间相关性。在恒定的应力作用下,应变会随着时间的变化而逐渐增加,这就是蠕变。一般可采用 Boltzmann 叠加原理来描述这一现象,基本表达形式如下:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 J(t) + \int_0^t J(t-\zeta) \frac{d\sigma(\zeta)}{d\zeta} d\zeta \quad (1)$$

式中, $\varepsilon(t)$ 为 t 时刻总的应变; σ_0 为初始施加的应力; $J(t)$ 为 t 时刻的蠕变柔量。

式(1)表明,结构中 t 时刻总的应变为应力初值引起的应变加上应力变化过程产生的应变响应之和。根据 Boltzmann 叠加原理,在任意复杂应力作用下,如果知道了材料的蠕变柔量,就可计算得到任意时刻的应变值。对于实际工程结构而言,一般外荷载已知,结构上的应力相对容易获得,主要问题在于蠕变柔量的确定。

蠕变柔量根据不同的模型也有多种表达形式,这里采用一种比较简单且应用相对比较广泛的幂律模型:

$$J(t) = J_0 + J_1 t^n \quad (2)$$

式中, t 为时间; J_0 、 J_1 和 n 为材料的蠕变常数。其中, J_0 为初始柔量,可根据初始性能试验获得,而 J_1 和 n 需要根据蠕变试验数据通过双对数线性回归分析得到。

将式(1)和式(2)相结合,可得:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 (J_0 + J_1 t^n) + \int_0^t (J_0 + J_1(t-\zeta)^n) \frac{d\sigma(\zeta)}{d\zeta} d\zeta \quad (3)$$

* 国家自然科学基金资助项目(11102142),中央高校基本科研业务费专项资金(2012-1a-023)资助。

对于一般常见的聚合物基复合材料工程结构(如管道、容器等)而言,在长期服役过程中其外荷载一般变化不大,可近似认为处于恒定的应力状态,则应力函数为:

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t) \quad (4)$$

式中, $H(t)$ 为单位阶跃函数。

将式(4)代入式(3)则可得聚合物基复合材料简化的应力应变关系:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 (J_0 + J_1 t^n) \quad (5)$$

2 最大应变理论

复合材料的失效准则有几十种,其中基于最大应变理论的失效准则由于形式简单,可在实际工程结构中直接应用。因此,在一些聚合物基复合材料耐腐蚀容器、管道、化工设备等工程结构设计规范中得到采用。如 ASME-RTP-1、BS 7159、HG/T 20696 等标准都明确提出可按最大应变对复合材料结构进行设计与校核,并给出了相应的许用应变值^[13-15]。

最大应变理论认为材料失效是由于应变达到极限值引起的,由此确定的失效准则基本表达形式如下:

$$\varepsilon_{\max} \leq [\varepsilon] \quad (6)$$

式中, ε_{\max} 为工程结构在外荷载作用下的最大应变; $[\varepsilon]$ 为结构许用应变。这里只给出了拉应变的形式,如果是压应变只需取绝对值即可。

根据当前相关规范的设计方法, ε_{\max} 是按初始条件分析计算得到,没有考虑长期作用后应变增加的影响。而 $[\varepsilon]$ 的取值一般是直接给出,也无法体现时间的影响,如 HG/T 20696 给出的 $[\varepsilon]$ 为 0.1%,相对材料的破坏应变而言,其安全系数高达 10 倍。这样一种分析设计方法实质上是通过高的安全系数来间接考虑时间的影响,但由于式(6)中并没有体现时间因素,从而实际设计中与设计使用年限并没有关系。不论 20 年,还是 50 年、70 年的设计使用年限,设计的结果都一样,显然存在矛盾。有的规范规定了设计使用年限,但一旦设计使用年限变化后如何取值与设计,这又是一个需要解决的问题。

3 时间相关失效准则

这里基于最大应变理论来建立时间相关失效准则。为了考虑时间的影响,在最大应变准则式(6)中的 ε_{\max} 不再按初始条件计算,而是考虑 ε_{\max} 随着时间发生变化,根据具体设计使用年限来进行计算确定,即采用式(7)描述最大应变准则:

$$\varepsilon_{\max}(t) \leq [\varepsilon] \quad (7)$$

式中, $\varepsilon_{\max}(t)$ 为任意时间下的最大应变。

如果采用式(5)来描述应变随时间的变化,则有:

