

复合材料垒球棒模态振型和冲击性能的数值分析

解 鑫<sup>1</sup>, 毛佳佳<sup>2</sup>, 陈继业<sup>3\*</sup>

(1. 南京体育学院运动系, 南京 210033; 2. 南京航空航天大学金城学院基础部, 南京 210000;  
3. 南京工业大学土木工程学院, 南京 211816)

**摘要:** 碳纤维复合材料垒球棒相比传统的铝合垒球棒和实木垒球棒, 具有重量轻、强度高、抗冲击性能高、疲劳寿命长等特点。利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 建立了复合材料垒球棒模型, 并将有限元结果与试验值<sup>[6]</sup>进行了对比, 验证了模型的可靠性。利用提出的模型, 对三种常用复合材料垒球棒进行了数值模拟, 对比了模态振型和垒球回弹速度。结果表明, Demarini 垒球棒的弯曲和环向模态振型幅值均较小, 有利于其工作性能的发挥, 且具有较好的击球性能。

**关键词:** 垒球棒; 复合材料; 模态振型; 回弹速度

**中图分类号:** TB332      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-0999(2018)12-0047-06

复合材料结构因其轻质高强等特点<sup>[1,2]</sup>, 近年来受到体育界的关注, 尤其是复合材料垒球棒<sup>[3-5]</sup>, 既具有复合材料的优点又表现出良好的击球性能, 受到垒球运动员的青睐。此外, 与传统实木垒球棒相比, 复合材料垒球棒经久耐用, 为使用者减少了购买垒球棒的开支。

一些科研工作者为了考察复合材料垒球棒的工作性能, 对其进行了模态分析和击球性能分析。Yee 等<sup>[6]</sup>对一种复合材料垒球棒和两种垒球进行了试验分析和数值模拟, 结果表明, 提出的有限元模型能较好地预测垒球棒的刚度和频率响应; 此外, Yee 等<sup>[6]</sup>对四种用于模拟垒球材料的粘弹性模型进行了对比, 指出 LS-DYNA 中的 6#材料模型 (关键字为 \*MAT\_VISCOELASTIC) 模拟得到的结果与试验结果最吻合。Daniel<sup>[7]</sup>对复合材料垒球棒、木质垒球棒和自由梁进行了弯曲模态对比分析, 结果表明, 两种球棒和自由梁的振动模态均相似, 区别在于球棒的振动振幅不对称且在手柄处的振幅较大, 此外, 球棒振动振幅为 0 的点靠近手柄端。

尽管科研工作者对复合材料垒球棒的研究已经取得了很大进展, 但不同制造商生产的复合材料垒球棒之间存在差异, 目前仍缺乏对不同复合材料垒球棒之间的对比分析。

本文提出了一种有限元模型, 对一种复合材料

垒球棒进行了模态分析和冲击响应模拟, 并将有限元结果与文献<sup>[6]</sup>的试验结果进行了对比, 验证了本文提出的有限元模型的可靠性。利用验证的垒球棒模型建模方法, 对三种复合材料垒球棒进行了模态分析和击球性能分析。

1 有限元模型

本文采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件<sup>[8,9]</sup>, 对三种复合材料垒球棒的模态和垒球击打后的动态响应进行了数值模拟。三种复合材料垒球棒均由外管和内管组成, 详细尺寸如图 1 所示。

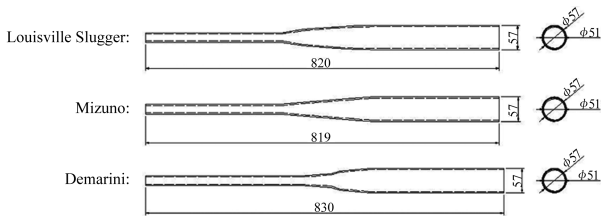


图 1 复合材料垒球棒尺寸 (单位: mm)  
Fig. 1 Size of composite softball bats (unit: mm)

