

基于内聚力模型的锆-钛-钢复合板剪切试验模拟

周彬彬¹, 邱伟光¹, 张伯君^{1,2}, 业成², 贺小华¹, 周昌玉¹

(1. 南京工业大学, 江苏 南京 211816)

(2. 南京市锅炉压力容器检验研究院, 江苏 南京 210028)

摘要: 基于双线性张力位移法则, 运用 ABAQUS 内置内聚力单元对锆-钛-钢复合板的剪切试验进行了有限元模拟, 分析了界面断裂过程的应力分布特征, 研究了内聚力强度、断裂能对于界面层损伤的影响, 并验证了剪切强度预测公式的正确性。研究表明: 内聚力单元可以模拟复合板界面层的断裂过程, 且与剪切试验结果良好吻合; 剪断位移与内聚力强度呈正相关; 随着断裂能的增加, 剪断位移、特征位移和最大剪切力都增加; 剪切强度预测公式可对不同热处理工艺下剪切强度进行预测。

关键词: 内聚力单元; 有限元模拟; 锆-钛-钢复合板; 剪切试验

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)04-1137-06

金属复合板可以结合几种金属的优良性能, 在石油化工、冶金、航天航空等领域得到越来越广泛的应用^[1,2]。由于金属复合板通过轧制、爆炸焊接等方式制成^[3], 其制造过程存在不稳定性, 且结合界面极易形成金属间化合物层, 因此结合界面是复合板的薄弱环节^[4,5]。在复合板的服役过程中, 因界面结合强度低而引起的层与层之间的开裂是复合板损伤的基本形式。由于复合板的界面层厚度较薄, 且其性质在厚度方向变化^[6], 为此需要引入内聚力单元从微观尺度上对界面层损伤起始、演化和破坏过程进行分析。

目前, 内聚力单元已被广泛应用于复合材料界面层的研究。Needleman^[7]从理论上完整地描述了内聚力区的演化过程; 苏罗丹^[8]利用内聚力模型, 研究了铝/铝镁合金复合板的界面强度以及界面初始损伤对于材料整体承载性能的影响。张茹远等^[6]利用线性内聚力模型, 对形状记忆合金颗粒与金属玻璃基体界面分离过程进行了模拟。

本研究基于内聚力单元, 对锆-钛-钢复合板的剪切试验过程进行了有限元模拟, 通过与试验结果比较, 验证了模型的可靠性。在此基础上, 一并讨论了内聚力强度和断裂能对复合板界面层损伤效果的影响。通过对剪切试验结果进行拟合, 为不同热处理工艺下复合板界面层剪切强度的选取提供了参考。

1 实验

复合板的基层 Q345R 厚度为 12 mm, 过渡层 TA2 以及覆层 Zr702 厚度皆为 2 mm。3 种材料的化学成分 (质量分数, %) 分别为: (1) Zr702: Hf 4.5, Fe+Cr 0.2, H 0.005, N 0.025, C 0.05, O 0.16, Zr 余量; (2) TA2: Fe 0.3, C 0.1, N 0.05, H 0.015, O 0.25, 其他元素 0.5, Ti 余量; (3) Q345R: C 0.15, Si 0.39, Mn 1.43, P 0.018, S 0.005, Fe 余量。

热处理考虑保温温度 T 、保温时间 t 和热处理升降温速率 v 3 个影响因素。热处理温度 T 选取 500、540、580、620 °C, 保温时间 t 为 1、2、4、6 h, 升降温速率 v 在 300 °C 以上分别为 30、60、90、120 °C/h, 如表 1 所示。研究采用正交试验法, 利用 $L_{16}(4^3)$ 正交表制定 16 组试验。

对热处理后的 16 组不同板材及一块未经热处理的板材加工制样, 试样规格执行 GB/T6396-2008《复

表 1 热处理工艺因素水平表

Table 1 Factors and levels of heat treatment				
Level	1	2	3	4
Holding temperature, $T/^\circ\text{C}$	500	540	580	620
Holding time, t/h	1	2	4	6
Rate of temperature, $v/^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$	30	60	90	120

收稿日期: 2017-04-18

基金项目: 国家自然科学基金 (51475223, 51075199); 国家质量监督检验检疫总局科技计划项目 (2015QK265); 江苏省博士后基金 (1401160C); 南京市质监局科技项目 (KJ2014011); 南京市质监局科技项目 (KJ2014012)

