

高强钢拼焊板三点弯曲变形行为及影响因素

陈水生¹, 孙东继²

1. 河南理工大学机械与动力工程学院, 焦作 454000
2. 上海通用汽车有限公司, 上海 201206

摘要 为掌握先进高强度钢拼焊板弯曲变形行为, 采用试验和有限元法完成三点弯曲试验。建立拼焊板三点弯曲试验有限元模型, 比较试验与仿真结果即载荷—位移曲线, 最大误差为 10.94%。基于此, 分析摩擦系数和板厚比对拼焊板弯曲特征的影响规律。结果表明, 拼焊板两侧变形不均匀, 且焊缝相对中心位置发生了偏移。拼焊板与模具间的摩擦系数及其板厚比对三点弯曲行为影响显著。摩擦系数增加, 最大载荷、最大能量及弯曲应力均增加, 焊缝移动量减小, 且当减小到一定程度后稳定; 板厚比增加, 最大载荷、最大能量、弯曲应力和焊缝移动量均不同程度增加。

关键词 先进高强度钢; 拼焊板; 三点弯曲试验

中图分类号 TG386.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.24.011

Deformation behaviors and influence factors of high strength steel tailor welded blank in three point bending test

CHEN Shuisheng¹, SUN Dongji²

1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China
2. Shanghai General Motors Co., Ltd., Shanghai 210206, China

Abstract To understand the bending behaviors of the tailor welded blanks with the base materials of advanced high strength steel, three-point bending tests were conducted using experiment and the finite element method. A finite element model for the three point bending test was established for the tailor welded blanks. By comparing the load-displacement curve from the experimental results with the results from the finite element analysis, the maximum difference was 10.94%, showing that the results from the finite element analysis well agreed with the test results. Based on the established model, the effects of the friction coefficient and the thickness ratio were probed. Results indicated that the uneven deformation and related weld-bead migration were observed. The influences of the friction between the tools and specimens and the thickness ratio were obvious on the bending behaviors. As the friction coefficient increased, the peak load and the maximum energy as well as the bending stress increased, while the weld-bead migration decreased first and then remained at a certain level when the friction coefficient decreased to some extent. When the thickness ratio increased, the four aforementioned parameters increased with different degrees.

Keywords advanced high strength steel; tailor welded blanks; three point bending test

汽车轻量化已成为汽车工业的发展方向^[1]。在车身重量减轻方面, 一是材料轻量化, 如高强度钢、铝镁合金、复合材料等的使用^[2]; 二是结构轻量化, 如拼焊板技术、不等截面板

技术等。拼焊板技术是将几块不同厚度、不同材质和不同表面涂层的板料通过焊接而成一个整体, 然后进行冲压成形^[3], 两种主要轻量化途径的综合利用, 既降低成本, 减轻重量, 又

收稿日期: 2015-01-13; 修回日期: 2015-06-07

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(142102210130); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(14A460013)

作者简介: 陈水生, 博士研究生, 研究方向为现代先进成形技术及汽车轻量化设计, 电子信箱: css200878@163.com

引用格式: 陈水生, 孙东继. 高强钢拼焊板三点弯曲变形行为及影响因素[J]. 科技导报, 2015, 33(24): 64-68.

