

胶焊单搭接头长时力学性能分析

殷 勇¹, 涂善东¹, 朱 进²

(1. 南京工业大学机械工程学院, 江苏 南京 210009; 2. 南京玻璃纤维研究院, 江苏 南京 210012)

摘要: 胶焊是将点焊技术与胶接技术结合使用的先进连接技术。由于众多优点, 该技术越来越受到重视和应用, 而其相关研究特别是对其长时蠕变应力的了解比较缺乏。本文利用三维粘弹塑性有限元法, 对胶焊连接接头的时间相关应力再分布进行分析, 并讨论了相关接头的设计和材料选择的改进方向。

关键词: 胶焊; 接头; 粘弹性; 粘塑性; 蠕变; 有限元

中图分类号: TG407 文献标识码: A 文章编号: 1005-5053(2001)03-0057-06

胶焊是将点焊技术与胶接技术结合使用的先进连接技术。胶接由于应力分布均匀, 抗疲劳和耐腐蚀性能好以及重量轻等特点, 并且适合不同材质、不同厚度、超薄规格和复杂构型构件的连接, 最早作为高档技术应用在航空航天以及军工项目上, 逐渐发展应用到机械、电子、轻工、纺织、建筑、化工、交通运输、医疗卫生、文化教育、农业等部门, 现已与机械连接和焊接并列成为三大连接方式之一。而剥离强度差, 老化寿命较低是胶接的薄弱点。与点焊结合后, 提高了剥离强度等性能, 同样克服了点焊易腐蚀和应力分布差的缺点, 增加了寿命, 相对可靠性得到了提高。

迄今为止, 虽然对胶焊接头的力学性能已做了一些理论研究^[1~3]、实验^[4,5]和有限元^[6~8]分析, 但由于大多胶粘剂成分为高聚物, 存在明显的时间相关的弹性和塑性, 即粘弹性和粘塑性现象, 直接表现为胶粘剂层的蠕变, 对胶焊结构内的应力分布产生显著影响, 因而有必要对其长时力学性能进行了解分析。国内外对胶接接头的蠕变行为进行过不少研究^[9], 但对新兴的胶焊技术进行该类研究尚未见报道。本文采用三维粘弹塑性有限元分析方法, 对胶焊单搭接头应力随时间的再分布进行了数值模拟。分析中以 Su^[10]研究的环氧树脂 21 号胶粘剂的粘弹塑性参数为例, 结合常保华^[6]所研究接头的几何尺寸和材料参数, 分析结果显示随着胶层的蠕变, 接头中焊点边缘的应力逐渐增大, 可以判断裂纹起裂应该在焊点与胶粘剂结合的界面附近。文章最后探讨了接头的材料

选择与优化设计。

1 粘弹塑性理论

1.1 粘弹性

粘弹性是聚合物材料力学性能的一个重要特性, 理想的弹性固体服从虎克定律, 在形变不大时, 应力与应变成正比; 理想的粘性液体服从牛顿定律, 应力正比于应变速率。聚合物材料的力学行为强烈地依赖于温度和外力作用的时间, 在外力作用下, 聚合物材料的形变性质介于弹性材料和粘性材料之间, 应力同时依赖于应变和应变速率。聚合物的这种兼有固体弹性和液体粘性的行为被称为粘弹性。

聚合物之所以具有这些特点, 是由于聚合物由长分子链所组成, 分子运动具有明显的松弛特征。不同种聚合物的力学性能的差异, 直接与各种结构因素有关, 除化学组成外, 这些结构因素还包括分子量及其分布、支化和交联、结晶度和结晶形态、共聚方式、分子取向、增塑剂以及填料等。

基础的粘弹性描述采用弹簧-粘壶模型, 常用的有:

麦克斯韦(Maxwell)串联模型:

$$\frac{d}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d}{dt} + \dots$$

沃格特(Voigt)并联模型:

$$\sigma(t) = \sigma(t)E + \frac{d\sigma(t)}{dt}$$

在此基础上发展了多种普适模型——弹簧和粘壶单元的各种组合, 以描述各种各样聚合物的行为, 诸如三元件模型、麦克斯韦-威切尔特(Maxwell-Weichert)模型、沃格特-凯尔温