作者简介: 周彬彬, 男, 1992 年生, 硕士, 南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816, 电话: 025-58139951, E-mail: zhou_b@163.com

合钢板力学及工艺性能试验方法》标准^[9]，使用 MTS-880 液压式万能试验机测定钛-钢结合面的剪切强度和粘结强度，并绘制共计 17 组剪切试验的试验力-位移曲线。

2 计算模型

2.1 有限元模型

锆-钛-钢复合板由爆炸焊接制成，其结合界面呈

波状结合，考虑到波状结构的周期性及尺寸微小的特点，为简化计算模型，以矩形模型代替。界面层属于复合板组织性能的过渡区，厚度取决于爆炸焊接所用材料及其工艺参数，参考文献[3,10]取值为 0.1 mm。模型尺寸与标准 GB/T6396-2008《复合板力学及工艺性能试验方法》中对剪切试样的尺寸的规定一致。因此，有限元模型的尺寸与本研究进行的剪切试验中的剪切试样尺寸一致，具体尺寸如表 2 所示。

表 2 剪切试样有限元模型尺寸

Table 2 Dimension of finite element model of shear specimen (mm)

Specimen length	Length of interface	Length of crack	TA2 thickness	Q345R thickness	Zr702 thickness	Thickness of interface
65	3	3	2	12	2	0.1

考虑到剪切试样在宽度方向上性能均匀，采用二维模型对其进行模拟，建立模型如图 1 所示。低合金钢层、钛层和锆层都采用四节点平面应变单元 CPE4R，减缩积分，沙漏控制。复合板界面层采用 COH2D4 粘结单元，粘结单元是内聚力单元的有限元表现形式，采用扫掠形式划分网格。模型共划分网格 4730 个，图 2 为剪切刀头附近局部网格细化。

对模型右端施加完全固定约束，上端左侧以及整个下端模型采用限制 Y 方向位移约束，以符合实际剪切试验中对试样两端夹持的操作。在界面层以上的钛层及锆层 X 方向上施加向右侧的位移载荷 $x=0.2\text{ mm}$ 。

2.2 材料模型

模拟需要对 4 层材料分别定义。基体材料 Q345R、过渡层 TA2 和覆层 Zr702 在剪切试验过程中，发生了

弹塑性变形，采用弹塑性材料参数进行定义。设置界面为 cohesive element 模型，牵引力-分离准则选择最大名义应力准则。目前，锆-钛-钢复合板的界面层的材料参数尚无取值依据^[11]，基于本研究对锆-钛-钢复合板进行的力学性能试验，根据未经热处理组的试验结果取损伤初始法向、切向内聚力分别为 323.50、183.21 MPa。由锆-钛-钢复合板剪切试验测得的剪切性能应力位移曲线，结合双线性张力位移关系，进而确定出界面层的临界能量释放率。利用反向有限元求解的方法，确定界面层的剪切模量，并假设界面层各向同性，确定其弹性模量。复合板界面层材料参数汇总于表 3。

3 结果与讨论

本研究共计进行 17 组剪切性能试验，并根据每组的试验结果，分别对有限元模型界面层的材料参数进行定义。以下若未作特别说明，皆以未经热处理试样的试验结果定义的有限元模型为例进行研究。

3.1 复合板界面损伤过程

图 3 显示了剪切试样的有限元模型在不同位移变量下瞬时等效应力值和损伤变量分布情况。损伤变量在内聚力单元的损伤过程中，表示材料中整体损伤情况，随着内聚力单元的损伤，其值由 0 增加到 1，当达到 1 时说明此时内聚力单元已经失效，不再具有承载能力。其应力云图及损伤变量分布图完整地反映了复合板剪切试样的界面损伤过程。我们可将损伤过程



