

空投着陆气囊缓冲系统环境适应性研究

曲普¹, 史锐², 李锦红², 杨臻¹

(1. 中北大学, 太原 030051; 2. 航宇救生装备有限公司, 襄阳 441003)

摘要: **目的** 研究在空投着陆过程中, 气囊缓冲系统的缓冲特性和环境适应性, 分析空投着陆环境变化对气囊缓冲特性的影响。 **方法** 以热力学理论和刚体动力学为基础, 建立空投着陆气囊缓冲系统动力学模型, 以此为基础编写气囊缓冲特性计算分析软件; 针对某型主-辅囊结构气囊进行地面冲击试验, 对比验证了计算模型的正确性。 **结果** 空投着陆海拔高度为 0, 3000, 4500 m 时, 空投装备着地瞬间的着地速度分别为 0.52, 0.96, 2.31 m/s, 随着海拔升高, 空投装备着地速度明显增大。环境温度、大气密度和大气压力等参数对气囊缓冲特性的影响比较显著。 **结论** 气囊缓冲系统的缓冲特性满足设计要求, 可适应海拔较高的空投环境。同一气囊系统在较高海拔环境中使用应充分评估其适用性和安全性, 避免空投装备着地速度较大而造成装备损坏。

关键词: 空投着陆; 气囊缓冲; 缓冲特性; 环境适应性

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)13-0064-05

Cushioning Property and Environmental Adaptability of Airbag Landing System

QU Pu¹, SHI Rui², LI Jin-hong², YANG Zhen¹

(1. North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. AVIC Aerospace Life-support Industries, Ltd., Xiangyang 441003, China)

ABSTRACT: This paper studied the cushioning property and the environmental adaptability of the airbag landing system in the process of landing. Based on rigid dynamic equations and thermal dynamic equations, the analytical model of airbag landing system was developed. The calculation software of the cushioning property of airbag was compiled based on the model. Experimental research was carried on the cushioning property of airbag. The validity of the analytical model was verified through comparing with experimental data. The research results indicated that three key factors had significant influence on the cushioning property of the airbag landing system, including atmospheric pressure, air density, and ambient temperature. When the altitude was 0, 3000 and 4500 m, accordingly, the landing speed was 0.52, 0.96 and 2.31 m/s respectively. In conclusion, the cushioning property of the airbag landing system can meet the design requirements and can adapt to the air-drop environment in high altitude. As the landing speed of the air-drop equipment significantly increases along with the increase of altitude, the applicability and safety must be evaluated to ensure the safety of the airbag landing system of the airdrop equipment to avoid damage to the equipment due to high landing speed.

KEY WORDS: airborne landing; airbag cushion; cushioning property; environmental adaptability

缓冲气囊具有可折叠、质量轻、缓冲性能优良且经济等优点, 这使气囊缓冲成为空投空降和航空航天回收领域广泛使用的吸能方式之一。气囊缓冲系统

已成为软着陆技术领域的一个热点研究内容。国外针对气囊缓冲的研究开始较早, 气囊缓冲系统的结构形式和应用领域也比较广^[1-6]。国内对气囊缓冲过程

收稿日期: 2014-10-23

基金项目: 航空科学基金(20132910001); 中北大学科学基金

作者简介: 曲普(1979—), 男, 河南南阳人, 博士, 中北大学讲师, 主要研究方向为高射速发射理论与技术。

的研究虽然起步较晚,但近年来也有了长足发展,研究方法主要有理论分析计算、数值模拟和实验研究。陈帅等^[7]采用理论分析计算的方法,对软着陆气囊缓冲特性与参数设置的理论进行了研究,给出了固定排气口型气囊和可控排气口型气囊相关参数的设计方法;温金鹏等^[8]采用数值模拟的方法,研究了考虑织布弹性的软着陆气囊缓冲特性,得到了织布弹性对缓冲性能的影响规律;戈嗣诚和张元明等对气囊缓冲在无人机回收领域的应用展开了研究^[9-10];齐明思和杨卫等采用有限元方法,研究了冲压式快速空投硬式气囊缓冲技术^[11-12];尹汉锋等^[13]对缓冲气囊的仿真和优化设计展开了研究。这里,从分析气囊缓冲的机理出发,以空投装备和气囊为研究对象,运用刚体动力学和热力学基本原理,建立气囊缓冲特性计算分析模型;通过对气囊缓冲过程进行冲击试验研究,验证了理论计算模型的有效性,开发了气囊缓冲特性计算分析软件;对气囊缓冲的环境适应性展开研究,得到了空投环境变化带来的大气压力、大气密度和温度对气囊缓冲性能的影响规律。