收稿日期: 2001-07-16; 修订日期: 2001-08-25

作者简介: 殷勇(1974-)男, 博士研究生, 研究方向为高温材料及设备。

(Voigt-Kelvin) 模型等^[11]。描述实际高聚物的模型应该是弹簧和粘壶单元的各种组合, 这样的模型将具有许多个松弛时间和推迟时间, 从而形成一个不连续的谱, 称之为离散松弛时间谱和离散推迟时间谱^[12]。

1.2 粘塑性

对于金属材料, 普通塑性(与应变率无关)行为仅仅是低温状态下粘塑性的一种近似处理, 在现实生活中, 由于晶粒位错引起的塑性流动即使在低温下也不是真正的与应变率无关的, 因而材料粘塑性现象是很普遍的。

时间相关的塑性理论(粘塑性)最早可追溯到 1871 年的 Barr de Saint-Venant, 但真正在本构方程中考虑进时间因素也就是近几十年的成果^[13]。Zienkiewicz^[14]在 Bingham 材料模型的基础上作一定的修正后提出粘塑性模型。当描述与时间无关的稳定状态时, 其粘塑性模型便演化成问题的塑性解; 而对另一特殊情况, 将门槛应力降到零, 模型便可演化成蠕变解, 因此该材料模型可以广泛地应用于材料非线性行为模拟。有关粘塑性理论详细资料可参阅文献^[15]。

Zienkiewicz 粘塑性模型中采用的屈服条件为: $F(\sigma, k) - \bar{F}(\sigma, k) - Y(k) = 0$, 其中 Y 为屈服应力, k 为应力软化因子。因此在 $F < 0$ 时为纯弹性区, 而 $F > 0$ 时应变速率是 F 的函数。在粘塑性应变的定义中, Zienkiewicz 借鉴了经典塑性理论中的塑性潜能 $Q(\cdot)$ 概念。

$$\frac{d}{dt} \dot{\epsilon}^{vp} = \dot{\epsilon}^{vp} = \left\langle \left(\frac{F}{F_0} \right) \right\rangle \dot{Q}$$

其中 $\dot{\epsilon}^{vp} = \left\langle \left(\frac{F}{F_0} \right) \right\rangle^n \dot{Q}$ 为流动系数, 与时间、应变等状态变量有关。不失一般性, 粘塑性应变可采用幂指关系, 则可得 $\dot{\epsilon}^{vp} = \left\langle \left(\frac{F}{F_0} \right) \right\rangle^n \dot{Q}$, 根据不同的材料, 改变屈服条件和塑性指数基本能够描述其相关行为。

2 有限元模型及材料参数

针对胶焊单搭接头进行蠕变应力再分布分析, 试样尺寸如图一所示, 试样两端受均布拉应力, 大小为 125 MPa。考虑结构关于 X 轴对称, 沿 X 轴取一半进行有限元建模, 施加以对称边界条件, 有限元模型见图二, 搭接区域和焊点附近的单元分布如图三所示。网格划分采用 20 节点 Sol-

id95 三维实体单元。模型网格共含 2629 个单元, 3946 个节点。

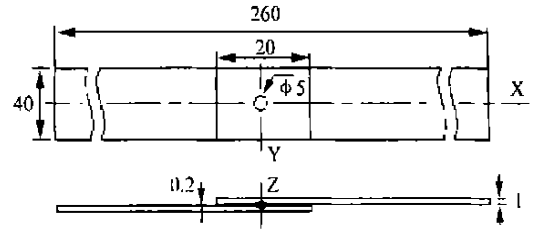


图 1 有限元分析试件尺寸

Fig. 1 Shape and dimension of the analyzed specimen

有限元建模过程中假设接头中胶接界面完好, 无缺陷存在; 焊核、热影响区具有相同的力学性能。蠕变分析中考虑了试样的几何大变形对应力研究的影响。母材、焊点和胶粘剂的材料性能参数见表一。

表 1 接头相关的材料性能

Table 1 Mechanical properties of the materials

Matrix	E / MPa	ν	s / MPa	E_t / MPa	G / GPa
	2.0E+5	0.3	160	2000	76
Weld spot	1.9E+5	0.29	450	1800	83.34
Adhesive	6600	0.38	90	500	1.06

根据文献 7, 胶粘剂 21 号环氧树脂的蠕变性能的本构方程为: $\dot{\epsilon} = \frac{1}{\ln 10} t^{-1}$, 其中:

$$a = \begin{cases} 7.50 \times 10^{-5} & 0 < t < 143 \\ 4.30 \times 10^{-4} & 143 < t < 4726 \\ 1.52 \times 10^{-3} & 4726 < t \end{cases}$$