复合材料垒球棒采用 4 节点 SHELL163 壳单元建模, 该单元在厚度方向设置 5 个积分点, 通过 Belytschko-Tsay<sup>[10]</sup>算法进行积分。复合材料垒球棒材料通过一种增强复合材料损伤模型 (MAT 54)<sup>[11]</sup>定义, 该材料模型中的 AOPT 选项可用于定义局部材料坐标系, 本文 AOPT 设为 3。表 1 给出了复合材料

收稿日期: 2018-09-14  
基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51578285, 51778285); 江苏省自然科学基金面上项目 (BK20161545)  
作者简介: 解鑫 (1984-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事棒垒球教学训练与器材设备方面的研究。  
通讯作者: 陈继业 (1993-), 男, 博士生, 主要从事复合材料结构方面的研究, chjyngpt@163.com。

垒球棒详细的材料参数。垒球棒的碳纤维复合材料铺层角度和厚度由关键字“\*PART\_COMPOSITE”定义。外管和内管的碳纤维铺层均采用[+/-/+/-/+ ]布置,其中,每一“+”层的厚度为总厚度的 1/6,每一“-”层的厚度为总厚度的 1/4。外管和内管之间设有 0.03 mm 的过盈配合。外管和内管间接触通过“\*INTERFERENCE\_SURFACE\_TO\_SURFACE”定义,通过动态松弛方法产生外管和内管间的粘结预应力。

表 1 复合材料垒球棒材料参数

Table 1 Material parameters of composite softball bats		
属 性	LS-DYNA 参数	实验值
密 度	RO	1560 kg/m <sup>3</sup>
纵向模量	EA	1.26e11 Pa
横向模量	EB	1.26e11 Pa
剪切模量	GAB	4.22e9 Pa
泊松比	PRBA	0.02
纵向拉伸强度	XT	2.23e9 Pa
横向拉伸强度	YT	2.23e9 Pa
纵向压缩强度	XC	1.45e9 Pa
横向压缩强度	TC	1.45e9 Pa
剪切强度	SC	1.51e8 Pa

垒球直径为 97 mm,采用 8 节点 SOLID164 实体单元建模,结合沙漏控制对该类型单元采用缩减积分计算。垒球通过一种粘弹性材料模型(MAT 6)定义,材料参数见表 2。垒球模型网格尺寸为 5 mm,该模型共含有 16000 个单元。垒球和垒球棒之间采用面面自动接触,通过关键字“\*AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE”控制<sup>[12,13]</sup>,动、静摩擦系数均设为 0.2。以 Demarini 垒球棒为例,复合材料垒球棒和垒球的有限元模型如图 2 所示。

表 2 垒球材料参数

Table 2 Material parameters of softball		
属 性	LS-DYNA 参数	实验值
密 度	RO	280 kg/m <sup>3</sup>
体积模量	BULK	11.39e6 Pa

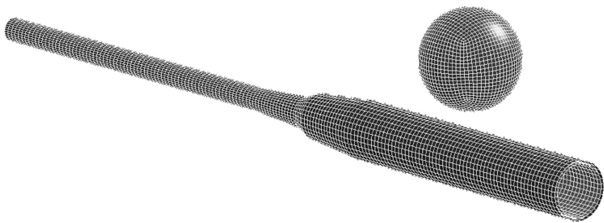


图 2 复合材料垒球棒和垒球模型图  
Fig. 2 Model of composite softball bat and softball

2 模型验证

为了验证本文提出模型的有效性,将提出的模型与文献[6]中的试验结果进行了对比,包括第一阶、第二阶弯曲模态和环向模态对比,以及垒球棒受到垒球冲击后的冲击力时程曲线对比(见图 3)。表 3 给出了频率对比以及冲击力峰值和冲击接触时间对比。