$$\sigma_0 (J_0 + J_1 t^n) \leq [\varepsilon] \quad (8)$$

很显然,上式可以对任意设计使用年限进行计算与分析。如果不考虑材料老化、疲劳等,假设材料的极限应变与时间没有关系,是材料自身所固有的一个性能参数,材料随着时间的作用会发生破坏,并不是因为材料的极限应变降低了,而是材料上作用的应变由于蠕变增加了。在此假设下,许用应变可按初始极限应变考虑一定的安全系数获得,材料破坏按线弹性考虑,则有:

$$[\varepsilon] = \frac{\sigma_u J_0}{FS} \quad (9)$$

式中, σ_u 为材料初始破坏时的最大应力; FS 为安全系数,可参照一般材料结构的设计规范取值。如果考虑其他因素会造成材料极限应变降低,安全系数可适当高一些,但远低于 10。如 AWWA M45 采用的基于长期性能试验的设计方法中,其长期内压安全系数只有 1.8^[16]。

联立式(8)、式(9)可得:

$$\sigma_0 (J_0 + J_1 t^n) \leq \frac{\sigma_u J_0}{FS} \quad (10)$$

上式就是经过一些简化与假设后得到的一种时间相关的聚合物基复合材料失效准则的基本表达形式。根据式(10),如果获得了聚合物基复合材料的 4 个基本性能参数 J_0 、 J_1 、 n 、 σ_u ,就可进行聚合物基复合材料结构的失效分析。

4 双移位因子法

由于复合材料的黏弹性能是和湿度、温度、应力水平等多种因素相关的,如果采用式(10)来分析,必须获得实际服役环境条件下的蠕变参数。而实际服役环境是复杂多变的,同一类结构可能处于不同的环境条件下,同一结构上的不同位置其初始应力水平也可能不同。这样就需要大量的性能参数或每次设计都需要针对具体服役条件进行试验。从而导致式(10)在实际工程结构中的适应性比较差。为了解决这一问题,根据时间-温度-应力等效原理,采用双移位因子法来考虑不同环境的影响。

在式(2)中引入水平移位因子和垂直移位因子,方程形式变为:

$$J(t) = J_0 + \frac{J_1}{b_V} \left(\frac{t}{a_H} \right)^n \quad (11)$$

式中, a_H 为水平移位因子, b_V 为垂直移位因子。不考虑耦合效应,假设水平移位因子和垂直移位因子都能够对温度、湿度和应力水平分离变量,则有,

$$a_H = a_T(T) a_\sigma(\sigma) a_\phi(\phi) \quad (12)$$

$$b_V = b_T(T) b_\sigma(\sigma) b_\phi(\phi) \quad (13)$$

式中, a_T 、 a_σ 、 a_ϕ 、 b_T 、 b_σ 、 b_ϕ 分别为温度、应力、湿度单一

因素下的水平和垂直移位因子。

为了得到单一因素条件下的移位因子,可以通过固定其他条件改变这一单一因素的试验来获得。

对于温度移位因子,常采用 WLF 方程进行计算:

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)}, \quad (14)$$

式中, T_0 为参考温度; T 为试验温度; C_1 和 C_2 为材料常数。

根据自由体积理论分析可知,其他因素下的移位因子都有类似式(14)的表达形式。只需通过选择几个具体的环境条件进行试验后根据式(14)便可获得移位因子的具体表达式,根据实际服役条件代入计算就可得到相应条件下的移位因子。

获得了水平移位因子 a_H 和垂直移位因子 b_V 后,将式(11)代入式(10)可得:

$$\sigma_0 \left(J_0 + \frac{J_1}{b_V} \left(\frac{t}{a_H} \right)^n \right) \leq \frac{\sigma_u J_0}{FS} \quad (15)$$

式(15)是考虑了具体服役环境修正后的聚合物基复合材料的时间相关失效准则。根据上式可以对任意环境条件下的聚合物基复合材料结构进行失效分析。

5 应用

时间相关的聚合物基复合材料失效准则可应用于以下几个方面:

(1) 失效判定。根据服役条件及材料性能判定该结构在某一服役时间下是否会失效,即判定式(15)是否成立。如果成立,则不会失效,否则就可能会出现失效。

(2) 确定结构在设计使用年限下的许用荷载。当材料一定时,在某一给定时间 t 下,式(15)恰好取得等号时所对应的荷载为结构在该时间下所能承受的最大荷载。式(15)可变形为:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_u} \leq \frac{J_0}{FS \left(J_0 + \frac{J_1}{b_V} \left(\frac{t}{a_H} \right)^n \right)} \quad (16)$$

