

doi: 10.3969/j.issn.1674-0696.2013.04.35

基于碰撞性能的转向柱结构优化设计

宋晓华

(重庆交通大学 机电与汽车工程学院,重庆 400074)

摘要:在汽车正面碰撞过程中,驾驶员容易受到转向柱的伤害,具有良好碰撞性能的转向柱对保护驾驶员的安全极其重要。针对这个问题,以微型轿车转向柱为研究对象,根据显式动力学有限元理论,建立转向柱碰撞有限元模型,运用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA,基于碰撞性能,对转向柱的结构进行优化设计,并对不同结构的转向柱在碰撞过程中的变形形态、运动位移、速度以及吸能量进行对比分析。结果显示:截面形状为圆形的转向柱在碰撞过程中的变形形态、运动位移、速度和吸能量等方面的碰撞性能均优于截面形状为正方形和六边形的转向柱,且适当增加管柱壁厚有利于改善转向柱的碰撞性能。仿真结果表明,提出的数值模拟方法为转向柱的优化设计和碰撞性能的改善提供了一条新的途径。

关键词:转向柱;优化设计;显式动力学;有限元分析;碰撞性能

中图分类号:U467.1⁺3

文献标志码:A

文章编号:1674-0696(2013)04-0696-05

Structural Optimization Design of Vehicle Steering Column Based on Its Crashworthiness

Song Xiaohua

(School of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The drivers are always hurt by vehicle steering column in a frontal collision easily, so the steering column with well energy-absorbing is very useful for the drivers. To solve this problem, the crashworthiness of the vehicle steering column is studied according to the explicit dynamics finite element analysis method and the finite element software named ANSYS/LS-DYNA is used. The finite element model of steering column is proposed. The steering column with different cross sectional shape and thickness is investigated. The deformation pattern, displacement, velocity and energy absorption are analyzed. The results show that the crashworthiness including deformation pattern, displacement, and velocity as well as energy absorption of the vehicle steering column with circular section are better than square and hexagonal section. In addition, the increase of the thickness of the column helps to improve its crashworthiness. It also shows that the proposed method provides a new approach for improving its optimization design and crashworthiness.

Key words: steering column; optimization design; explicit dynamics; finite element analysis; crashworthiness

具有良好碰撞性能的转向柱作为汽车正面碰撞事故中容易导致驾驶员受伤的主要部件之一^[1],在发生正面碰撞事故时可以有效的减轻或防止驾驶员受到伤害。尤其是在当前汽车工业发展越来越重视汽车安全性能的情况下,转向柱碰撞性能得到广泛的关注。如何通过改善转向柱结构和材料性能来提高汽车安全性能,具有重要的现实意义^[2]。当前许多学者已经对汽车转向柱碰撞性能进行了大量研究^[1-9],然而大多数研究仅仅只针对转向柱新型吸能结构进行研究,其设计结构复杂、成本高,在实际中很难得到应用。因此,很有必要对传统转向柱结构

进行优化设计,从而达到提高其碰撞性能和保护驾驶员的目的。

笔者以微型轿车转向柱为研究对象,建立转向柱碰撞有限元模型,根据显式动力学有限元理论,运用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA^[10],基于碰撞性能,对转向柱的结构进行优化设计(包括截面形状和管柱壁厚),并对转向柱碰撞过程中的变形形态、运动位移、速度以及吸能量进行对比分析。研究结果表明提出的数值模拟方法为转向柱结构优化设计和碰撞性能的改善提供了一条新的途径。

收稿日期:2012-10-10;修订日期:2013-05-08

作者简介:宋晓华(1983—)女,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要从事汽车电子和数值模拟方面的研究。E-mail: sxh831018@163.com。