图 1 剪切试验模型

Fig.1 Finite element model of shear test

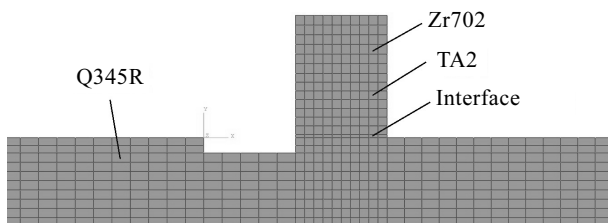


图 2 剪切刀头局部网格细化

Fig.2 Local mesh refinement of shear cutter

表 3 内聚力模型参数

Table 3 Parameters of cohesive zone model

$(E/K_{nn})/$ MPa	$(G_1/K_{nn})/$ MPa	$(G_2/K_{tt})/$ MPa	$\sigma_n/$ MPa	$\sigma_{n1}/$ MPa	$\sigma_{n2}/$ MPa	$G_c/$ $N \cdot mm^{-1}$
4420	1700	1700	325.50	183.21	183.21	3.69

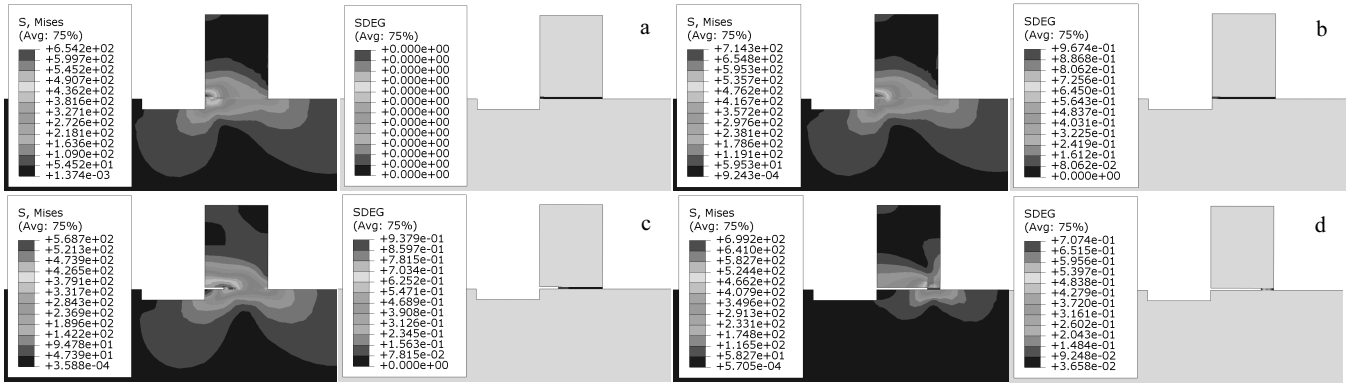


图 3 剪切试验试样损伤过程

Fig.3 Damage process of shear test specimen: (a) $U_1=0.0160$ mm, (b) $U_1=0.0186$ mm, (c) $U_1=0.0262$ mm, and (d) $U_1=0.0360$ mm

分为如下 4 个阶段：（1）位移变量很小，单体材料承载，界面不发生损伤；（2）位移变量增加，界面开始损伤，损伤集中但不扩展；（3）位移变量继续增加，界面层开始承载，界面损伤单元开始扩展；（4）位移变量不断增加，损伤贯穿界面层，界面层发生整体断裂。

应力云图显示了整个剪切试验过程中试样内应力分布及变化规律。当位移载荷开始增加时，钛层和低合金钢层起主要承载作用，由于界面层两侧材料性能存在较大差异，属于性能上的过渡区^[12]，应力强度因子大，导致其应力值过大。位移继续增大后，复合板中的应力分布基本以复合界面失效点为中心向外递减，且最大应力点始终出现在依次损伤的界面层单元钛层一侧。通过对图 4 的分析可知，整体剪切过程中试样的最大等效应力先增后减，与试验中剪切力的变化规律一致，实验曲线使用文献[13]中假设材料线性软化的方法进行了优化，可知最大剪切力误差为 10.4%，剪断位移误差为 0.5%，模拟结果基本符合试验数据。图 5 显示了界面层某节点损伤变量的变化情

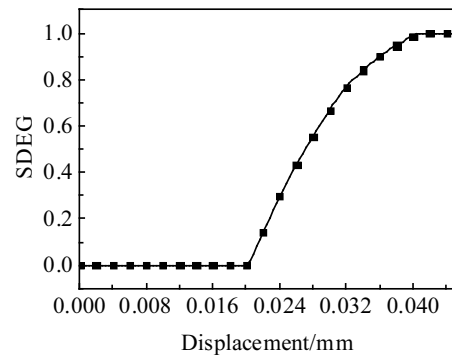


图 5 界面层某节点损伤变量与位移关系

Fig.5 Relationship between the damage variable and displacement of a node in the interface layer