上式左边为在外荷载作用下结构上产生的应力与材料的极限应力之比,相当于初始安全系数的倒数。需要注意的是右边的 a_H 和 b_V 的取值也和外荷载有关,则初始安全系数即使在设计使用年限一定时也并非定值,与具体服役条件有关。

(3) 确定结构的使用年限。当结构、材料及荷载都已知的情况下,根据式(15)可得结构的使用年限计算式:

$$t \leq a_H \left(\frac{\left(\frac{\sigma_u}{FS} - \sigma_0 \right) J_0 b_V}{\sigma_0 J_1} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (17)$$

(4) 材料设计。根据结构上的外载荷及设计使用年限,选择合适的材料性能参数来使得式(15)得到满足,从而可对材料进行合理设计,在保证安全性的基础上也具有合理的经济性。

6 结论

通过对 Boltzmann 叠加原理分析,结合幂律定律,以最大应变理论为基础建立了时间相关的聚合物基复合材料的失效准则,并通过移位因子法来考虑了不同服役条件的影响。时间相关失效准则可应用于聚合物基复合材料结构的失效判定、确定最大许用荷载、确定使用年限以及材料设计等方面。

本文重点在于,提出建立时间相关失效准则及其基本方法,通过一些简化与假设获得了一种时间相关失效准则的具体表达形式。虽然这些简化与假设的合理性还有待进一步研究,但这种方法对建立其他形式的时间相关失效准则具有一定的指导意义。

时间相关失效准则对聚合物基复合材料结构的设计具有重要意义,有必要开展进一步的研究,尤其是在试验方面,失效准则的建立离不开试验数据的支撑。

参考文献

- [1] 王宝来,吴世平,梁军. 复合材料失效及其强度理论. 失效分析与预防,2006,1(2):13-19.
- [2] 樊蔚勋. 唯象各向异性张量多项式失效准则简短述评. 南京航空航天大学学报,1984(4):1-8.
- [3] 汪凌云. 论纤维增强复合材料的失效准则. 纤维复合材料,1995,12(1):1-8.
- [4] 王震鸣,杨桂. 与复合材料强度理论有关的问题探讨 // 王震鸣,杜善义,张恒,等. 复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价: 第二册. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社,1998:20-62.
- [5] Soden P D, Hinton M J, Kaddour A S. A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates. Composites Science and Technology, 1998, 58(7): 1225-1254.
- [6] Eckold G C. Failure criteria for use in the design environment. Composites Science and Technology, 2002, 62(12): 1561-1570.
- [7] 杨挺青,罗文波,徐平,等. 黏弹性理论与应用. 北京: 科学出版社,2004.
- [8] 梁军,杜善义. 粘弹性复合材料力学性能的细观研究. 北京: 复合材料学报,2001(1):97-100.
- [9] 曲艳双,朱迅,董鹏,等. 树脂基复合材料的粘弹性研究进展. 纤维复合材料,2008(1):42-44.
- [10] Tschoegl N W. Time dependence in material properties: an overview. Mechanics of Time-Dependent Materials, 1997, 1(1): 3-31.

(下转第 96 页)

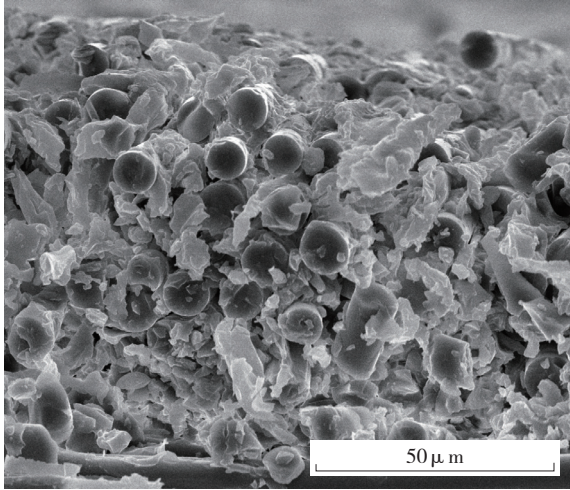


图9 PPBES/PPENK层压板断面扫描电镜照片
Fig.9 SEM image of PPBES/PPENK laminate cross section

PPENK 均具有优异的无卤阻燃性能,其层压板阻燃性能优异,阻燃等级为 V-0 级,结果如表 2 所示。

表2 PPBES/PPENK层压板的阻燃性能

测试条件		23℃, 50%RH, 48h					70℃, 168h				
样品编号		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
有焰燃烧时间 /s	t1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	t2	0	0	1.4	1.2	0	0	0	0.5	0	0.7
余灼时间 /s, t3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
总的有焰燃烧时间 /s, Σ t1+t2		2.6					1.2				
第 2 次引燃后单个样品余灼时间 /s, (t2+t3)		0	0	1.4	1.2	0	0	0	0.5	0	0.7
样品是否燃尽至支持夹		否	否	否	否	否	否	否	否	否	否
滴落物是否引燃脱脂棉		否	否	否	否	否	否	否	否	否	否
结论		样品阻燃性测试符合 V-0 要求									