提高了零件的耐撞性能^[4]。然而,拼焊板成形行为与单一板有很大的差异,钢制拼焊板焊缝强度和硬度高于、韧性低于母材,成形过程中出现两种失效模式^[5]。板厚比是影响拼焊板成形行为的重要因素。Korouyeha等^[6]研究了板厚比对St12钢拼焊板成形性能的影响,发现板厚比提高将降低拼焊板成形性。Riahi等^[7]采用试验和仿真法,研究了焊缝位置和板厚比对拼焊板成形性能和开裂位置的影响。发现开裂出现在薄侧,此处应变最大;板厚比减小,拼焊板成形性提高。Bhagwan等^[8]通过不同材料匹配控制应变取向,使焊缝移动最小。拼焊板成形行为的研究主要是基于单向拉伸^[9]、深拉深^[10]及极限胀形试验^[11]等标准的物理试验。考虑拼焊板抗弯强度、抗凹刚度及碰撞吸能性能时,除了传统的拉伸和成形特征,更关注其弯曲刚度和强度^[12,13]。三点弯曲试验是研究拼焊板弯曲性能的有效方法。Rathnaweera等^[14]进行准静态和动态三点弯曲试验,研究了先进高强度圆柱拼焊管的承载能力、吸能及开裂特性。为研究不同因素对拼焊板弯曲行为的影响,Xu等^[15]采用试验法对先进高强度钢拼焊板进行三点弯曲试验,发现同一焊缝方向、不同材料匹配的拼焊板弯曲行为为差异显著。由于试验限制,没有考虑模具与拼焊板之间的摩擦,而在三点弯曲试验中摩擦影响显著^[16,17]。固体力学弯曲应力计算中,采用拼焊板等效厚度,并假设为两侧厚度的平均值,是因为精确确定拼焊板厚度有较大困难。

为此,基于文献[15]的高强度钢拼焊板试验结果,本文采用有限元法分析试验中摩擦对拼焊板弯曲行为的影响,探讨板厚比与最大弯曲应力间的关系。

1 三点弯曲试验

1.1 拼焊板试样和材料

试验中使用的拼焊板试样采用剪板机按尺寸剪切,随后通过激光焊接成拼焊板。为忽略材料性能差异的影响,选取

材料相同、厚度不同的母材,拼焊板结构及尺寸如图1所示,拼焊板尺寸为30 mm×180 mm,焊缝居中并平行于弯矩方向。

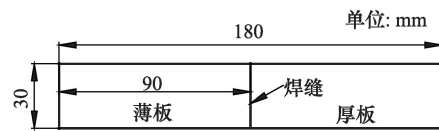


图1 拼焊板结构及尺寸

Fig. 1 Configuration and size of TWB specimens

为简化表述,将1.0、1.5 mm的母材DP600和1.0 mm/1.5 mm的拼焊板分别用A、B和AB表示。

研究中拼焊板母材材料为高强度DP600,该热轧双相钢以其高强度和良好的成形性能,广泛用于汽车工业。力学性能通过母材单向拉伸试验获得,室温拉伸速率为5 mm/min,获得母材真实应力-应变曲线如图2所示^[15],力学性能归纳于表1^[15]。

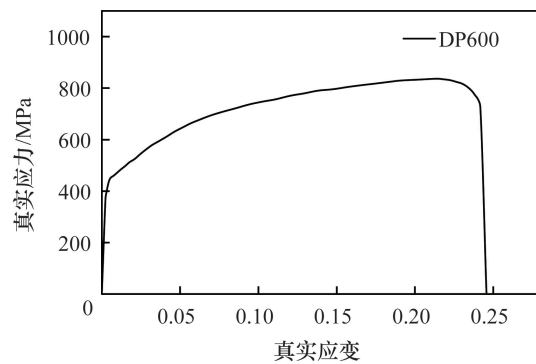


图2 DP600的真实应力应变曲线

Fig. 2 True stress-strain curve of material DP600

表1 母材高强度钢DP600的力学性能

Table 1 Mechanical properties of base material DP600 at elasticity condition

材料	杨氏模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	强度系数K/ MPa	应变硬化指数 <i>n</i>	各向异性指数		
							<i>r</i> ₀	<i>r</i> ₄₅	<i>r</i> ₉₀
DP600	210	0.3	376.4	650	1084	0.17	0.67	0.83	0.89

1.2 试验装置

三点弯曲试验装置为1342型INSTRON通用试验机系统,包含计算机控制系统和数据采集系统。加载极限250 kN,压头行程50.0 mm。试验装置及尺寸如图3所示,其中压头和圆柱支撑直径均为5.0 mm,两圆柱支撑间距*S*=110.0 mm,水平布置;压头位于两支撑的水平中点;试件水平对称置于两圆柱支撑上表面,压头置于试件上表面,试验过程中向*y*负方向移动40 mm,详尽的试验方法参考文献[15]。