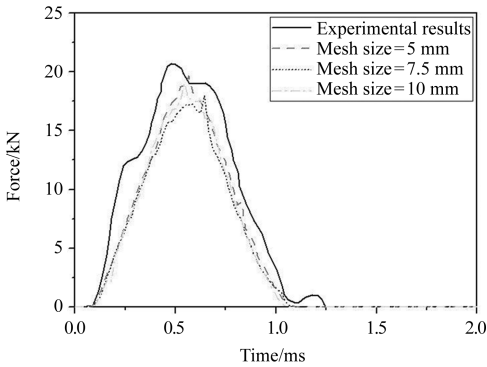


图 3 数值结果与试验<sup>[6]</sup>冲击力时程曲线对比图  
Fig. 3 Comparison of impact force-time history curves between numerical and experimental results<sup>[6]</sup>

表 3 数值结果与试验值<sup>[6]</sup>对比

Table 3 Comparison of numerical results and experimental results <sup>[6]</sup>							
参 数	试验值 <sup>[6]</sup>	网格尺寸/mm					
		5	相对 误差 /%	7.5	相对 误差 /%	10	相对 误差 /%
弯曲模态 (一阶/二阶) /Hz	146/555	157/546	7.5/1.6	-	-	-	-
环向模态 (一阶/二阶) /Hz	1450/1950	1393/2072	3.9/6.3	-	-	-	-
冲击力 峰值 /kN	20.91	19.68	5.9	17.97	14.1	19.02	9.0
接触时间 /ms	1.03	1.01	2.0	1.01	2.0	1.01	2.0

为了模拟文献[6]中的冲击试验工况,在距离垒球棒把手端部 152.4 mm 的位置,给一个节点施加了全约束,以确保垒球棒在受到垒球击打前保持静止状态,当受到垒球击打后,可以在平面内转动。垒球棒受到垒球击打的位置距离垒球棒端部 152.4 mm。本文所有模拟工况的约束条件和垒球棒受到垒球击打的位置均与此处保持一致。垒球的初始速度为 42.5 m/s。

本文考虑了网格尺寸对冲击响应的影响,分别取网格尺寸为 5 mm、7.5 mm 和 10 mm 进行了模拟。结果表明,本文提出的模型能有效预测复合材料垒球棒的模态和冲击响应,且网格尺寸为 5 mm 时结果吻合最好。

3 模态分析

通过定义关键字“\* CONTROL\_IMPLICIT\_GENERAL”,激活 LS-DYNA 的隐式求解功能<sup>[14]</sup>,对三种类型复合材料垒球棒进行了模态分析。通过定义关键字“\* CONTROL\_IMPLICIT\_EIGENVALUE”,控制输出的特征值数量。三种类型垒球棒的前两阶弯曲和环向固有频率以及所对应的模态振型如图 4 至图 7 所示。