1 汽车转向柱的有限元模型

利用三维建模软件 UG 建立刚性墙、转向盘和转向柱的三维几何模型,然后利用 IGS 图像数据交换格式将几何模型导入前处理有限元软件 ANSA 中进行网格划分。为保证有限元计算结果的精度,网格单元以四边形壳单元为主,在形状过渡位置采用三角形壳单元,且严格控制三角形单元的数量。其中,正方形、六边形和圆形截面的转向柱有限元模型中三角形单元占单元总数分别为 1.1%、1.2%、2.1% (满足通用有限元网格划分要求)。另外,严格控制所有单元的网格质量,包括长宽比、雅可比、锥度、翘曲度、单元内角、倾斜度。为提高计算效率和保证计算精度,转向盘和刚性墙都采用 10 mm 网格,作为分析的关键部件,转向柱采用 2 mm 单元尺寸进行网格划分。整体转向柱的碰撞有限元模型如图 1。对于正方形截面模型,共 17 771 个单元,17 783 个节点;对于六边形截面模型,共 17 774 个单元,17 789 个节点;对于圆形截面模型,共 16 588 个单元,16 520 个节点。为使转向管柱的截面面积相等,定义正方形、六边形和圆形截面的边长分别为 37.22、23.1 和 21 mm。

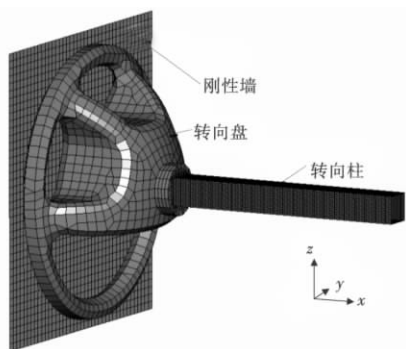


图 1 转向柱碰撞有限元模型

Fig. 1 Finite element model of steering column

2 材料的性能参数

材料采用目前汽车车身最常采用的低碳钢^[11],其密度为 7.8 g/cm^3 ,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,屈服点为 170 MPa。

3 边界条件确定

根据方向盘的碰撞性能要求,定义刚性墙质量为 36 kg,初始速度为 25 km/h^[4]。约束刚性墙 y 和 z 两个方向的所有自由度以及转向柱底部端面节点的所有自由度(即 x, y, z 方向的所有平动和转动自由度)。

