

# 冲击载荷下薄壁组合矩形梁响应特性研究

郝伟伟, 董新龙\*, 苑红莲, 周刚毅

(宁波大学 力学与材料科学研究中心, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 在落锤冲击下对薄壁组合矩形梁进行了实验及有限元分析, 对薄壁组合矩形梁及薄壁单层矩形梁在落锤冲击下的力-位移、能量吸收特性进行了比较分析, 并对薄壁组合矩形梁的变形屈曲特征、过程及不同冲击速度下的吸能情况进行了分析. 结果表明: 在相同横截面积及质量情况下, 薄壁组合矩形梁较薄壁单层矩形梁具有更好的刚度及抗冲击能量吸收能力.

**关键词:** 薄壁组合矩形梁; 落锤; 冲击吸能

中图分类号: O347.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2011) 03-0086-04

各种截面的薄壁梁结构在工程实际中有着广泛的应用, 如航空、车身系统中的主要承载件都是结构复杂的薄壁梁结构<sup>[1]</sup>, 各部分结构的性能要求各不相同. 就薄壁梁结构而言, 横向冲击载荷是一类常见碰撞形式, 如保险杠横梁在正面碰撞中的载荷、B柱和门槛梁在侧面碰撞中的载荷都是横向冲击载荷<sup>[2-3]</sup>. 对于此类薄壁梁结构, 一方面要求结构质量尽可能轻, 另一方面也要求在冲击作用下具有较大抵抗弯曲变形刚度、强度及其能量吸收效率. 因此, 近年来很多复合轻质单元结构被广泛关注, 如泡沫、蜂窝材料填充的薄壁梁、复合夹心梁、组合梁结构等<sup>[4-6]</sup>, 因此研究其质量对抗弯刚度、强度的关系, 以及结构的变形、屈曲吸能特性、吸能效率等的影响就显得尤为重要.

笔者考虑一种薄壁组合矩形梁结构, 利用实验及有限元方法研究薄壁组合矩形梁在冲击载荷作用下的抗弯变形、吸能特性, 并与薄壁单层矩形梁抗弯、能量吸收特性进行比较, 为工程应用提供参考.

## 1 实验过程

### 1.1 材料和试件

选择应用背景比较广泛的低碳钢作为实验材料, 采用铆钉将试件的内、外层及底层薄板相连接.

薄壁组合矩形梁结构截面图和侧视图如图 1 所示, 图中除弧度以外, 单位均为 mm.

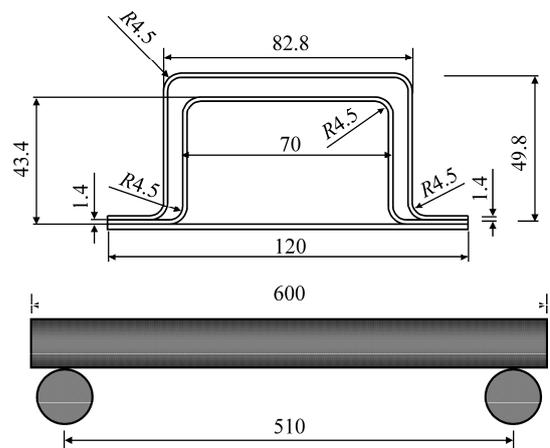


图 1 薄壁组合梁结构及尺寸

### 1.2 冲击实验及测试原理

三点弯曲落锤冲击实验是在实验自行设计的大型落锤上完成, 冲击速度可在  $0 \sim 19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  变化, 落锤由锤头和配重质量块组成, 总质量为 75 kg, 如图 2 所示. 为得到三点弯曲落锤冲击试验过程梁的载荷及挠度, 在锤头上安装加速度传感器, 测试其瞬态加速度, 则载荷  $F = ma$ , 其中,  $m$  为落锤质量,  $a$  为锤头加速度, 并可进一步通过对加速度的积分获得锤头的速度和位移. 电荷放大器为 B.K. 2635, 为能得到研究所需的加速度-时间曲线, 采

收稿日期: 2010-10-10.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

第一作者: 郝伟伟 (1984 - ), 男, 山东泰安人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: rrrhaowei@163.com

\*通讯作者: 董新龙 (1964 - ), 男, 浙江宁波人, 博导/教授, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: dongxinlong@nbu.edu.cn

用的低频和高频分别是 0.1 Hz 和 30 KHz, 放大倍数为  $0.316 \text{ mV}\cdot\text{unit}^{-1}$ , 瞬态波存 Tektronix TDS3014B, Photron Fastcam 高速照相机用于记录试验整个过程, 同时可以用来对加速度积分得到的位移进行比较, 以标定加速度测试方法的可靠性.

