

薄弱环节对复合材料波纹梁吸能能力的影响

Effect of Trigger Geometry on Energy Absorption of Composite Wavebeams

龚俊杰^{1,2}, 王鑫伟¹

(1 南京航空航天大学 航空宇航学院,

南京 210016; 2 扬州大学 机械工程学院, 江苏 扬州 225002)

GONG Jun-jie, WANG Xin-wei (1 College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2 College of Mechanics Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225002, Jiangsu, China)

摘要: 薄弱环节设置是复合材料吸能结构的关键技术, 良好的设计可以使复合材料结构产生稳定的渐进压溃, 从而吸收较多的能量。基于波纹梁准静态轴向压溃实验结果, 运用 MSC/DYTRAN 有限元软件建立了三组不同尺寸的碳纤维-环氧树脂波纹梁的有限元模型, 在数值模拟结果与实验结果基本吻合的基础上, 分析了不同薄弱环节设置对复合材料波纹梁峰值载荷、吸能能力的影响, 并进一步比较了不同薄弱环节设置的波纹梁在以 6.5 m/s 的速度碰撞刚性地面时的能量吸能能力。

关键词: 复合材料; 波纹梁; 能量吸收; 薄弱环节

中图分类号: T B332; O347. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2006)05-0028-04

Abstract: The trigger geometry is a key technology to the ability of energy absorption of composite structures. Reasonable design of triggering mechanism can make composite structures destroyed steadily and gradually thus lead to more energy absorbed. The FEM models of three sets of wavebeams with different sizes were set up with the explicit finite element code MSC/DYTRAN. Based on the good correlation of experimental results and numerical data of wavebeams, the effect of different trigger geometries on the peak load and energy absorption property was analyzed. The energy absorption capability of the wavebeams with different trigger geometry was further compared when the waved beams impacted the rigid ground at a velocity of 6.5 m/s.

Key words: composite material; wavebeam; energy absorption; triggering mechanism

由于复合材料是可设计材料, 且具有比强度高、比刚度大等优点, 在国防工业和民用工业中, 特别是航空航天领域得到了越来越多的应用。但是纤维增强复合材料一般是脆性材料, 材料自身的能量吸收能力比较弱, 所以必须通过合理的结构设计来使复合材料结构具有良好的耐撞性能。

初步实验研究表明, 复合材料结构的缓冲吸能能力不但依赖于复合材料的性能(如铺层顺序、形式、纤维和基体材料的性能、体积比等), 而且很大程度上依赖于控制结构失效模式所设置的薄弱环节。如果没有设置有效的薄弱环节, 将会导致复合材料结构在碰撞时峰值载荷过高和破坏模式无法控制, 使结构产生非稳定破坏, 从而导致复合材料结构基本上不吸收能量。目前, 国内外对于复合材料结构薄弱环节的设置往往通过在结构局部采取圆弧过渡、开槽或倒角的方法实

现^[1], 陈永刚等研究了引发角对复合材料圆管件轴向压溃性能的影响^[2]。

“波纹形”复合材料元件是直升机结构中重要的抗坠毁部件, 研究波纹梁的峰值载荷和吸能能力对直升机的抗坠毁设计具有直接的参考价值。本课题组对波纹梁试件开展了准静态轴向压缩实验, 获得了相应的数据^[3], 并成功地对波纹梁等复合材料元件的耐撞性进行了数值研究^[4,5]。倪先平等也对典型复合材料元件破坏的初始阶段进行了模拟^[6]。但由于复合材料结构的耐撞实验具有周期长、难度大和实验费用高的缺点, 所以运用有限元软件来模拟复合材料结构破坏的全过程, 峰值载荷和吸能能力具有实际应用价值。

1 试件

本工作的研究对象为三种不同尺寸的碳纤维-环氧树脂波纹梁试件, 分别为短单波波纹梁、长单波波

梁和三波波纹梁。单波波纹梁几何形状如图 1 所示^[3,4]。在试件的下端面带有凸缘平面,并有半径为 r 的小圆弧过渡,客观上形成了薄弱环节,可以降低峰值载荷,并控制破坏过程的稳定,从而保证试件的缓冲吸能能力。