1 气囊缓冲特性计算模型

1.1 气囊缓冲机理及基本假设

气囊缓冲的机理是通过气囊内部气体压缩吸收空投装备的冲击能量,压缩气体经排气口排出释放能量,从而达到减小冲击过载,消耗系统的动能,保护空投装备的目的^[14]。

为便于理论分析和计算,对气囊工作过程作如下假设:气囊为柔性,但织物无弹性、不漏气;只考虑由囊内外压差对空投装备下降产生的阻力,不考虑摩擦力、气囊变形阻力和降落伞吊带弹性力吸收能量;整个缓冲过程总的持续时间相对较短,可假设为绝热等熵过程;空投系统垂直下落,不受侧风影响,着陆点地面水平。

1.2 气囊工作过程基本方程

气囊缓冲系统为多个气囊的组合,现只取其中1个气囊作为研究对象。某型气囊缓冲系统的单个气囊为主-辅囊结构,主囊与辅囊之间有通气口相通,辅囊上有排气口,排气口由尼龙搭扣粘合封闭。在缓冲过程中,空投装备只与主气囊上表面接触,辅气囊只对压缩空气起延缓放气作用,并不直接对空投装备产生作用力。

气囊物理模型见图1。根据结构特点,其缓冲过程可划分为几个阶段:气囊缓冲系统底部着地后,主囊被压缩,辅囊排气口处于封闭状态,主囊向辅囊充气;辅囊排气口处于封闭状态,主、辅气囊内压继续上升;当气囊内压强上升到可克服尼龙搭扣粘合力时,辅囊排气口开启排气卸压,直至空投装备着地。

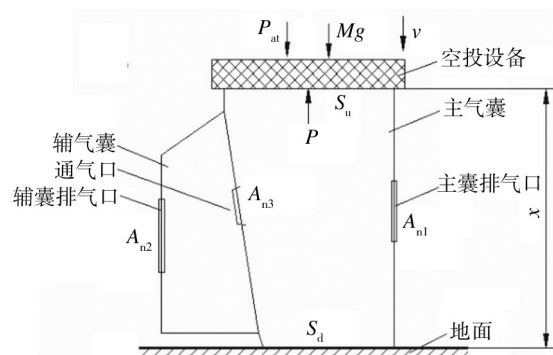


图1 双气室气囊简化模型

Fig.1 Sketch of double-chamber airbag model

1.2.1 辅囊充气阶段

主囊被压缩使其内压大于辅囊内压,从而使主气囊中的气体通过主、辅囊之间的通气口进入辅气囊,对辅气囊充气,当主、辅囊内气体压强相等时($p_u = p_d$),认为辅囊充满。主囊内气体通过通气口流入辅囊的气体流量为:

$$q_{m1} = KA_{n3}p_0 \sqrt{\frac{2k}{RT(k-1)} \left(\frac{p_0}{p_d}\right)^{\frac{k-1}{k}} \left[\left(\frac{p_u}{p_d}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]} \quad (1)$$

式中: q_{m1} 为主囊内气体通过通气口流入辅囊的气体流量; K 为流量系数; A_{n3} 为主气囊和辅气囊之间通气口的面积; p_0 为气囊初始压强; k 为气体绝热指数; R 为气体常数; T 为气体温度; p_u, p_d 分别为某时刻主、辅气囊内气体的压强。

由于过程很短暂,认为辅囊内气体状态变化为等熵过程,则有:

$$\frac{p_d}{p_0} = \left(\frac{\rho_d}{\rho_0}\right)^k = \left(\frac{m_d}{V_d \rho_0}\right)^k = \lambda_t^k \quad (2)$$

式中: ρ_d 为 t 时刻辅囊内气体的密度; p_0 和 ρ_0 分别为辅囊内气体压强和密度的初始值; m_d 为 t 时刻辅囊内气体质量; V_d 为 t 时刻辅囊容积; λ 为密度比。