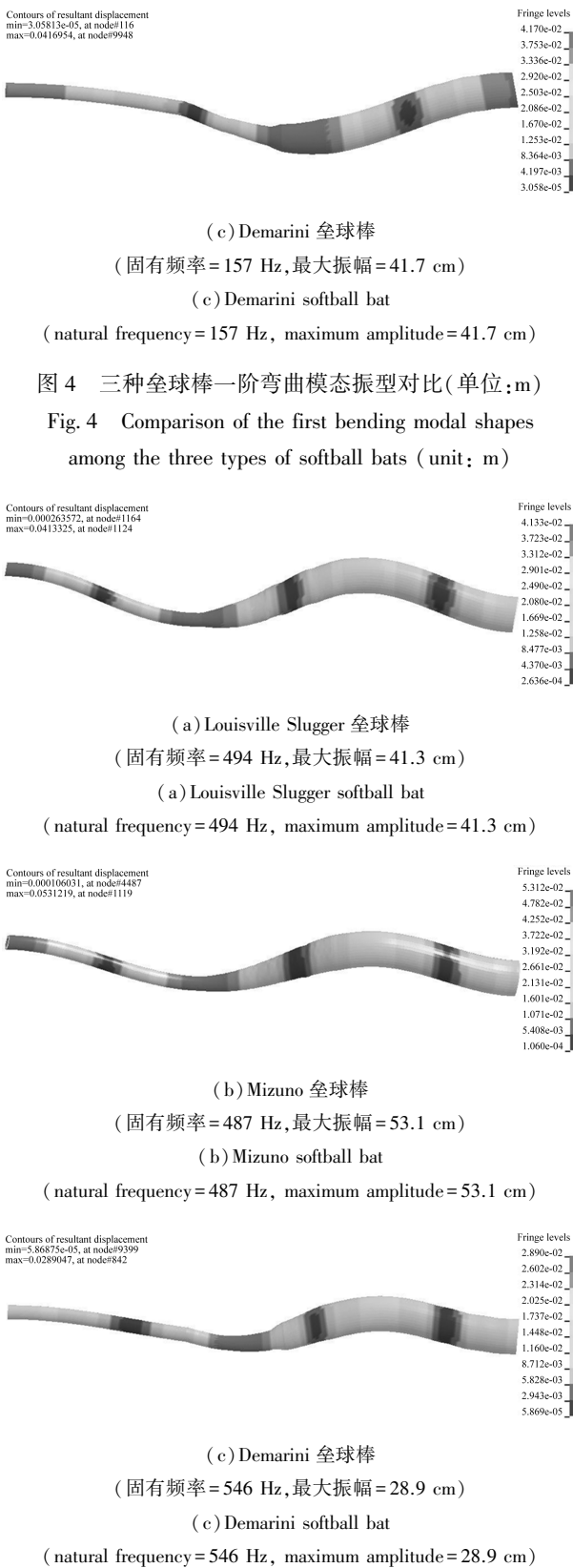
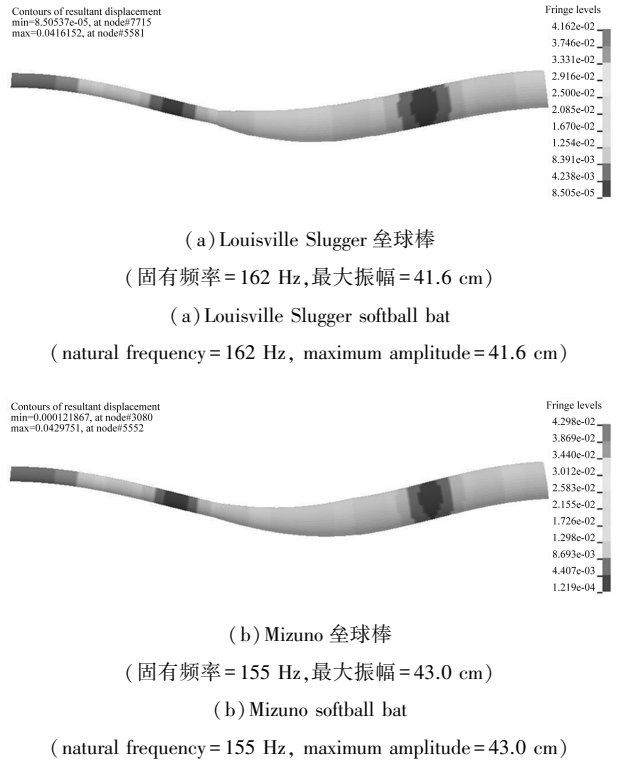
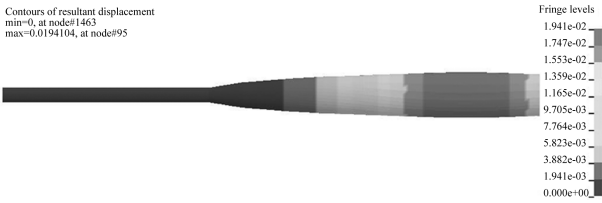
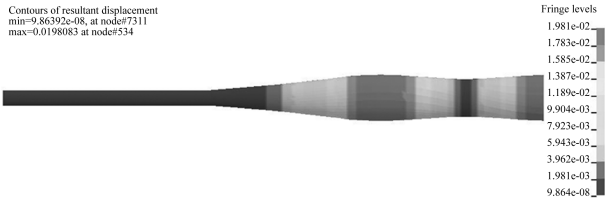