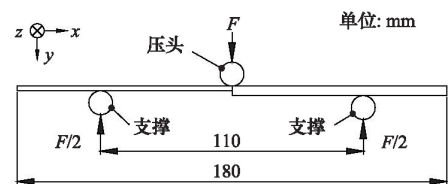


图3 试验装置示意

Fig. 3 Schematic of experimental apparatus for three-point bending tests

2 三点弯曲试验数值模型

2.1 有限元模型建立

采用商业非线性有限元软件 ABAQUS/Explicit 模块完成三点弯曲试验仿真。有限元模型包括压头、2 个支撑和拼焊板,如图 4 所示。该模型是基于拼焊板三点弯曲试验建立^[15]。由于压头和支撑变形较小,为了节省计算资源,用解析刚体单元 R3D4 建模,参考点选择各自端面圆心;拼焊板作为变形体,采用 4 节点薄壳单元 SR4 建模,厚向带 5 个积分点,厚度等于板料实际厚度。试验中拼焊板试样采用激光焊接,其焊缝宽度及热影响区很小,忽略焊缝,故有限元仿真中未考虑焊缝形状和性能。拼焊板尺寸如图 1 所示,厚度分别为 1.5、1.0 mm,模拟过程中,压头向下移动,约束除 y 方向外的其余自由度;2 个支撑施加全约束,压头加载方式为准静态位移加载。定义压头和支座与拼焊板上、下表面的接触为面一面接触,传递法向力和切向力,采用经典库仑摩擦模型描述,考虑有限滑动,摩擦系数设为 0.1。网格在拼焊板接触位置即焊缝附近和与支座接触附近加密。

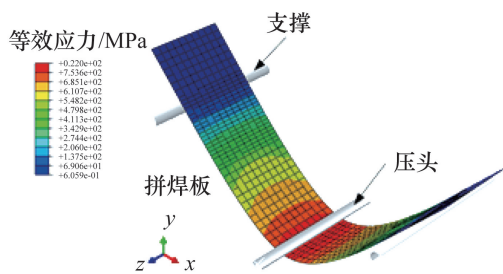


图 4 三点弯曲有限元仿真中板料变形

Fig. 4 Deformed configuration in the finite element simulation of the three-point bending test

2.2 材料模型及参数

板料变形行为服从 Hill's 1948 屈服准则:

$$f(\sigma) = \sqrt{\frac{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2}{-\sigma_{22}^2} + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2} \quad (1)$$

式(1)中,

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right), \quad G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \quad (2)$$

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad (3)$$

$$L = \frac{3}{2R_{23}^2}, \quad M = \frac{3}{2R_{31}^2}, \quad N = \frac{3}{2R_{12}^2} \quad (4)$$

F, G, H, L, M, N 是 Hill 1948 屈服准则系数,可通过以下各向异性指数计算:

$$R_{11} = R_{13} = R_{23} = 1, \quad R_{22} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0(r_{90} + 1)}} \quad (5)$$

$$R_{33} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_{90} + r_0}}, \quad R_{12} = \sqrt{\frac{3r_{90}(r_0 + 1)}{(2r_{45} + 1)(r_{90} + r_0)}} \quad (6)$$

式中, r_0, r_{45}, r_{90} 分别为材料与轧制方向成 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 的各向异性指数。

建模中所需的拼焊板母材力学性能参数如表 1 所示,假设材料服从各向异性弹塑性模型。材料应变硬化规律遵循 Hollomon 本构方程:

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

式中, σ 为流动应力, ε 为真实应变, K 为强度系数, n 为应变硬化指数。

3 结果与讨论

3.1 仿真模型验证

针对先进高强度钢 DP600,分别分析母材 A、B 及拼焊板 AB 的三点弯曲变形,获得了各自的载荷-位移曲线,并与试验结果对比(试验结果来源于文献[15]),如图 5 所示。其中,母材 A、B 及拼焊板 AB 的最大误差分别为 7.88%、10.94% 和 6.59%,可见试验与有限元结果基本吻合,证明有限元模型合理有效,可用于分析拼焊板三点弯曲变形行为。

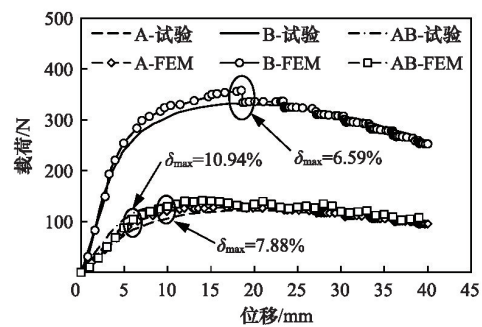


图 5 试验和有限元的载荷-位移曲线结果对比

Fig. 5 Comparison of load-displacement from experiment and one from simulation

3.2 摩擦系数的影响

试样与模具之间的摩擦对三点弯曲变形行为有较大的影响,然而,由于摩擦系数在试验中难以精确控制,此时,有限元分析成为研究摩擦对拼焊板三点弯曲变形行为的有效工具。以拼焊板 AB 为例,拼焊板与模具之间的摩擦系数分别为 0、0.1、...、0.5,压头下行位移均为 40.0 mm,分别获得不同摩擦系数对应的最大载荷、焊缝移动量及最大能量,结果如图 6 所示。

由于拼焊板母材厚度差异,在弯曲变形过程中两侧变形不均,导致焊缝偏离中心位置,称此为焊缝移动量。从图 6 可见,摩擦系数对焊缝移动量的影响显著,随着摩擦系数增大,焊缝移动量逐渐减小,当摩擦系数到达 0.4 后,焊缝移动量基本不变。焊缝移动包括两部分,一是拼焊板与模具之间的绝对滑动,二是两侧母材变形不均引起的焊缝移动。由于板料与模具之间的摩擦阻碍了拼焊板与模具之间的绝对滑动,当摩擦系数到达一定程度后,拼焊板两侧变形不均引起的焊缝移动成为重点。

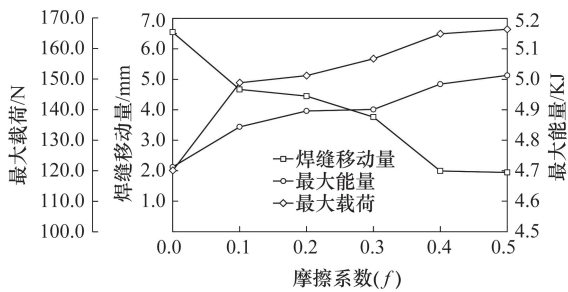


图6 摩擦系数对最大载荷、焊缝移动量及最大能量的影响

Fig. 6 Effect of friction coefficient on peak load and weld-bead migration as well as maximum energy

最大能量和最大载荷均随着摩擦系数增加而不断增大。拼焊板弯曲的变形过程中消耗的能量主要包括拼焊板自身弹塑性变形消耗能和克服摩擦做功。摩擦系数越大,克服摩擦所需要的能量越多,所以总能量增加,相应最大载荷也随之增大。

3.3 板厚比的影响

文献[15]对先进高强度钢 DP600 的 A 母材及拼焊板 AB 进行了三点弯曲试验,结果发现他们的弯曲变形行为明显不同。为此,将摩擦系数定为 0.12 以忽略不同摩擦系数的影响,以先进高强度钢 DP600 拼焊板为例,板厚比分别为 1.0、1.2、...、2.0,研究不同板厚比对拼焊板三点弯曲变形行为的影响,分别获得各种板厚比的最大载荷、最大能量及焊缝移动量,结果如图 7 所示。