1.2.2 辅囊内压上升阶段

辅囊充满后,继续被压缩,在内压较低时,辅囊上的排气口被尼龙搭扣封闭,相当于一个闭口热力系统,辅囊内压表达式为:

$$p_t = p_1 \left(\frac{\rho_t}{\rho_1} \right)^k = p_1 \left(\frac{V_{z1} + V_{z1}}{V_{z1} + V_{t1}} \right)^k \quad (3)$$

式中: p_1, ρ_1 分别为辅囊刚充满时刻囊内气体的压强和密度; p_t, ρ_t 分别为 t 时刻囊内气体的压强和密度; V_{z1} 和 V_{t1} 分别为辅囊刚充满时刻主气囊和辅气囊的容积; V_{zt} 和 V_{tt} 为 t 时刻主、辅气囊的容积。

1.2.3 辅囊排气卸压阶段

当气囊内压升高到一定值时,辅囊排气口打开,排气口面积为 A_{n2} ,若主囊上有排气口,则总的排气口面积 A_n 为主辅囊排气口面积之和,即 $A_n = A_{n1} + A_{n2}$ 。将气囊整个计算过程离散为多个足够小的时间 Δt ,各参数之间的递推关系为:

$$\begin{cases} x_t = x_{t-1} - \Delta x, x_0 = D \\ V_t = v_{t-1} - \Delta v \\ q_{mt} = KA_n \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_t \rho_t \left[\left(\frac{p_{at}}{p_t} \right)^{\frac{1}{k}} - \left(\frac{p_{at}}{p_t} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \\ m_t = m_{t-1} - q_{mt} \\ p_t = p_0 \lambda_{t-1}^k, \lambda_0 = 1 \\ a_t = g \left[\frac{\varepsilon_t}{\beta} \left(\frac{p_0}{p_{at}} \lambda^k - 1 \right) - 1 \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中: m_t 为某时刻气囊内气体质量; x_t, v_t, a_t 分别为空投装备某时刻的位移、速度和加速度; $\varepsilon = \frac{S_d D}{V_{z0}}$,

$\beta = \frac{MgD}{V_{z0} p_{z0}}$, M 为空投装备质量, D 为气囊初始高度, p_{z0}, V_{z0} 分别为主气囊初始压强和初始容积。

1.3 计算分析软件

根据所建立的各阶段计算模型,采用 C-sharp 语言开发了气囊缓冲性能计算分析软件。计算界面见图 2,界面上方有菜单和工具按钮,左侧为计算结果数据显示窗口,右侧为绘制曲线窗口。

2 计算模型试验验证

为验证计算模型的正确性,对气囊缓冲系统进行系列冲击试验。气囊缓冲冲击试验高速摄影图像见图 3,由于高海拔条件空投冲击试验条件限制,选择在低海拔地区进行地面冲击试验。试验气囊主囊初始高度为 1.24 m,空投质量为 7600 kg,着陆速度为 8 m/s。