4 数值模拟及分析

四边形、六边形和圆形截面的转向柱在碰撞过程中变形形态分别如图 2~图 4。

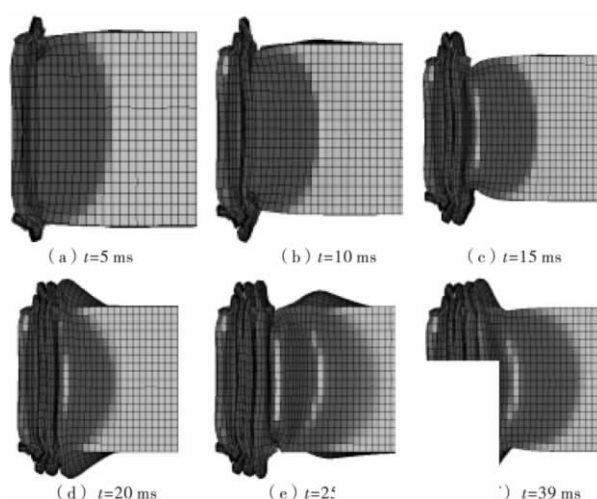


图 2 四边形截面的转向柱碰撞过程的变形

Fig. 2 Collision deformation of steering column with square cross section

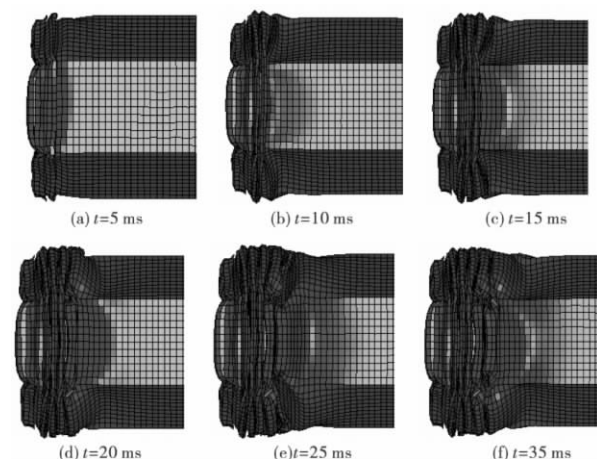


图 3 六边形截面的转向柱碰撞过程的变形

Fig. 3 Collision deformation of steering column with hexagonal cross section

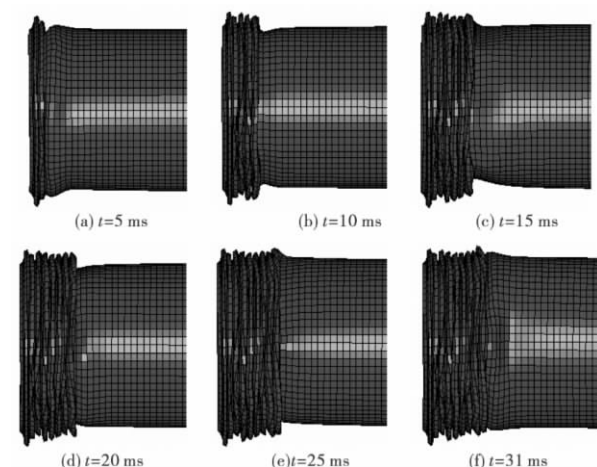


图 4 圆形截面的转向柱碰撞过程的变形

Fig. 4 Collision deformation of steering column with circular cross section

从图2~图4可以看出,圆形截面转向柱的屈曲形态优于四边形和六边形截面转向柱,而六边形截面转向柱的屈曲形态优于四边形截面的转向柱。仿真结果表明,对转向柱的截面进行优化有利于其碰

撞性能的提高。

为进一步深入研究截面形状优化对转向柱碰撞性能的影响,对转向柱的运动位移、速度以及吸能量进行了对比分析(图5)。

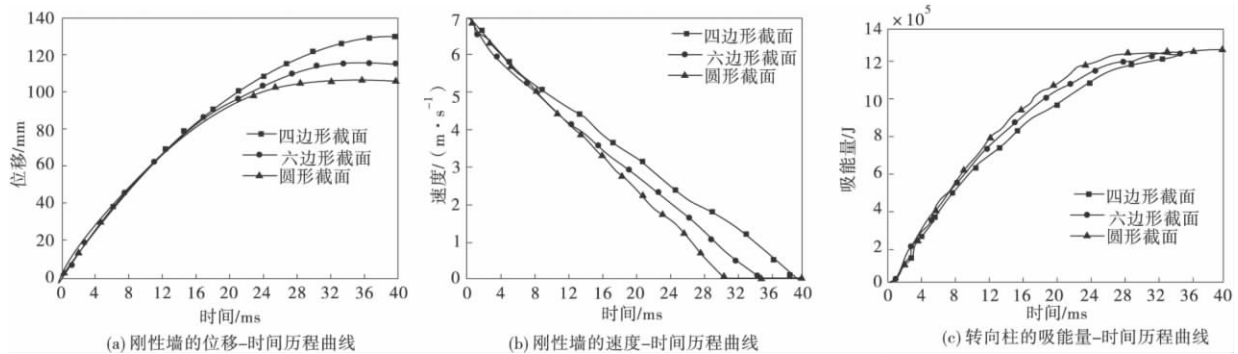


图5 截面形状对转向柱碰撞性能的影响(壁厚 $L = 1.2$ mm)

Fig. 5 Effect of the shape of the column section on crashworthiness (thickness $L = 1.2$ mm)

图5(a)显示了截面形状优化对转向柱在碰撞过程中的运动位移的影响。从图5(a)可以看出,在11 ms之前3种不同截面形状转向柱对应的刚性墙的位移变化基本一致。但在11 ms之后,它们之间的差异逐渐增大,其中四边形截面的位移量变化最大,六边形截面次之,圆形截面最小。在转向柱碰撞完成之后,四边形截面转向柱对应的刚性墙的位移量最大,六边形截面的位移量次之,圆形截面的位移量最小。结果表明,圆形截面转向柱在相同碰撞速度下,变形最小。说明圆形截面转向柱的碰撞性能优于四边形和六边形截面。