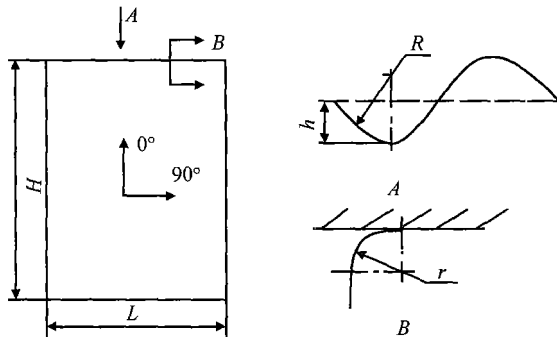


图 1 单波波纹梁试件几何示意图

Fig. 1 Geometry of single wave beam

三种试件的尺寸分别为:长、短单波波纹梁的高度分别为 $H = 180, 280\text{mm}$, 宽度均为 $L = 120\text{mm}$;三波波纹梁的高度为 $H = 280\text{mm}$, 宽度 $L = 3 \times 120\text{mm}$ 。圆弧半径 $R = 37.5\text{mm}$, 薄弱环节处圆弧过渡半径 $r = 2.5\text{mm}$ 。试件材料的增强纤维采用单向碳纤维/双向碳纤维,在外层铺设 4 层玻璃布以提高试件的稳定性,铺设角度为 $45^\circ_3/0^\circ_3/45^\circ_3$ 。

2 复合材料波纹梁的数值模拟

数值模拟运用 MSC/DYTRAN 有限元软件,波纹梁下端面(原凸缘平面处)的小圆弧薄弱环节的处理采用等效刚度的方法,复合材料的模拟采用强度与刚度参数等效的办法^[4,5]。根据以上参数建立的单波波纹梁模型如图 2 所示。模型共有 933 个壳单元,其中上下刚性板壳单元为 40 个,采用 MATRIG 本构模型,波纹梁单元为 893 个,采用 DMATEP 本构关系。模型中将波纹梁的上、下板模拟为两个刚性板,上刚性板以 1m/s 的速度向下运动,下刚性板的所有自由度完全被约束。波纹梁单元之间采用自接触算法,上、下刚性板与波纹梁之间采用主从接触,接触面上施加一定的摩擦系数防止波纹梁与刚性板之间的相对滑动。输出结果有上、下刚性板的接触力和波纹梁的变形能。

通过以上处理,数值模拟的波纹梁破坏过程、载荷变化曲线、峰值载荷大小以及平均载荷都基本上与文献[3]中的实验结果吻合。在此基础上,可以进一步研究不同薄弱环节设置对波纹梁吸能能力的影响。

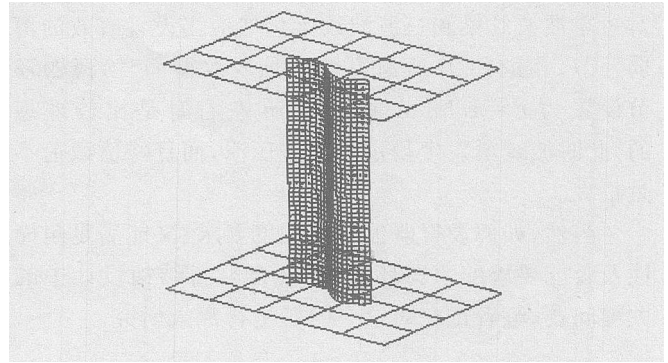


图 2 单波波纹梁的有限元模型

Fig. 2 MSC/DYTRAN model of single wave beam

3 不同薄弱环节设置对波纹梁破坏模式及吸能参数影响的数值模拟

文献[4]仅仅对长单波波纹梁的薄弱环节进行了简单分析,本工作详细研究五种薄弱环节设置对三种波纹梁破坏模式与吸能参数的影响,另外四种薄弱环节设置分别为: $r = 0$ (没有设置薄弱环节), $1.5, 3.5, 4.0\text{mm}$ 。