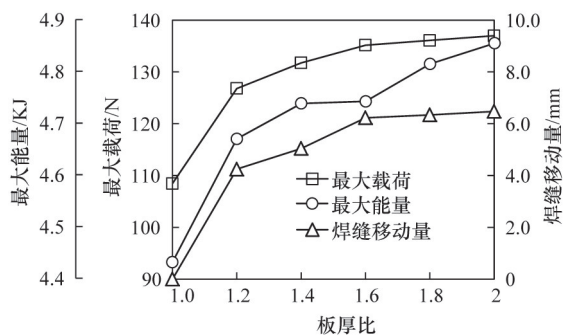


图7 板厚比对最大载荷、焊缝移动量及最大能量的影响

Fig. 7 Effect of thickness ratio on peak load and weld-bead migration as well as maximum energy

图 7 表明,随着板厚比增加,焊缝移动量、最大载荷及最大能量均不同程度地上升。焊缝移动量从 0 增加至 6.0 mm,原因是板厚比增加加剧了拼焊板两侧变形不均程度。拼焊板两侧变形不均程度随着板厚比增加而加剧,薄侧的变形程度大幅度增大,使变形过程中所需的最大载荷和最大能量升高。

3.4 弯曲应力

弯曲应力是评估拼焊板弯曲变形行为的重要参数,而试验方法无法定量分析不同板厚比和摩擦系数对弯曲应力的影响。为此,采用有限元法定量分析他们的影响规律。为忽略两个因素间交互影响,分析板厚比对弯曲应力影响时,固定摩擦系数为 0.1;当分析摩擦影响时,固定板厚比为 1.0 mm/1.5 mm,结果如图 8 所示。

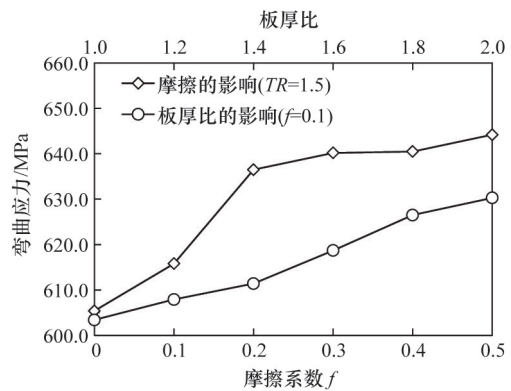


图8 板厚比和摩擦系数对弯曲应力的影响

Fig. 8 Effect of thickness ratio and friction coefficient on bending stress

图 8 反映了不同板厚比和摩擦系数对拼焊板弯曲强度的影响规律,摩擦系数与板厚比对弯曲强度均为正向影响。摩擦系数越大,由于两侧变形不均,拼焊板薄侧偏离水平的角度大于厚侧,与支撑之间的接触正应力减小,切应力增大,相对支撑的刚性滑动加大。较大的刚性滑动又进一步加剧了薄侧的变形,最终导致弯曲强度增加。

板厚比增加,两侧变形不均程度增加,使拼焊板薄侧承受更大的变形,致使弯曲强度增大。在相同条件下,拼焊板弯曲强度试验结果为 500.0 MPa,数值仿真结果为 615.8 MPa,偏差为 23.16%,存在较大差异,这是由于文献[15]中试验结果是采用理论公式计算得出,在计算中对拼焊板厚度进行了等效厚度假设,可见这一假设与实际情况存在较大的差异。

4 结论

建立了拼焊板三点弯曲有限元模型,分析了高强钢 DP600 及板厚比 1.0 mm/1.5 mm 的拼焊板弯曲变形行为,获得的载荷一位移曲线与试验结果吻合,证明所建立的有限元模型合理有效,可用于摩擦系数、板厚比对拼焊板弯曲变形特征影响规律的定量分析。