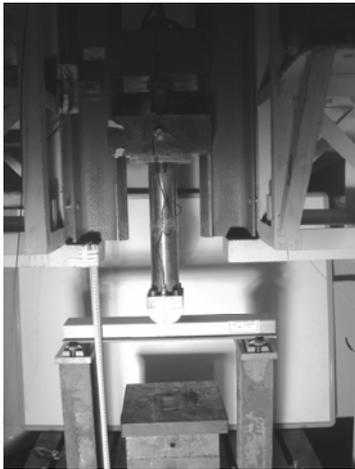


图 2 落锤冲击实验

### 2 实验结果

图 3 为落锤冲击速度  $13.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  情况下实验测得的典型力-时间曲线, 图 4 为处理得到的梁中点速度-位移曲线. 从图 3 结果可见, 碰撞开始时, 锤

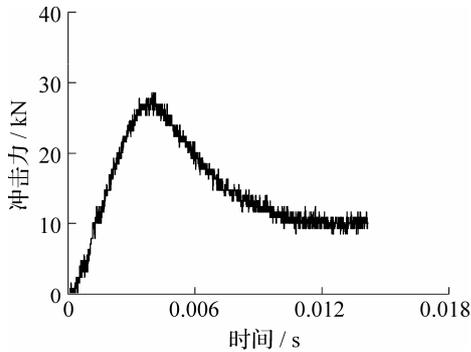


图 3 力-时间曲线

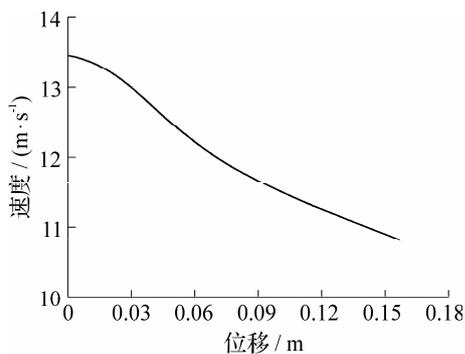


图 4 速度-位移曲线

头受到的力随着下落时间推移较快变大, 当时间达到 0.004 s 的时候, 出现力的最大值, 然后力又逐渐减少, 即一旦薄壁组合梁发生整体屈曲变形, 形成折叠的塑性区后, 载荷开始下降. 图 4 也显示当梁位移大于 0.09 m 的时候, 变形速度下降减缓.

### 3 有限元分析

利用 LS-DYNA 有限元软件对薄壁组合梁在落锤冲击下的三点弯曲实验进行数值分析, 模型如图 5 所示. 模型选用薄壳单元, 薄壁钢板之间通过焊点连接, 低碳钢的本构采用双线性弹塑性模型, 屈服应力为  $\sigma_0 = 200 \text{ MPa}$ , 弹性模量  $E = 2.03 \times 10^5 \text{ MPa}$ , 泊松比为 0.3, 落锤跟支座由 45#钢制成, 采用刚体模型, 其中, 落锤的 6 个自由度除了 Y 方向外, 其他都约束住, 支座的 6 个自由度都约束住. 接触面采用自动面面接触类型.