试验数据与计算结果曲线对比见图 4。经对比可知,计算结果中空投装备过载、下落速度、位移及囊内

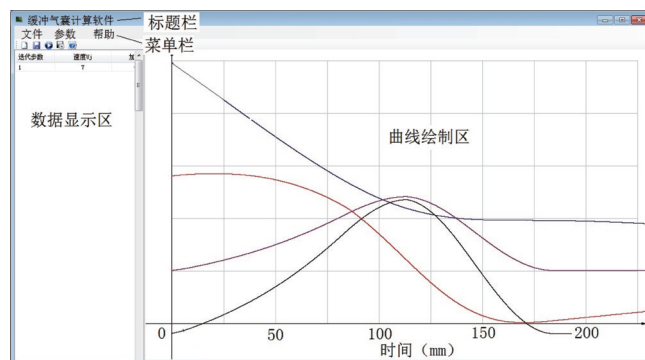


图2 软件主界面

Fig.2 The main interface of calculation software

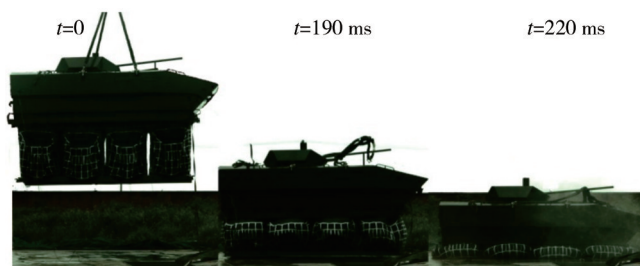


图3 缓冲气囊冲击试验高速摄影图

Fig.3 High-speed photography of impact test

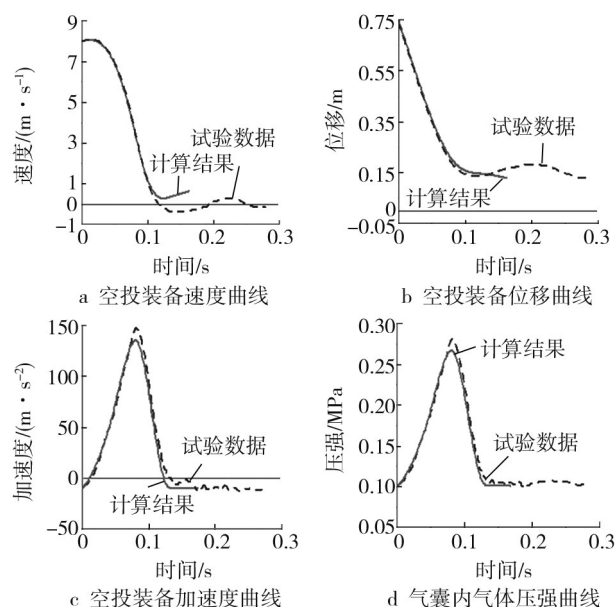


图4 计算结果与试验数据对比

Fig.4 Comparison of analytical results and test results

气体压强等参数与试验数据吻合情况较好,验证了计算模型的正确性。

3 缓冲气囊环境适应性分析

实战中空投可能面临多种多样的环境,因此空投环境因素对气囊缓冲性能的影响也必须考虑。这里着重研究海拔高度的影响。对自落充气缓冲气囊而言,气囊初始参数与大气参数相同。海拔高度变化引起大气压强、大气密度和大气温度的变化等同于气囊初始条件发生改变。计算以某型主-辅结构自落充气气囊为例,主囊初始高度为1.24 m,空投质量为7600 kg,着陆速度为8 m/s。环境参数见表1。

表1 不同海拔高度大气参数
Tab.1 Parameters of atmosphere at different altitudes

海拔高度/km	大气压强/Pa	密度/(kg·m ⁻³)	温度/K
0	101 325	1.29	273
3	71 480	0.91	268.5
4.5	58 852	0.78	258.8

通过计算得到不同海拔高度气囊缓冲特性曲线,见图5。由图5可知,空投装备以8 m/s的稳降速度着陆,在着陆过程中气囊缓冲系统吸收了大量冲击能量,空投装备以很小的速度着地,使装备得到保护。在缓冲过程中,由于气囊内压的升高,气囊对装备的反向作用力使空投装备产生了反向加速度,由计算结果可知,在缓冲过程中,装备承受的过载峰值均小于200 m/s²,在允许的过载范围内。