图 5 三种垒球棒二阶弯曲模态振型对比(单位:m)  
Fig.5 Comparison of the second bending modal shapes among the three types of softball bats (unit: m)



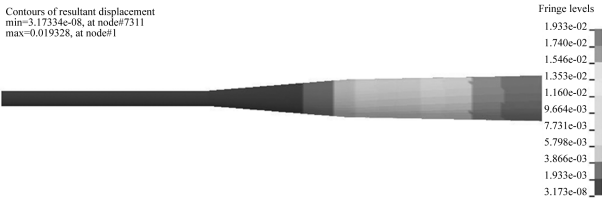
(a) Louisville Slugger 垒球棒  
(固有频率 = 1425 Hz, 最大振幅 = 19.4 cm)



(b) Mizuno 垒球棒  
(固有频率 = 1979 Hz, 最大振幅 = 19.8 cm)

(a) Louisville Slugger softball bat  
(natural frequency = 1425 Hz, maximum amplitude = 19.4 cm)

(b) Mizuno softball bat  
(natural frequency = 1979 Hz, maximum amplitude = 19.8 cm)



(b) Mizuno 垒球棒  
(固有频率 = 1323 Hz, 最大振幅 = 19.3 cm)



(c) Demarini 垒球棒  
(固有频率 = 2072 Hz, 最大振幅 = 17.9 cm)

(b) Mizuno softball bat  
(natural frequency = 1323 Hz, maximum amplitude = 19.3 cm)

(c) Demarini softball bat  
(natural frequency = 2072 Hz, maximum amplitude = 17.9 cm)



(c) Demarini 垒球棒  
(固有频率 = 1393 Hz, 最大振幅 = 18.3 cm)

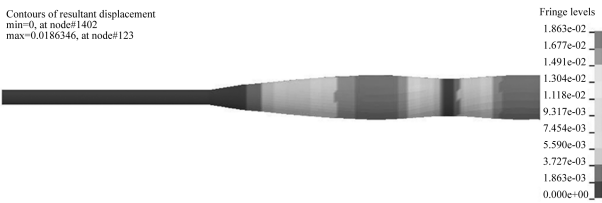
图 7 三种垒球棒二阶环向模态振型对比 (单位: m)  
Fig. 7 Comparison of the second hoop modal shapes  
among the three types of softball bats (unit: m)

(c) Demarini softball bat  
(natural frequency = 1393 Hz, maximum amplitude = 18.3 cm)

4 回弹速度分析

通过 LS-DYNA 显示分析功能<sup>[15]</sup>,对垒球冲击三种复合材料垒球棒进行了数值模拟。为了考察垒球冲击速度的影响,垒球的初始速度分别设为 20 m/s、30 m/s、40 m/s 和 50 m/s。通过对比垒球冲击垒球棒后速度的变化,分析垒球棒的击球性能。不同初始速度下垒球的速度时程曲线如图 8 至图 11 所示,表 4 给出了冲击垒球棒后垒球稳定回弹速度的对比情况。

图 6 三种垒球棒一阶环向模态振型对比 (单位: m)  
Fig. 6 Comparison of the first hoop modal shapes  
among the three types of softball bats (unit: m)



(a) Louisville Slugger 垒球棒  
(固有频率 = 2113 Hz, 最大振幅 = 18.6 cm)

表 4 垒球稳定回弹速度对比

Table 4 Comparison of steady rebound velocities of softball

垒球棒类型	初始速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			
	20	30	40	50
Louisville Slugger	8.1	12.9	15.6	17.9
垒球回弹速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$				
Mizuno	8.8	14.8	19.6	24.7
Demarini	8.8	14.8	20.5	23.1