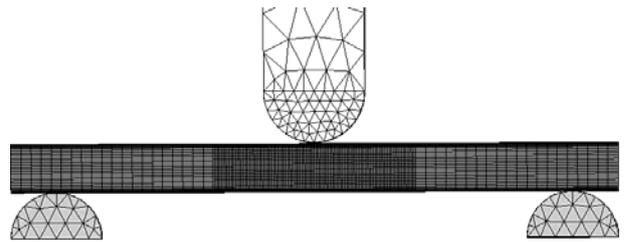


图 5 有限元模型

### 4 结果及讨论

薄壁组合矩形梁在落锤冲击作用下的变形特征如图 6 所示, 实验结果与有限元分析计算结果基

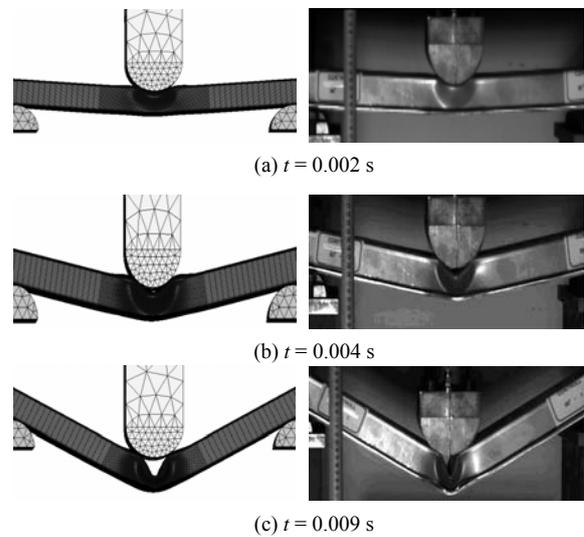


图 6 有限元与实验的变形比较

本一致. 有限元分析进一步表明, 在落锤冲击下, 冲击初始阶段, 薄壁组合矩形梁外层薄板产生屈曲现象, 而内层只是整体弯曲变形. 当外层薄板失稳与内层薄板接触后, 对内层矩形薄板施加局部作用力, 引起内层矩形薄板进入屈曲.

实验与有限元分析得到的薄壁组合矩形梁中点的力-位移曲线比较如图 7 所示, 从图中可见实验结果与有限元分析曲线趋势大致符合. 为了得到力随位移的变化趋势, 在实验测量时, 力传感器省略了在高频中测量得到的数据, 使得在实验的初始阶段计算结果和实验结果有一定差别. 有限元分析表明: 在位移 0.01 m 时为力-位移曲线第 1 个峰值, 其对应于薄壁组合矩形梁外层薄壁板的屈曲开始; 当位移达到 0.05 m 时, 外层薄板与内层薄板接触, 使得内层薄板开始屈曲变形, 产生了第 2 个峰值; 在位移为 0.08 m 时, 又产生 1 个小的峰值. 由于位移的不断增大, 两层薄板的屈曲也随之增大, 最后使得底层薄板由弹性阶段变成塑性阶段, 产生塑性变形.

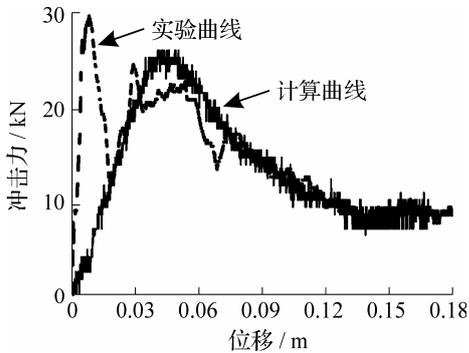


图 7 有限元与实验力-位移响应比较

实验与有限元速度-位移曲线比较如图 8 所示, 从图可见有限元结果与实验吻合较好.

作为比较, 进一步分析了横截面积相同、质量相同的单层矩形薄壁梁在落锤冲击作用下的响应. 图 9 为薄壁组合矩形梁与薄壁单层矩形梁力-位移曲线的比较, 图 10 为两者的能量吸收比较; 从图 9 和图 10 可以看出, 在冲击初期薄壁组合矩形梁的反力大于薄壁单层矩形梁, 冲击变形过程中薄壁组合矩形梁能量吸收大于薄壁单层矩形梁. 因此, 在相同截面和质量下, 薄壁组合矩形梁具有比薄壁单层矩形梁具有更好的刚度和抗冲击吸能能力.