3 结论

通过将 PPBES 与 PPENK 混合,利用溶液浸渍法制备了预浸粘片,采用热压成型工艺成功制备了玻纤布增强 PPBES/PPENK 树脂基层压板。PPBES/PPENK 为 4/6,层压板树脂含量为 35.4% 时,室温弯曲强度达 602.3MPa,高温性能优异,150℃ 弯曲强度保持率达 95.7,具有低吸水性以及较好的介电性,无卤阻燃性能可达 V-0 级,是比较理想的高性能复合材料层压板,具有良好的发展前景。

参考文献

- [1] 罗道明. 改性耐高温(180℃)环氧玻纤布层压板. 全国绝缘材料与绝缘技术专题研讨会论文集, 南京, 2007:130-136.
- [2] 刘锋, 许自贵, 赵成. F 级高强度环氧玻纤布层压板的研制. 第八届全国绝缘材料与绝缘技术学术交流会议论文集, 昆明, 2002 :97-100.
- [3] 张晓明, 刘雄亚. 纤维增强热塑性复合材料及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [4] Gao Y, Robetson P, Guiver M D, et al. Proton exchange membranes based on sulfonated poly(phthalazinone ether ketone)s/aminated polymer blends. Solid State Ionics, 2005, 176 (3): 409-415.
- [5] Sun Y M, Wu T C, Lee H C. Sulfonated poly(phthalazinone ether ketone) for proton exchange membranes in direct methanol fuelcells. J.Membr.Sci., 2005, 265(l): 108-114.
- [6] Jian X G, Dai Y, Zeng L, et al. Application of poly (phthalazinone ether sulfone ketone)s to gas membrane separation. J. Appl. Polym. Sci., 1999, 71(14): 2385-2390.
- [7] 郑亮. 玻璃纤维增强 PPBES 复合材料性能. 工程塑料应用, 2012, (2): 25-27.
- [8] 王锦艳, 刘程, 王守立. 新型覆铜箔玻纤布增强聚芳醚酮酮层压板. 绝缘材料, 2012, 45(4): 9-13.
- [9] 胡福田, 杨卓如. 改性聚四氟乙烯覆铜板的制备与性能研究. 化工新型材料, 2007, 35(2):54-56.
- [10] 温变英. 高分子材料与加工. 北京: 中国轻工业出版社, 2011.
- [11] 郑林, 张驰, 王洲一, 等. 一种改性苯并噁嗪树脂及其玻纤布层压板. 航空材料学报, 2011, 31(1): 62-66.
- [12] 王明晶. 含二氮杂萘酮联苯结构新型聚芳醚酮的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [13] 郭茂, 凌鸿. 苯并噁嗪和双马来酞亚胺共混树脂性能的研究. 热固性树脂, 2008, 3(1): 4-7.

(责编 小城)

(上接第 91 页)

- [11] Guedes R M. Creep and fatigue lifetime prediction of polymer matrix composites based on simple cumulative damage laws. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(11): 1716-1725.
- [12] Barbero E J. Prediction of long-term creep of composites from doubly-shifted polymer creep data. Journal of Composite Materials, 2009, 43(19): 2109-2124.
- [13] American Society of Mechanical Engineers. ASME RTP-1-2011 Reinforced thermoset plastic corrosion-resistant equipment. New York, American Society of Mechanical Engineers, 2011.
- [14] British Standards Institution. BS 7159 :1989 Code of practice for design and construction of glass-reinforced plastics (GRP) piping systems for individual plants or sites. London, British Standards Institution, 1989.
- [15] 中国五环化学工程公司. HG/T 20696-1999 玻璃钢化工设备设计规定. 北京: 全国化工工程建设标准编辑中心, 2000.
- [16] American Water Works Association. AWWA Manual M45, Fiberglass pipe design manual. 2nd ed. Denver: American Water Works Association, 2005: 43-74.

(责编 日午)