3 计算结果及讨论

3.1 接头应力分布的弹塑性有限元解

采用弹塑性材料模型, 考虑塑性强化作用, 对单搭接头试样中的应力分布进行分析, 确定试样的高应力区。分析中对考虑几何大变形的前后情况进行对比, 胶粘剂层的应力如图四所示, 可见对胶接接头的有限元分析中, 考虑几何非线性对模拟的准确性有很大的影响。

3.2 蠕变导致应力再分布的研究

由于胶粘剂等高分子聚合物存在显著的粘弹塑性, 直接表现为材料的蠕变, 因此有必要了解蠕变导致接头应力随时间的变化情况, 在对胶焊单

搭接接头蠕变的有限元分析中考虑了材料的弹塑性、接头的几何非线性影响。蠕变应力模拟结果见图 5。

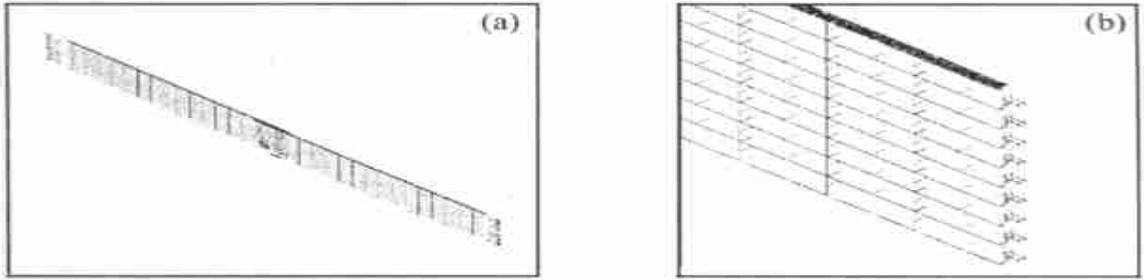


图 2 胶焊单搭接接头有限元模型 (a) 单搭接接头对称建模及边界条件; (b) 模型端部边界条件

Fig. 2 FEA model for single lap Weldbonded joint

(a) Model and boundary conditions for single lap joint ;

(b) Details of boundary conditions at the end

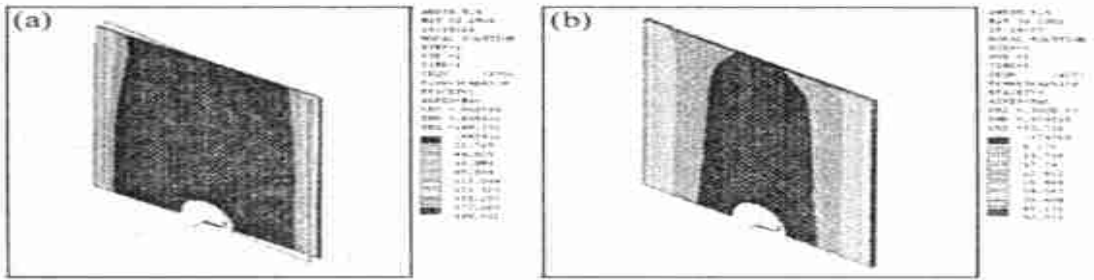


图 3 搭接区域和焊点附近有限元网格 (a) 搭接区域的网格划分; (b) 焊点附近网格划分

Fig. 3 Elements in the lap zone and near the weld spot

(a) Elements in the lap zone; (b) Elements near the weld spot

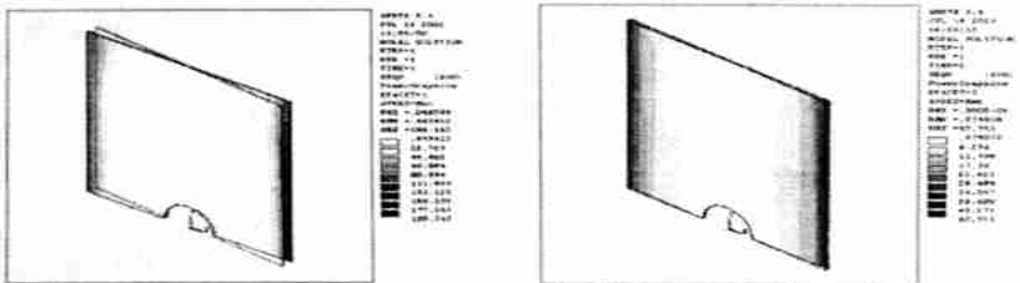


图 4 胶接层 Von-Mises 应力分布的弹塑性有限元分析结果 (a) 不考虑大形变影响; (b) 考虑大形变作用

Fig. 4 Von-Mises stresses of elasto-plastic FEM analysis of adhesive

(a) without large deformation consideration;