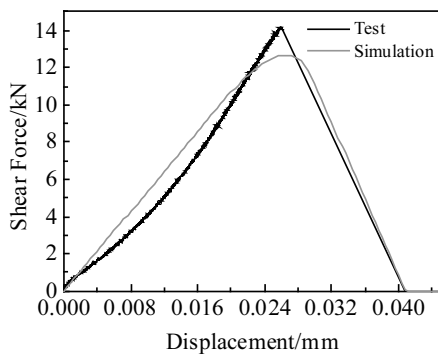


图 4 模拟结果与试验结果对比

Fig.4 Comparison between finite element simulation result and test result

况，在剪切位移达到 0.02 mm 之前，该节点损伤变量为零，位移继续增加后，其损伤变量迅速增加，最终达到 1，进而完全损伤，自动删除，从而模拟出界面的断裂破坏过程。

3.2 内聚力强度对界面损伤的影响

界面层是金属爆炸复合板的性能薄弱环节，其结合质量直接影响复合板压力容器的使用寿命。内聚力强度是内聚力模型主要参数之一^[14]，它可以表征界面层的结合质量，这使得研究内聚力对于界面损伤的影响可以对工程实际问题具有较大的参考价值。本研究同样以未经热处理组的模型为例，采用单因素控制变量法，将内聚力强度设置 9 组不同数据组合，保持内聚力模型其他材料参数不变，得到在不同内聚力强度下剪切试样剪断过程。

图 6 表示剪切位移为 0.022 mm 时，不同内聚力强度下的界面层的损伤程度。从中我们可以观察到：当内聚力法向、切向强度低于 250、150 MPa 时，试样

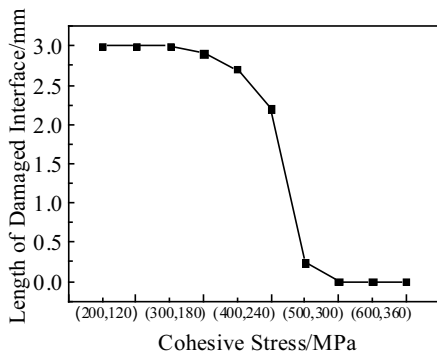


图 6 不同内聚力强度下的界面层损伤长度

Fig.6 Length of damaged interface layer under different cohesive strength

已经断裂；内聚力法向从 250 MPa 增加到 300 MPa、切向强度从 150 MPa 增加到 180 MPa，试样的界面损伤长度只有很小的减少，说明内聚力法向和切向强度在这区间内对界面损伤长度影响很小；当内聚力法向、切向强度继续增加时，界面损伤长度迅速增加，影响效果显著；当内聚力法向、切向强度分别大于 500、300 MPa 时，已损伤的界面长度为零，即界面不发生损伤，没有裂纹产生。

图 7 显示出不同内聚力强度下试样最终的剪断位移。从图中我们可以得出以下规律：当内聚力法向、切向强度分别低于 400、240 MPa 时，内聚力强度对试样剪断位移的影响较小；当内聚力法向强度由 400 MPa 增加到 550 MPa、切向强度 240 MPa 增加到 330 MPa 时，剪断位移迅速增加，呈现类似指数形式的增长；当内聚力法向、切向强度分别达到 550、330 MPa 后，剪断位移与剪切强度正相关。