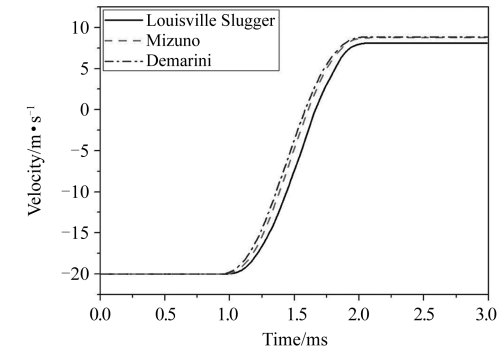


图 8 垒球速度时程曲线对比(初始速度=20 m/s)  
Fig. 8 Comparison of softball speed-time history curves (initial speed = 20 m/s)

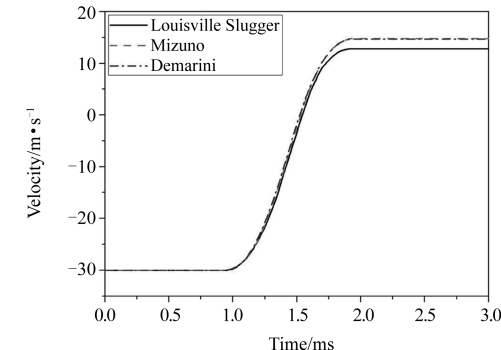


图 9 垒球速度时程曲线对比(初始速度=30 m/s)  
Fig. 9 Comparison of softball speed-time history curves (initial speed = 30 m/s)

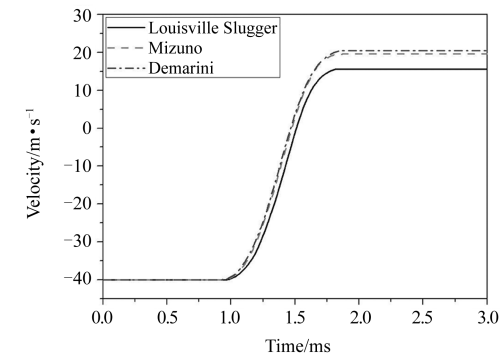


图 10 垒球速度时程曲线对比(初始速度=40 m/s)  
Fig. 10 Comparison of softball speed-time history curves (initial speed = 40 m/s)

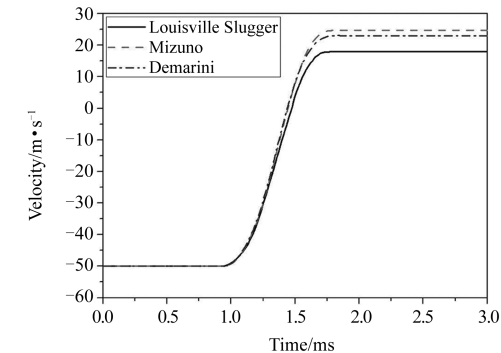


图 11 垒球速度时程曲线对比(初始速度=50 m/s)  
Fig. 11 Comparison of softball speed-time history curves (initial speed = 50 m/s)

结果表明:各初始速度下,垒球冲击 Louisville Slugger 垒球棒后的回弹速度均小于 Mizuno 垒球棒和 Demarini 垒球棒;垒球冲击 Mizuno 垒球棒和 Demarini 垒球棒后的回弹速度差别较小,当初始速度为 20 m/s 和 30 m/s 时,垒球冲击 Mizuno 垒球棒和 Demarini 垒球棒后的稳定回弹速度相同;当初始速度为 40 m/s 时,垒球冲击 Demarini 垒球棒后的稳定回弹速度稍大于 Mizuno 垒球棒;当初始速度为 50 m/s 时,垒球冲击 Mizuno 垒球棒后的稳定回弹速度稍大于 Demarini 垒球棒。综合垒球回弹速度分析可见,本文比较的三种垒球棒中,Mizuno 垒球棒和 Demarini 垒球棒的击球性能较接近,且均好于 Louisville Slugger 垒球棒。

5 结 论

本文通过数值模拟方法对三种复合材料垒球棒进行了模态分析和击球性能分析,主要得到以下结论:

- (1)本文提出的有限元模型与文献[6]的试验结果具有较好的一致性,验证了本文提出的有限元模型的可靠性;
- (2)Demarini 垒球棒的前两阶弯曲和环向模态振型幅值均较小,该类型垒球棒不易损坏,有利于其工作性能的发挥;
- (3)在各初始速度下,Mizuno 垒球棒和 Demarini 垒球棒的击球性能相当,且均好于 Louisville Slugger 垒球棒。

参考文献

[1] 杜善义. 先进复合材料与航天航空 [J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-14.