(b) with large deformation consideration

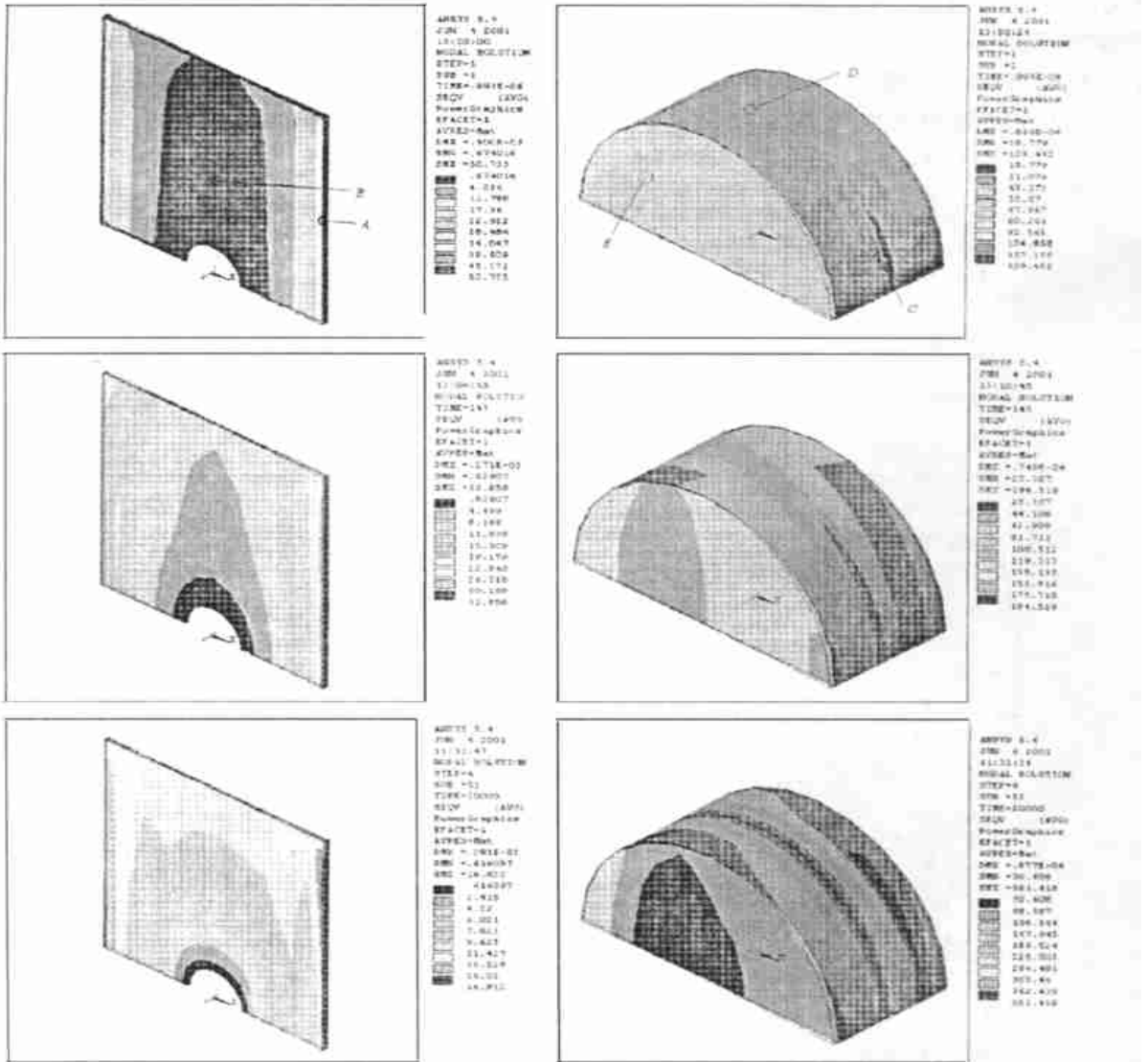


图 5 单搭接头的蠕变应力再分布 (a) $t=0\text{h}$ 时胶粘剂层的 Von-Mises 应力分布; (b) $t=0\text{h}$ 时焊点的 Von-Mises 应力情况; (c) $t=143\text{h}$ 时胶粘剂层的 Von-Mises 应力分布; (d) $t=143\text{h}$ 时焊点的 Von-Mises 应力情况; (e) $t=20000\text{h}$ 时胶粘剂层的 Von-Mises 应力分布; (f) $t=20000\text{h}$ 时焊点的 Von-Mises 应力情况

Fig. 5 Stress redistribution of sing-lap joint

- (a) Von-Mises stress distribution of adhesive when $t=0\text{h}$;
- (b) Von-Mises stress distribution of weld spot when $t=0\text{h}$;
- (c) Von-Mises stress distribution of adhesive when $t=143\text{h}$;
- (d) Von-Mises stress distribution of weld spot when $t=143\text{h}$;
- (e) Von-Mises stress distribution of adhesive when $t=20000\text{h}$;
- (f) Von-Mises stress distribution of weld spot when $t=20000\text{h}$

3.3 讨论