3.3 断裂能对模拟结果的影响

断裂能是内聚力模型参数中另一个重要参数。通

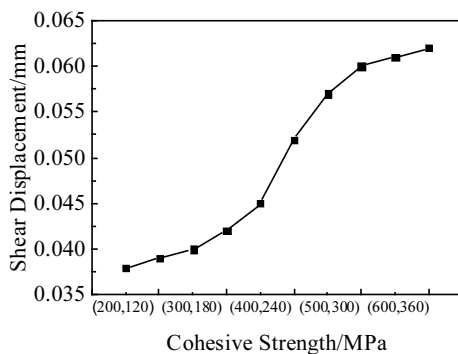


图 7 内聚力强度对剪断位移的影响

Fig.7 Effect of cohesion strength on shear displacement

过对内聚力模型采用的双线性张力位移曲线进行计算，得出断裂能的最小值，在此基础上假设断裂能大小，分别定为 4、4.5、5 N/mm，提取最终断裂时试样终端反作用力和位移，绘制成曲线进行对比。从图 8 中我们发现不同断裂能下的剪切力-位移曲线的变化趋势相似，具体表现如下：曲线上升阶段基本为线性关系；剪断位移、特征位移和最大剪切力随断裂能的增加而增加。这与文献[15]利用理论计算得到的结论完全一致。可见，不论是理论研究还是有限元方法，内聚力单元都能较好适用于裂纹问题。

3.4 热处理工艺下界面层剪切强度的预测

热处理工艺对复合板力学性能的影响已被广泛研究^[16-18]，但针对铝-钛-钢复合板的研究却还主要集中在设计制造^[19]。剪切强度是复合板界面层力学性能试验的首要指标，可以表征复合板界面层的结合质量。以热处理保温温度 T 、保温时间 t 和升降温速率 v 为自变量，以由内聚力模型模拟得到的界面层剪切强度为因变量进行拟合。根据 16 组热处理工艺下的模拟结果，得到界面层剪切强度关于热处理工艺条件的拟合公式如下：

$$F = 660.1893 - 1.61464T - 1.79319t + 1.25048v + 0.01669T \cdot t - 0.00102T \cdot v - 0.10171t \cdot v + 0.00116T^2 - 0.79582t^2 - 0.00307v^2$$

剪切试验验证试验的热处理工艺条件为 500 °C +1 h+120 °C/h，实测剪切强度为 203.86 MPa，由拟合公式得到该工艺条件下预测剪切强度 181.07 MPa，误差为 12.6%。以验证试验实测的剪切强度代入内聚力模型进行运算，结果如图 9 所示。分析得知，验证试验中最大试验力与采用内聚力模型得到的最大试验力相差 8.3%，而剪断位移误差仅为 4.9%，误差可接受，再次验证了本研究有限元计算的可靠性。

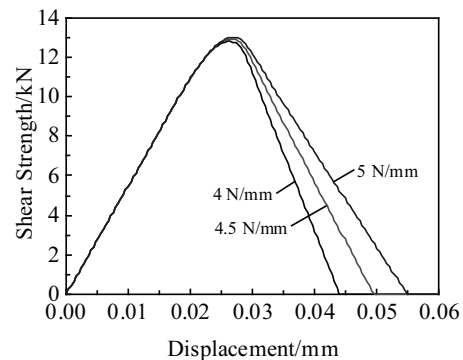


图 8 断裂能对剪切力-位移曲线的影响

Fig.8 Effect of fracture energy on shear force-displacement curve

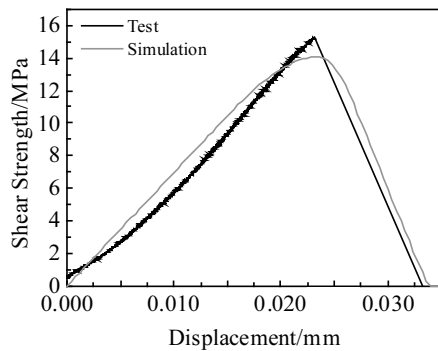


图9 模拟结果与补充试验试验结果对比

Fig.9 Comparison between finite element simulation result and additional test result

4 结 论

1) 内聚力模型可以对铅-钛-钢爆炸复合板的剪切试验过程进行模拟。模拟过程中应力最大点首先出现在界面层钛材一侧,随着位移的增加,界面层开始承担主要的载荷,直至界面层开始损伤。界面单元逐渐损伤并被破坏,界面开裂过程中应力以界面层损伤单元为中心向四周递减,直至界面完全断裂。

2) 内聚力强度可以表征界面层的结合质量。通过研究发现二者呈正相关,且当内聚力法向强度由400 MPa增加到550 MPa、切向强度240 MPa增加到330 MPa时,剪断位移迅速增加,呈现类似指数形式的增长。

3) 断裂是内聚力模型的重要参数之一,对复合板剪切试验的影响显著。随着断裂能的增加,模拟结果的剪断位移、特征位移和最大剪切力都相应增加,且模拟结果的试验力-位移曲线上阶段基本重合。