截面形状优化对转向柱在碰撞过程中的运动速度的影响如图5(b)。从图5(b)可以看出,四边形

截面转向柱完成碰撞所需时间最长,六边形截面次之,圆形截面最短。在碰撞过程中,四边形截面速度波动较大,圆形截面次之,六边形截面波动相对较小。

图5(c)为截面形状优化对转向柱在碰撞过程中的吸能量的影响。从图5(c)可以看出,在7 ms之前3种不同截面形状的转向柱的吸能量相差较小。但是,在7 ms之后,它们之间的差异逐渐增大,其中,圆形截面转向柱在碰撞过程中的吸能量大于其他两种截面形状,而四边形截面的吸能量最小。

图6为壁厚优化对圆形截面转向柱在碰撞过程中运动位移、速度和吸能量的影响。

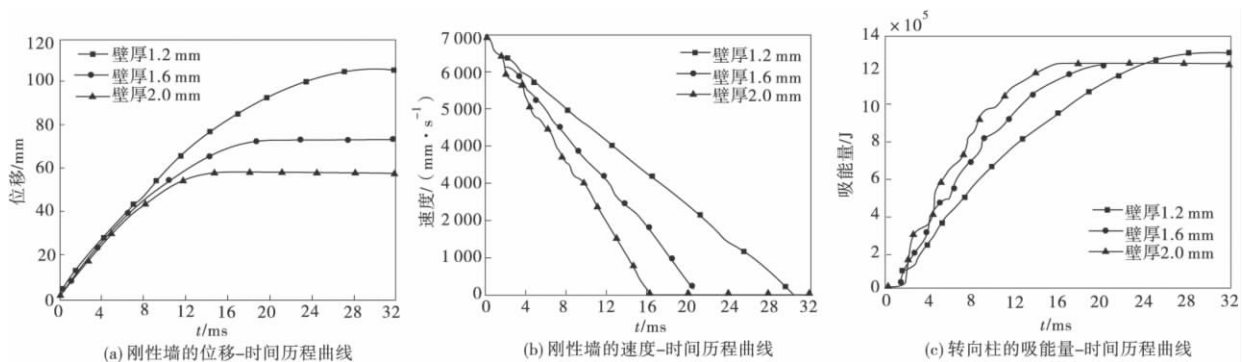


图6 壁厚对转向柱碰撞性能的影响(圆形截面)

Fig. 6 Effect of thickness of column section on crashworthiness (circular section)

由图6可见,壁厚为2.0 mm的转向柱的运动位移最小,碰撞时间最短。虽然1.2 mm壁厚的转向柱的吸能量略大于2.0 mm和1.6 mm,但是其变形量和碰撞时间的值较大。结果显示,壁厚为2.0 mm的转向柱的碰撞性能较好。

图7和图8分别为1.6 mm和2.0 mm壁厚时

截面形状对转向柱碰撞性能的影响。通过对转向柱碰撞过程的运动位移、碰撞速度以及吸能量等因素的综合进行对比,结果显示,在2.0 mm壁厚时,虽然六边形截面的转向柱碰撞时间完成最短,但其吸能量较小。而四边形截面的转向柱的碰撞时间较长。因此,在1.6 mm和2.0 mm壁厚的情况下,圆