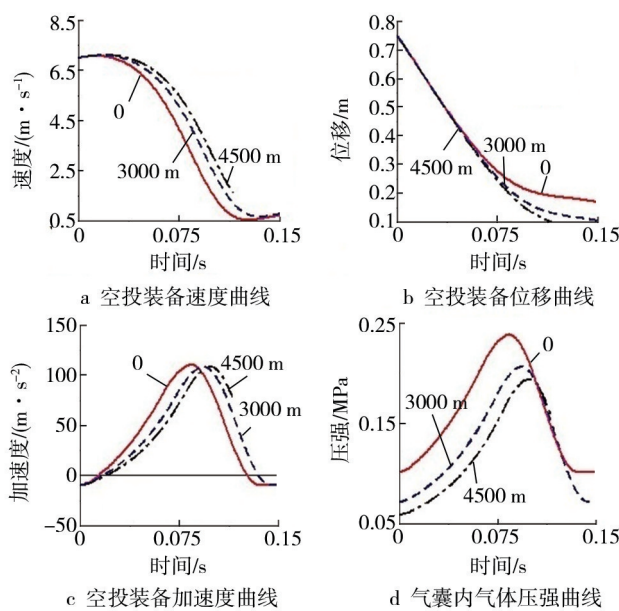


图5 不同海拔高度气囊缓冲特性曲线
Fig.5 Curves of cushioning property at different altitudes

不同海拔高度下空投着陆气囊缓冲系统的缓冲特性计算结果表明,海拔高度为0,3,4,5 km时,着地速度分别为0.52,0.96,2.31 m/s;过载峰值分别为122.7,115.3,112.8 m/s²;内压峰值为0.24,0.21,0.19 MPa。由此,海拔高度增加带来的大气温度、大气密度和大气压强变化对气囊缓冲系统缓冲特性的影响明显。就着地速度而言,随着海拔高度的增加,空投装备着地速度增加较为显著。根据自落式气囊的特点,气囊是在下落过程中充满空气,气囊初始内压与大气压相等,故随着海拔高度的增加,气囊初始内压和缓冲过程中各时刻的气囊内压均降低。由于排气口采用尼龙粘扣,排气口打开的时刻只与气囊内外压差有关,故海拔增加对空投装备过载峰值影响不大,但过载峰值出现的时间较晚。

4 结语

应用运动学方程、热力学方程和理想气体方程,建立了组合式气囊的缓冲动力学模型,编制了气囊缓冲性能计算分析软件。结合空投冲击试验数据,验证了计算模型的正确性。通过计算分析,得到了气囊缓冲系统特性曲线和空投环境因素对气囊缓冲特性的影响规律。结果表明,在气囊缓冲系统的缓冲作用下,空投装备着地速度均小于3 m/s,空投装备过载峰值均小于200 m/s²,说明缓冲系统缓冲特性满足设计要求,可适应海拔较高的空投环境。通过对比不同海拔高度气囊缓冲系统的缓冲性能计算结果可知,空投环境条件的变化,带来了大气压、温度等参数的变化,这些因素对气囊缓冲性能影响显著。在气囊设计过程中应考虑其环境适应性,以满足实战中不同着陆环境空投的需要。同一气囊在较高海拔环境中使用,要充分评估其适用性和安全性,避免空投装备着地速度较大而造成装备损坏。

参考文献:
[1] ESGAR J B, MORGAN W C. Analytical Study of Soft Landings on Gas-Filled Bags[R]. Technical Report R-75, Lewis Research Center Cleveland, Ohio, 1960 .
[2] WELCH J V. CEV Airbag Landing System Modeling[C]// 19th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar. Williamsburg, VA, 2007, AIAA 2007-2533:1—9.
[3] MARKLUND P O, NILSSON L. Simulation of Airbag Inflation Processes Using a Coupled Fluid Structure Approach[J]. Computational Mechanics ,2002,29(4-5):289—297.