1) 摩擦系数对拼焊板弯曲变形特征影响显著。摩擦系数增大,最大能量和最大载荷均逐渐升高;相反,焊缝移动量逐渐减小,且当减小到一定程度后趋于稳定。

2) 焊缝移动量、最大载荷及最大能量均随着板厚比增加

而不同程度地上升。主要原因是板厚比增加导致拼焊板两侧母材变形不均程度增加。

3) 在相同条件下,弯曲应力受摩擦系数和板厚比影响较大。摩擦系数、板厚比越大,弯曲应力越高,其根源是拼焊板两侧变形程度不均。

参考文献(References)

- [1] Kitayama S, Huang S, Yamazaki K. Optimization of variable blank holder force trajectory for springback reduction via sequential approximate optimization with radial basis function network[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2013, 47(2): 289-300.
- [2] Lee K H, Kang D H. Structural optimization of an automotive door using the kriging interpolation method[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2007, 221(12): 1525-1534.
- [3] Pallett R J, Lark R J. The use of tailored blanks in the manufacture of construction components[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 117(1/2): 249-254.
- [4] 施欲亮, 朱平, 沈利冰, 等. 汽车前纵梁的拼焊板轻量化设计研究[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(3): 374-377.
Shi Yuliang, Zhu Ping, Shen Libing, et al. Lightweight design study of automotive front rail with TWB structure[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(3): 374-377.
- [5] Bayraktar E, Isac N, Arnold G. An experimental study on the forming parameters of deep-drawable steel sheets in automotive industry[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 162/163: 471-476.
- [6] Korouyeh R S, Naeini H M, Torkamany M J, et al. Experimental and theoretical investigation of thickness ratio effect on the formability of tailor welded blank[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 51: 24-31.
- [7] Riahi M, Amini A, Sabbaghzadeh J, et al. Analysis of weld location effect and thickness ratio on formability of tailor welded blank[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(4): 282-287.
- [8] Bhagwan A V, Kridli G T, Friedman P A. Formability improvement in aluminum tailor-welded blanks via material combinations[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2004, 6(2): 134-140.
- [9] 陈炜, 滕广宇, 丁毅, 等. 双相钢拼焊板温拉伸流变应力研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(22): 49-54.
Chen Wei, Teng Guangyu, Ding Yi, et al. Flow stress of dual phase steel tailor welded blanks during warm tensile[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(22): 49-54.
- [10] Padmanabhan R, Baptista A J, Oliveira M C, et al. Effect of anisotropy on the deep-drawing of mild steel and dual-phase steel tailor-welded blanks[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 184(1-3): 288-293.
- [11] Panda S K, Ravi Kumar D. Experimental and numerical studies on the forming behavior of tailor welded steel sheets in biaxial stretch forming[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(3): 1365-1383.
- [12] 施欲亮, 朱平, 林忠钦. 利用拼焊板结构改进车门内板的轻量化设计[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(3): 178-181.
Shi Yuliang, Zhu Ping, Lin Zhongqin. Lightweight redesign of the automotive inner door panel using tailor welded blank structure[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(3): 178-181.
- [13] Pan F, Zhu P, Zhang Y. Metamodel-based lightweight design of B-pillar with TWB structure via support vector regression[J]. *Computers & Structures*, 2010, 88(1/2): 36-44.
- [14] Rathnaweera G, Durandet Y, Ruan D, et al. Performance of advanced high strength steel and aluminum alloy tubes in three-point bending [J]. *Sustainable Automotive Technologies*, 2012: 25-32.
- [15] Xu F, Sun G, Li G, et al. Experimental investigation on high strength steel (HSS) tailor-welded blanks (TWBs) [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(4): 925-935.
- [16] Zang S, Lee M, Sun L, et al. Measurement of the Bauschinger behavior of sheet metals by three-point bending springback test with pre-strained strips[J]. *International Journal of Plasticity*, 2014, 59: 84-107.
- [17] Giglio M, Gilioli A, Manes A. Numerical investigation of a three point bending test on sandwich panels with aluminum skins and Nomex™ honeycomb core[J]. *Computational Materials Science*, 2012, 56: 69-78.

(编辑 陈华斌)