计算发现,不同的薄弱环节设置对三种波纹梁的破坏过程、峰值载荷、平均载荷及吸能能力的影响都非常大。对于长单波波纹梁,当没有设置薄弱环节时($r = 0$),波纹梁从中部某一截面处产生断裂,发生不稳定的失效,从而引起长单波波纹梁元件的崩溃型断裂;而当设置的薄弱环节过于薄弱时($r = 3.5, 4.0\text{mm}$),波纹梁的破坏从薄弱环节处开始,但初始峰值载荷很低,而且其后产生了第二次比较大的峰值载荷,同样引起长单波波纹梁非稳定的崩溃型破坏。数值模拟得到的 $r = 4.0\text{mm}$ 与 $r = 2.5\text{mm}$ 长单波波纹梁的破坏图如图 3, 4 所示。图 5 为 $r = 0, 4.0\text{mm}$ 时的载荷-时间曲线(图中峰值载荷较高者为 $r = 0$ 时的载荷-时间曲线),通过与文献[4]中 $r = 2.5\text{mm}$ 时的载荷-时间曲线对比,可以发现峰值载荷明显增加。

产生如此差别的主要原因在于稳定性问题:对于长单波波纹梁,由于稳定性较差,所以当不设置薄弱环节与薄弱环节过于薄弱时,都会导致由于总体失稳而引起的崩溃型断裂;而对于短单波波纹梁以及三波波纹梁,由于总体稳定性较好,没有出现不稳定压溃,所以吸能效果较好。虽然不同薄弱环节设置对短单波波纹梁以及三波波纹梁的破坏过程及吸能能力的影响很小,但过低的薄弱环节设置存在初始静强度不足的问题,容易使波纹梁在非碰撞情况下发生破坏。同样,如果初始峰值载荷过高,将会导致波纹梁不容易破坏,从而难以触发波纹梁后续的渐进破坏与吸能过程。所以对短单波波纹梁和三波波纹梁仍然应当设置有效的薄

薄弱环节。对本工作所研究的三种波纹梁而言,薄弱环节设置为 $r=1.5\text{mm}$ 或 2.5mm 左右时是比较理想的,此时波纹梁发生稳定的渐进压溃,而且峰值载荷不是很大。

当然,如何设置既能满足强度要求、又能满足耐撞性及吸能要求的薄弱环节,是复合材料结构设计中的关键问题,笔者正在对这一问题进行深入研究。

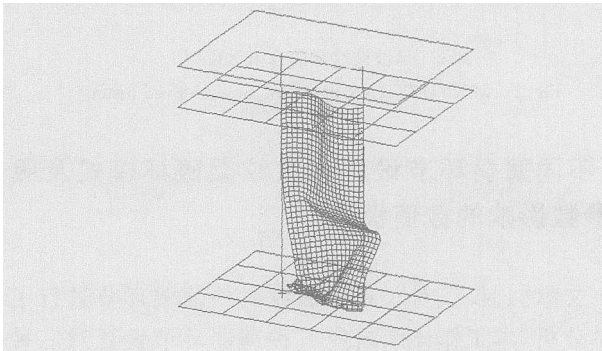


图3 $r=4.0\text{mm}$ 时模拟的长单波波纹梁破坏图
Fig. 3 Simulated diagram of the damaged single-waved beam at $r=4.0\text{mm}$

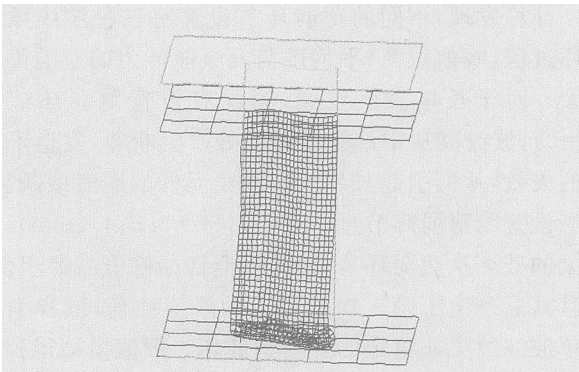


图4 $r=2.5\text{mm}$ 时模拟的长单波波纹梁破坏图
Fig. 4 Simulated diagram of the damaged single waved beam at $r=2.5\text{mm}$

4 不同薄弱环节设置对波纹梁碰撞吸能能力影响的数值模拟

工程上非常关心复合材料结构的耐撞性问题,即复合材料结构的碰撞吸能能力问题。文献[4]只研究了长单波波纹梁在薄弱环节设置为 $r=2.5\text{mm}$ 情况下,碰撞刚性地面时的吸能能力,模拟结果与实验值比较吻合。在此基础上,本工作继续研究其余四种薄弱环节设置对三种波纹梁以 -6.5m/s (负号表示速度方向向下) 的速度碰撞刚性地面时的吸能效果。