针对不同尺寸薄壁组合矩形梁内层薄板在挠

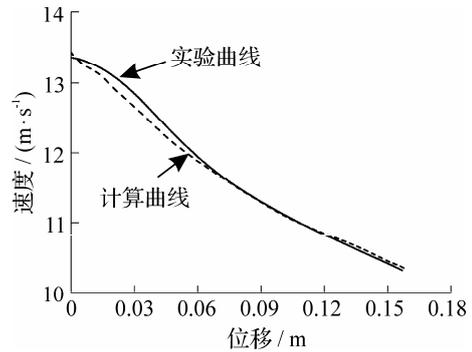


图 8 有限元与实验速度-位移曲线比较

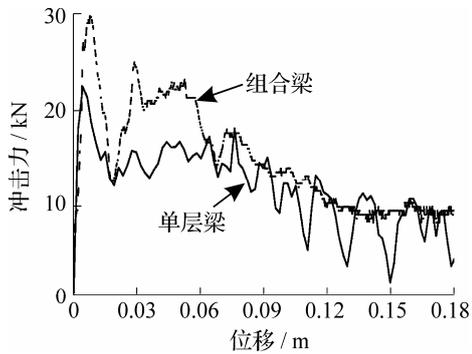


图 9 组合梁与单层梁力-位移曲线

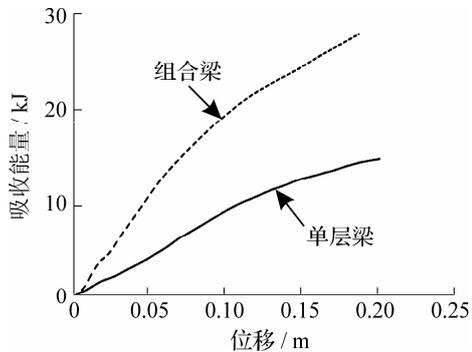


图 10 组合梁与单层梁挠度-吸能曲线

度为 185 mm 时能量吸收比较(图 11), 有限元分析表明: 随薄壁组合矩形梁内层薄板高度  $H$  改变, 其能量吸收逐渐增大, 随后减小, 当  $H=36.1$  mm, 即

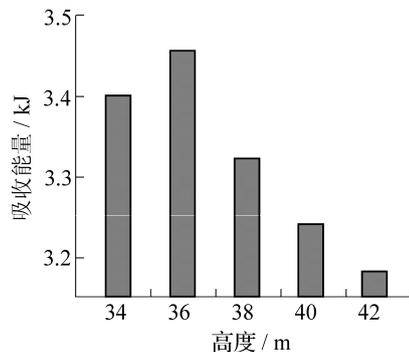


图 11 不同尺寸组合梁内层薄板高度-能量吸收比较

高厚比为 31.4 时, 薄壁组合矩形梁能量吸收效率达到最大.

## 5 结语

对薄壁组合矩形梁在落锤冲击下的动态特性进行了实验及有限元分析, 对薄壁矩形组合梁及单层薄壁梁在落锤冲击下的力-位移、能量吸收特性进行了比较分析, 并对薄壁组合矩形梁的变形屈曲特征、过程及不同冲击速度下的吸能情况进行了分析, 这对于提高薄壁梁结构的刚度及抗冲击能量吸收的工程应用设计具有意义, 结果表明:

(1) 在相同横截面积及质量情况下, 薄壁组合矩形梁较薄壁单层矩形梁具有更好的刚度及抗冲击能量吸收能力.

(2) 对于薄壁组合矩形梁, 存在最优化的结构尺寸, 对笔者所讨论的薄壁组合矩形梁结构, 当内层薄板高度  $H=36.1$  mm 时, 其能量吸收效率最高. 关于薄壁组合矩形梁结构尺寸对抗冲击能量吸收

的影响将另文讨论.

## 参考文献:

- [1] Jones N. Structural impact[M]. Cambridge: UP Cambridge, 1989.
- [2] 顾力强. 轿车保险杠和金属缓冲吸能结构的耐撞性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2001.
- [3] 陈晓东, 尹同耀, 朱西产, 等. 汽车侧面碰撞计算机仿真方法[J]. 汽车工程, 2004, 26(1):65-69.
- [4] Chen Weigang, Wiezbicki T. Bending collapse of thin-wall beams with ultralight filler numerical simulation and weight optimization[J]. Acta Mechanica, 2002, 153(3/4):183-206.
- [5] Chen Weigang, Nardini D. Experimental study of crush behavior of sheet aluminum foam-filled sections[J]. Crashworthiness, 2000, 5(4):447-468.
- [6] Santosa S, Banhart J, Wiezbicki T. Bending crush resistance of partially foam-filled sections[J]. Advanced Engineering Materials, 2000, 2(4):223-227.

# Investigation of Dynamic Response of Thin-walled Composite Rectangular Beams

HAO Wei-wei, DONG Xin-long\*, YUAN Hong-lian, ZHOU Gang-yi

(Research Center of Mechanics and Materials Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** We analyze the thin-walled rectangular beams by virtue of the experimental measures and FEM under the drop hammer. Comparisons are made between the force-deflection and energy absorption, also between the thin-walled composite rectangular beams and the thin-walled single rectangular beams. We also investigate the buckling characteristics, process of the thin-walled composite rectangular beams under the different impact speeds. The result shows that, compared with the thin-walled single composite beam, the thin-walled composite rectangular beams have the better stiffness and the superior ability of energy absorption.

**Key words:** the thin-walled composite rectangular beams; dropping a weight from a height; energy absorption

(责任编辑 章践立)