- [4] ADAMS D S. Mars Exploration Rover Airbag Landing Loads Testing and Analysis[C]// Collection of Technical Papers – AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Material, 2004.
- [5] MCKINNEY J, TAYLOR T. Use of LSDYNA to Simulate the Airbag Landing Impact Attenuation of the Kistler K1 Reusable Launch Vehicle[C]// 5th International LS-DYNA User's Conference, Livermore, CA, 1998.
- [6] STEIN J, SANDY C. Recent Developments in Inflatable Airbag Impact Attenuation Systems for Mars Exploration[C]// 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Norfolk, Virginia, 2003, AIAA 2003-1900:1—6.
- [7] 陈帅, 李斌等, 温金鹏, 等. 软着陆气囊缓冲特性与参数设置的理论研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(4):25—28.
CHEN Shuai, LI Bin, WEN Jin-peng et al. Cushioning Characteristic and Parameter Design of a Soft Landing Airbag [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(4):25—28.
- [8] 温金鹏, 李斌, 谭德伟, 等. 考虑织布弹性的软着陆气囊缓冲特性研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2):79—83.
WEN Jin-peng, LI Bin, TAN De-wei, et al. Cushioning Characteristics of a Soft Landing Airbag with Elastic Fabric[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(2):79—83.
- [9] 戈嗣诚, 施允涛. 无人机回收气囊缓冲特性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(4):458—463.
GE Si-cheng, SHI Yun-tao. Study on Cushioning Characteristics of Air Bag for RPV Recovery[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1999, 31(4):458—463.
- [10] 张元明. 无人机回收减震气囊的理论研究[J]. 液压与气动, 2005(2):28—31.
ZHANG Yuan-ming. Study of Air Bag Impact Attenuation System for UAV[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2005 (2):28—31.
- [11] 齐明思, 刘守君, 赵奇, 等. 缓冲气囊着陆过程仿真研究[J]. 包装工程, 2013, 34(23):5—8.
QI Ming-si, LIU Shou-jun, ZHAO Qi, et al. Simulation Research on Landing Process of Cushion Airbag[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23):5—8.
- [12] 杨卫, 齐明思, 张皎. 冲压式快速空投硬式气囊缓冲技术研究[J]. 包装工程, 2010, 31(5):106—108.
YANG Wei, QI Ming-si, ZHANG Jiao. Research on Punched Quick Airdrop Cushion[J]. Packaging Engineering, 2010, 31 (5):106—108.
- [13] 尹汉锋, 文桂林, 韩旭. 空投设备缓冲气囊的优化设计[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(5):1325—1327.
YIN Han-feng, WEN Gui-lin, HAN Xu. Optimal Design of Airbag Impact Attenuation System for Airdropping Equipment [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(5):1325—1327.
- [14] 牛四波, 王红岩, 迟宝山, 等. 重装回收系统双气室气囊缓冲特性分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(10):74—78.
NIU Si-bo, WANG Hong-yan, CHI Bao-shan, et al. Cushioning Characteristics of Double-chamber Airbag for Heavy Equipment Recovery System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(10):74—78.
- [15] 王亚伟, 杨春信, 柯鹏. 货台空投系统气囊缓冲过程仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 28(4):3176—3179.
WANG Ya-wei, YANG Chun-xin, KE Peng. Airbag Cushion Process Simulation for Cargo Airdrop System[J]. Journal of System Simulation, 2007, 28(4):3176—3179.

(上接第 63 页)

- oxy Systems Based on Ionic Liquid[J]. Polymer, 2013, 54: 2123—2129.
- [11] 齐会民, 王春兰, 高金森. RTM用含硅芳炔树脂的流变特性与固化反应动力学[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009, 32(6): 62—66.
QI Hui-min, WANG Chun-lan, GAO Jin-miao. Rheological Properties and Curing Kinetics of RTM Resin Containing Silicon Aralkynyl[J]. FRP/Composites, 2009, 32(6):62—66.
- [12] DOM NGUEZ J C, ALONSO M V, OLIVET M, et al. Chemorheological Analysis of a Gelled Resol Resin Curing Under Non-isothermal Conditions by Shear Strain[J]. European Polymer Journal, 2010, 46: 1237—1243.
- [13] JUNG O P, YOON B J, SRINIVASARAO M. Effect of Chemical Structure on the Crosslinking Behavior of Bismaleimides: Rheological Study[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2011, 166:925—931.
- [14] ERNEST E S, ABDULLAH M Z, LOH W K, et al. FSI Implications of EMC Rheological Properties to 3D IC with TSV Structures during Plastic Encapsulation Process[J]. Microelectronics Reliability, 2013, 51:600—611.
- [15] NGUYEN H V, ANDREASSEN E, KRISTIANSEN H, et al. Rheological Characterization of a Novel Isotropic Conductive Adhesive-epoxy Filled with Metal-coated Polymer Spheres [J]. Materials and Design, 2013, 46: 784—793.
- [16] GARSCHKE C, PARLEVLIET P P, WEIMER C, et al. Cure Kinetics and Viscosity Modelling of a High-performance Epoxy Resin[J]. Polymer Testing, 2013, 32: 150—157.
- [17] 冉起超, 高念, 李培源, 等. 一种 RTM用苯并噁嗪树脂的工艺性及其复合材料性能[J]. 复合材料学报, 2011, 28(1): 15—20.
RAN Qi-chao, GAO Nian, LI Pei-yuan, et al. Manufacturability and Composites Performance of One Kind of Benzoxazine Resin Used in RTM[J]. Composite Materials, 2011, 28 (1):15—20.