计算时,对于长、短单波波纹梁,给定上刚性板的质量为 100kg ,三波波纹梁上刚性板的质量为 250kg ,

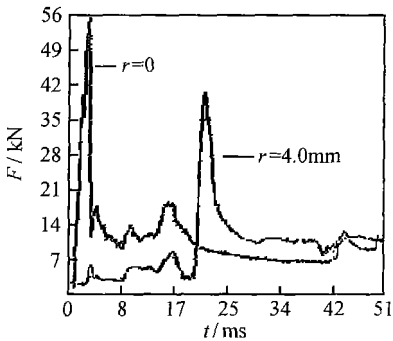


图5 模拟的 $r=0,4.0\text{mm}$ 长单波波纹梁载荷-时间曲线
Fig. 5 Simulated load-time curve of the long single wave beam at $r=0,4.0\text{mm}$

计算时间均为 0.06s 。碰撞初始时刻长、短单波波纹梁的动能为 $2112.5\text{N}\cdot\text{m}$,三波波纹梁的动能为 $5281.25\text{N}\cdot\text{m}$,三种波纹梁在五种薄弱环节设置时的吸能能力见表1。

表1 三种波纹梁碰撞吸能能力的计算结果/ $\text{N}\cdot\text{m}$

Table 1 Numerical energy absorption results of three sets of waved-beams during impacting/ $\text{N}\cdot\text{m}$

r/mm	Short waved-beam	Long waved-beam	Three waved-beam
0	1650	950	4800
1.5	1680	1050	4700
2.5	1720	1140	4600
3.5	1770	900	4750
4.0	1800	850	4650

由表1可见,由于长单波波纹梁存在稳定性问题,所以不同薄弱环节设置对其碰撞吸能能力影响较大;对于短单波波纹梁以及三波波纹梁,由于稳定性较好,所以吸收碰撞能量的能力几乎没有影响。

图6,7分别为短单波波纹梁在薄弱环节设置为

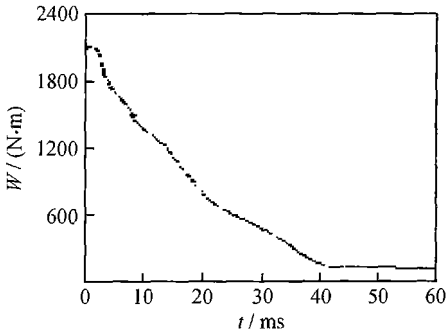


图6 短单波波纹梁上刚性板的动能-时间曲线
Fig. 6 Kinetic energy-time curve of the upper rigid plate of short wave beam

$r = 2.5\text{ mm}$ 时上刚性板的动能-时间与速度-时间曲线, 图 8 为 $r = 2.5, 4.0\text{ mm}$ 时短单波波纹梁的能量变化-时间曲线。计算结果表明, 稳定性较好的三波波纹梁的吸能能力基本上是短单波波纹梁的 3 倍, 而稳定性不太好的长单波波纹梁的吸能能力则明显小于短单波波纹梁。