[2] Meltem A K, Hasan G. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials[J]. Defence Technology, 2018, 14: 318-326.

[3] Silberschmidt V V. Damage and fracture in composite materials and structures[M]. Woodhead Publishing, 2016.

[4] Daniel R. The sweet spot of a hollow baseball or softball bat[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 116(4): 2602.

[5] McDowell M. Assessment of softball bat safety performance using mid-compression polyurethane softballs[J]. Sports Biomechanics, 2004, 3(2): 185-194.

[6] Yee J, Sherwood J A, Fitzgerald S. Batted-ball performance of a composite softball bat as a function of ball type[J]. Procedia Engineering, 2014, 72: 465-470.

[7] Daniel R. Acoustics and vibration of baseball and softball bats[J].

Acoustics Today, 2017, 13(4): 35-42.

[ 8 ] LS-DYNA keyword user’s manual, Version 971[ M ]. Livermore, USA; Livermore Software Technology Corporation, 2006.

[ 9 ] Hallquist J. LS-DYNA theory manual[ M ]. Livermore, USA; Livermore Software Technology Corporation, 2006.

[ 10 ] Belytschko T, Lin J I, Tsay C S. Explicit algorithms for the nonlinear dynamics of shells[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1984, 42( 2 ): 225-251.

[ 11 ] Feraboli P, Wade B, Deleo F, et al. LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen[ J ]. Composites: Part A, 2011, 42: 1809-1825.

[ 12 ] Feraboli P, Deleo F, Wade B, et al. Predictive modeling of an energy-absorbing sandwich structural concept using the building block approach[ J ]. Composites: Part A, 2010, 41: 774-786.

[ 13 ] McCallum S. The influence of preload and boundary conditions on pre-damaged composite plates subject to soft-body impact[ J ]. Materials & Design, 2015, 83: 848-857.

[ 14 ] Diaconescu C, Tabacu S, Oltean A. Design and analysis of a fused deposition modelling manufactured part[ J ]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 252( 1 ): 1-8.

[ 15 ] Heimbs S, Cichosz J, Klaus M, et al. Sandwich structures with textile-reinforced composite foldcores under impact loads[ J ]. Composite Structures, 2010, 92: 1458-1497.

NUMERICAL ANALYSES ON MODAL SHAPE AND IMPACT  
PERFORMANCE OF COMPOSITE SOFTBALL BAT

XIE Xin<sup>1</sup>, MAO Jia-jia<sup>2</sup>, CHEN Ji-ye<sup>3\*</sup>

- ( 1. Department of Motion, Nanjing Sport Institute, Nanjing 210033, China;  
2. Department of Basic, Nanjing Jincheng College, Nanjing 210000, China;  
3. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** Compared with the traditional aluminium alloy softball bat and wooden softball bat, carbon fiber composite softball bat hare some major advantages, such as light in weight, high strength, high impact resistance, and high fatigue life. In this paper, ANSYS/LS-DYNA finite element software was used to establish a composite softball bat model. The experimental results<sup>[6]</sup> could be predicted by the proposed numerical model with sufficient accuracy. Moreover, the proposed numerical model was used to simulate three common composite softball bats on modal shapes and softball rebound velocities. The results demonstrated that Demarini softball bat has smaller bending modal shape and hoop modal shape, which resulted in good working performance, and such softball bat also has better batting performance.

**Key words:** softball bat; composite; modal shape; rebound velocity