由上可见, 随着胶层的蠕变接头中的应力存在显著的重新分布现象, 胶粘剂中的应力逐渐降低并将载荷转嫁给焊点承受, 焊点在与胶粘剂界面附近的应力不断增加, 经过两万小时, 其最高应力几乎增加一倍。因此在胶焊接头的设计中应充

分重视焊点应力的升高, 在胶焊相关结构的大修等例行检查中, 焊点附近区域应是无损探测的重点。

另外, 从蠕变应力的模拟分析可以看出, 胶粘剂的蠕变同时还导致胶层应力分布的均匀化, 高应力区域逐渐通过蠕变将载荷转移给低应力区承

受,这有利于接头更好地承受载荷。

如图5(a)、(b)中所示A-E各点的应力随时间的变化情况示于图6。可以看出,胶粘剂层的局部高应力区通过蠕变过程得到明显的释放,其他相对低应力区的应力略有增大,平均承担高应力区承受的载荷。焊点中的各点应力均有所增加,尤其在焊点与胶粘剂的接触面处,应力增大显著。另

外,焊点表面的D点应力高于C点,即垂直于载荷方向的两个顶点随着蠕变的发生比载荷方向的两个顶点承受更多的载荷,相对更易在此处发生起裂。

胶层的蠕变告诉我们,在胶粘剂相关的设计中,应在可能的情况下尽量加大胶接长度,虽然胶接长度超过一定范围便对接头强度没有贡献,但

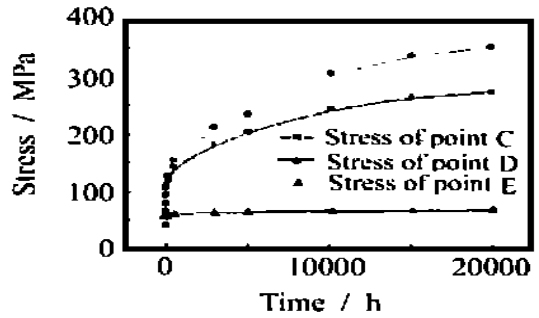
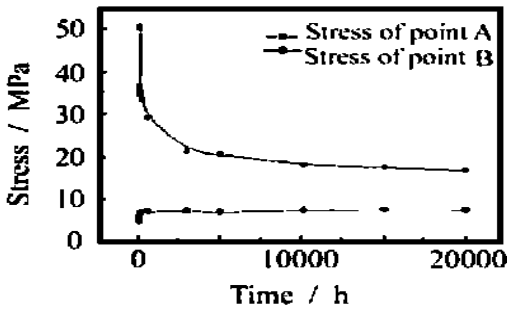


图6 胶层和焊点中一些典型点的 Von-Mises 应力变化

(a) 胶层中的应力点; (b) 焊点上的应力点

Fig. 6 Von-Mises stress redistribution at some points in adhesive and weld spot

(a) Stress points in adhesive; (b) Stress points in weld spot

充裕的胶接长度可以大大提高接头的蠕变强度,对胶粘剂相关结构甚为重要。

在胶接相关结构中,经常会出现蠕变导致大变形的发生从而失效的现象,因此在胶接相关结构的设计过程中,蠕变模量是设计中选择胶粘剂不可或缺的考虑因素之一,在工程实际中需加以重视。