4) 通过对内聚力模型的模拟结果进行拟合,可以得到任意热处理工艺下的剪切强度的预测公式。增设的补充试验结果与预测结果误差为12.6%,将补充试验的试验结果输入到内聚力模型中,得到最大试验力误差8.3%,剪断位移误差4.9%。内聚力模型可靠性进一步得到验证。

参考文献 References

[1] Bai Tianxin(白天新), Wang Jianhong(王剑虹). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2008, 25(3): 38
 [2] Dong Guiping(董桂萍). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009
 [3] Zhai Weiguo(翟伟国). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Nan-

jing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013

- [4] Wang Guanglei(王光磊), Luo Zongan(骆宗安), Xie Guangming(谢广明) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(2): 387
 [5] Jiang Haitao(江海涛), Yan Xiaoqian(阎晓倩), Liu Jixiong(刘继雄) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(4): 972
 [6] Zhang Ruyuan(张茹远), Kan Qianhua(阚前华), Zhang Juan(张娟) *et al. Applied Mathematics and Mechanics*(应用数学和力学)[J], 2015, 35(S1): 171
 [7] Needleman A. *Journal of Applied Mechanics*[J], 1987, 54(3): 525
 [8] Su Luodan(苏罗丹), Yang Qingsheng(杨庆生). *Proceedings of the 18th Annual Symposium of Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics*(北京力学学会第18届学术年会论文集)[C]. Beijing: Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics Press, 2012: 93
 [9] GB/T 6396-2008. *Clad Steel Plates-Mechanical and Technological Test*(复合钢板力学及工艺性能试验方法)[S]. 2008
 [10] Li Xiaojie(李晓杰), Yan Honghao(闫鸿浩), Xi Jinyi(奚进一) *et al. Science Technology and Engineering*(科学技术与工程)[J], 2002, 2(5): 29
 [11] Zhang Baoqi(张保奇). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005
 [12] Xia Hongbo(夏鸿博). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014
 [13] Khoramishad H, Hamzenejad M, Ashofteh R S. *Engineering Fracture Mechanics*[J], 2016, 153: 175
 [14] Wang Yonggang(王勇刚), Hu Jiandong(胡剑东), Wang Lili(王礼立). *Chinese Journal of Solid Mechanics*(固体力学学报)[J], 2012, 33(5): 465
 [15] De Morais A B. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*[J], 2014, 64: 124
 [16] Kim I K, Hong S I. *Materials & Design*[J], 2013, 47: 590
 [17] Li B, Shen Y F, Luo L *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016, 658: 904
 [18] Liu Fencheng(刘奋成), He Lihua(贺立华), Ke Liming(柯黎明) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(4): 989
 [19] Wang Yingzhi(王应植), Yuan Biao(袁彪), Zhang Linxian(张林贤) *et al. China Petroleum Machinery*(石油机械)[J], 2008, 36(6): 28

Simulation of Shear Force Test for Zirconium-Titanium-Steel Clad Plate by Cohesive Element Method

Zhou Binbin¹, Qiu Weiguang¹, Zhang Bojun^{1,2}, Ye Cheng², He Xiaohua¹, Zhou Changyu¹

(1. Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

(2. Nanjing Boiler and Pressure Vessel Inspection Institute, Nanjing 210028, China)

Abstract: Based on bilinear force displacement law, finite element simulation of shear force test on zirconium-titanium-steel clad plate was carried out using cohesive zone unit of ABAQUS. Then, the effect of cohesive strength and fracture energy on the damage of interface layer was studied. The correctness of the prediction formula of shear strength was also verified. The results show that cohesive element can simulate the fracture process of clad plate interface layer and agree very well with the results of shear force tests. Shearing displacement and cohesive strength is positively correlated. With the increase of fracture energy, shearing displacement, characteristic displacement and maximum shear force increase. The fitting formula of shear strength can predict shear strength under different heat treatments.

Key words: cohesive zone model; finite element simulation; zirconium-titanium-steel clad plate; shear test

Corresponding author: Zhou Changyu, Ph. D., Professor, School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, P. R. China, Tel: 0086-25-58139951, E-mail: changyu_zhou@163.com