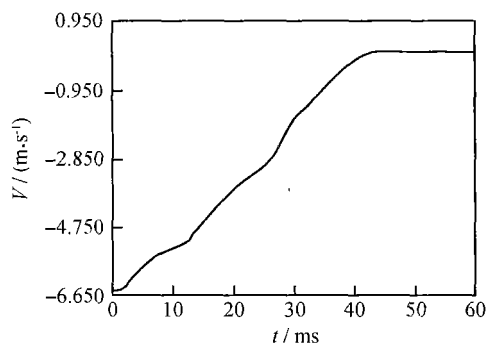


图 7 短单波波纹梁上刚性板的速度-时间曲线

Fig. 7 Velocity-time curve of the upper rigid plate of short wave beam

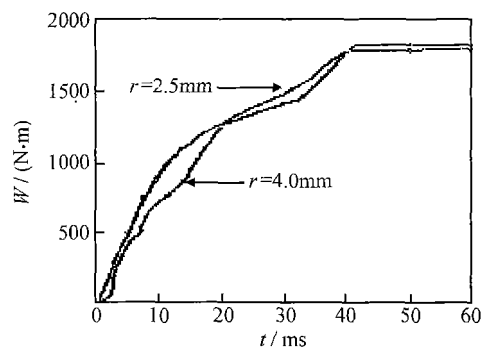


图 8 $r = 2.5, 4.0\text{ mm}$ 时短单波波纹梁能量变化-时间曲线

Fig. 8 Energy-time curve of short single wave beam at $r = 2.5, 4.0\text{ mm}$

5 结论

(1) 长单波波纹梁元件在没有设置有效的薄弱环节或者设置的薄弱环节过于薄弱时, 破坏过程不稳定, 吸能能力比较低; 短单波波纹梁及三波波纹梁虽然总体稳定性比较好, 但也会导致峰值载荷过高, 难以触发稳定的渐进破坏, 或者初始峰值载荷过低, 使得波纹梁的静强度不够。

(2) 当波纹梁的薄弱环节设置为 $r = 2.5\text{ mm}$ 左右时, 其破坏过程才相对比较稳定, 吸能能力较强。

(3) 对于脆性的复合材料, 薄弱环节设置是影响复合材料结构吸能能力的关键设计之一。

参考文献

[1] JIMENEZ M A, MIRAVETE A, LARRODE E, et al. Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles[J].

Composite Structures, 2000, 48: 107–111.

- [2] 陈永刚, 许亚洪, 益小苏. 引发角对碳纤维/环氧复合材料圆管件轴向压溃性能的影响[J]. 材料工程, 2004, (12): 36–39.
- [3] 刘瑞同, 王鑫伟, 英淑萍. 碳纤维-环氧树脂波纹梁吸能能力的试验研究[J]. 航空学报, 2001, 1: 59–61.
- [4] 龚俊杰, 王鑫伟. 复合材料波纹梁吸能能力的数值模拟[J]. 航空学报, 2005, 3: 298–302.
- [5] 龚俊杰, 王鑫伟. 复合材料元件吸能能力的数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 2: 188–191.
- [6] 倪先平, 王永亮, 英淑萍, 等. 直升机机身下部复合材料典型结构耐坠特性研究[J]. 复合材料学报, 2003, 4: 51–57.

基金项目: 高校博士点基金资助项目(20020287003); 江苏省研究生创新计划项目(xm0421)

收稿日期: 2005-06-23; 修订日期: 2006-01-10

作者简介: 龚俊杰(1969–), 男, 博士, 主要从事复合材料结构耐撞性研究, 联系地址: 南京航空航天大学 257 信箱(210016)。

(上接第 27 页)

3 结论

(1) 在 H_2 保护气氛下, 含有铁粉的铜基摩擦材料中, 作为润滑组元加入的 MoS_2 , 在烧结过程中发生了分解反应, 并非以 MoS_2 的形式影响摩擦材料的性能。 MoS_2 分解后的 S 大部分生成了 FeS 等硫化物, 对材料起润滑作用; 少量的 S 与保护气氛 H_2 发生反应, 生成 H_2S 气体排出。

(2) 在铜基摩擦材料中加入 MoS_2 , 降低了材料的硬度; 摩擦时, 在摩擦表面形成了硫化物薄膜, 降低了摩擦系数, 提高了材料的耐磨性。

参考文献

- [1] 费多尔钦科. 现代摩擦材料[M]. 徐润泽译. 北京: 冶金工业出版社, 1983. 109–112.
- [2] 北京粉末冶金研究所. 粉末冶金摩擦材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 1977.
- [3] 樊毅, 刘先念. MoS_2 在铁基摩擦材料中的应用研究[J]. 湖南冶金, 1994, (1): 14–16.
- [4] 陈洁, 姚萍屏. MoS_2 在铁基摩擦材料烧结过程中的行为研究[J]. 非金属矿, 2003, 26(4): 50–52.

收稿日期: 2005-12-28; 修订日期: 2006-03-02

作者简介: 白同庆(1969–), 男, 硕士, 从事粉末冶金摩擦材料的研制、开发与生产, 联系地址: 北京 81 信箱 26 分箱(100095)。