4 结论

利用三维粘弹塑性有限元法,对胶焊连接接头的时间相关应力再分布进行了研究,可以得出如下结论:

(1) 随着时间的推移,胶焊接头的应力分布经历了由胶粘剂转嫁给焊点的过程,可以预见,接头中裂纹的初始起裂处更易发生在焊点的高应力边缘附近,对接头安全性的检查应该着重于此处。

(2) 胶粘剂的蠕变导致其应力分布均匀化,有利于承受载荷。

(3) 在胶接长度超过临界长度后,增大搭接区域面积和长度虽不能提高接头的强度,却有助于减缓焊点应力的增加,对接头长时间的力学性能有显著影响。

在今后的研究中,胶粘剂的材料参数(弹性模量、剪切模量等)、接头粘接长度、胶层厚度等几何参数对接头蠕变性能的作用需要进一步了解,同时对胶接界面层以及接头中缺陷等因素的模型化是深入和更接近实际的有限元模拟的方向。

参考文献

- [1] M RING-GROTH, J POWELL, C MAGNUSSON, Weldbonding of stainless steel: An introduction[J]. Journal of Advanced Materials, 1998, 30(1): 3639.
- [2] 李春植,戴瑞玲,王玮. 粘接点焊单搭接头的静力分析[J]. 机械强度, 1997, 19(2): 21.
- [3] 纪东莲,王文先. 胶焊技术与胶接接头的设计分析[J]. 汽车技术, 1999, 3: 19.
- [4] GHOSH P K, SAMBASIVARAO N, Weldbonding of thin sheet aluminum [J]. International Journal for the Joining of Materials, 1998, 10(1-2): 45—53.
- [5] MELANDER A, LARSSON M, STENSIO H, et al. Fatigue performance of weldbonded high strength sheet steels tested in Arctic, room temperature and tropical environments [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2000, 20(5): 415—425.
- [6] 常保华,史耀武,董仕节. 胶粘剂厚度和弹性模量对胶

- 焊接头应力分布的影响[J]. 材料工程, 1998, 5: 19.
- [7] 常保华, 史耀武, 董仕节. 板厚对不同胶粘剂胶焊单搭接接头中应力分布影响的数值分析[J]. 中国机械工程, 1999, 10(3): 341.
- [8] 常保华, 史耀武, 董仕节. 胶焊搭接接头的应力分布和疲劳行为研究[J]. 机械工程学报, 2000, 36(2): 106.
- [9] 殷勇, 涂善东. 胶接接头力学研究回顾[J]. 化工机械, 2001, 4.
- [10] SU N, MACKIE R I. Two-dimensional Creep Analysis of Structural Adhesive Joints, *Int J. Adhesion and Adhesives*, 1992, 13(1): 33.
- [11] 约翰 .J. 阿克洛尼斯, 威廉 .J. 马克尼特, 沈明琦. 聚合物粘弹性引论[M]. 北京: 宇航出版社, 1984.
- [12] 何平笙. 高聚物的力学性能[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1997.
- [13] Cristescu, I SULICIU. VISCOPLASTICITY[M]. Martinus Nijhoff Publishers, 1982.
- [14] ZIENKIEWICZ, O C, CORMEAU, et al. Viscoplasticity-plasticity and creep in elastic solids—a unified numerical solution approach[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1974, 8: 821.
- [15] 贾乃文. 粘塑性力学及工程应用[M]. 北京: 地震出版社, 2000.

Long-term stress analysis of single-lap weldbonded joint

YIN Yong¹, TU Shan-Tung¹, ZHU Jin²

(1. Mechanical Engineering Department, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. Nanjing Institute of Glass-fibre Technology, Nanjing 210012, China)

Abstract: Weldbonding is a new joining technique that combines the spot-welding with the adhesive-bonding method. It was adopted more and more in recent years because of its many advantages. However, the researches on this new technology are few especially on the long-term stress and strength of the weldbonded structures. A three-dimensional viscoplastic finite element model of single-lap weldbonded joint was developed in this paper to investigate its stress redistribution. Some advice on joint design and material choice were discussed.

Key words: Weldbonding; Joint; Viscoelastic; Viscoplastic; Creep; FEM