形截面转向柱的碰撞效果仍然较好。

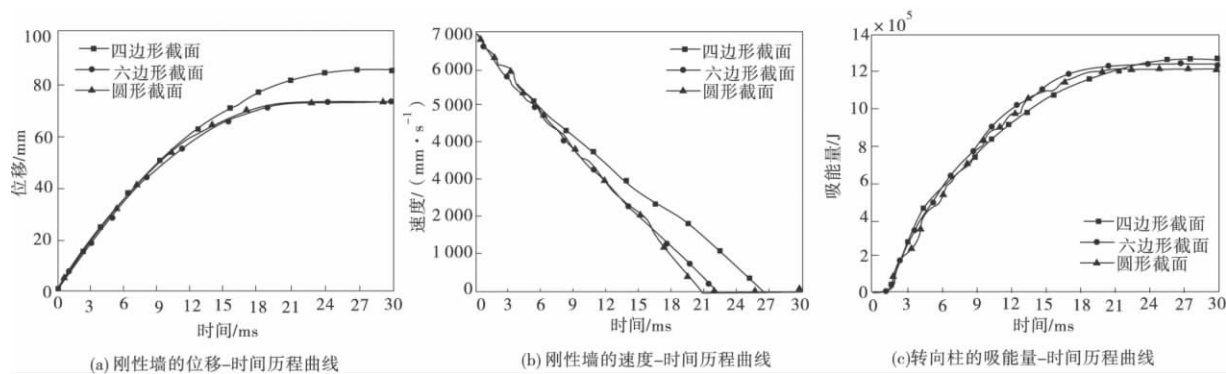


图 7 截面形状对转向柱碰撞性能的影响(壁厚 $L = 1.6 \text{ mm}$)

Fig. 7 Effect of the shape of column section on crashworthiness (thickness $L = 1.6 \text{ mm}$)

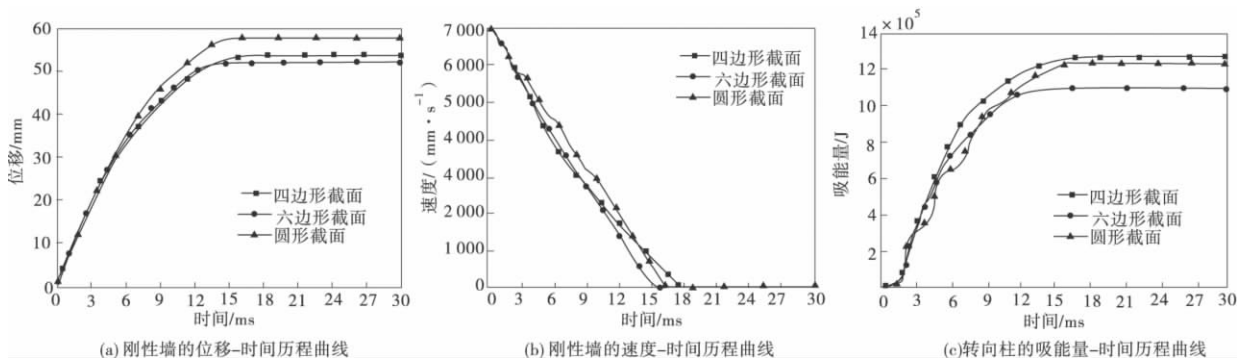


图 8 截面形状对转向柱碰撞性能的影响(壁厚 $L = 2 \text{ mm}$)

Fig. 8 Effect of the shape of column section on crashworthiness (thickness $L = 2 \text{ mm}$)

5 结 论

通过建立转向柱碰撞有限元模型,采用显式动力学有限元方法,并应用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 研究了截面形状和壁厚优化对转向柱碰撞性能的影响,得到如下结论:

- 1) 与四边形和六边形截面的转向柱相比,圆形截面的转向柱能在较短时间内吸收更多能量,变形更小,碰撞性能最好。
- 2) 适当增加转向管柱的壁厚有利于其碰撞性能的提高。
- 3) 对于转向柱的碰撞性能问题,有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 是一种十分有效的工具。

参考文献 (References):

[1] 王登峰,曾迺立. 汽车吸能转向柱机构与驾驶员碰撞的仿真与试验[J]. 汽车工程, 2003, 25(1): 20-24.
Wang Dengfeng, Zeng Naoli. Simulation and experiment of frontal crash between automotive energy-absorbing steering assembly and driver [J]. Automotive Engineering, 2003, 25(1): 20-24.

[2] 张晓云,金先龙,葛龙,等. 面向国家标准的汽车转向机构安全性能仿真[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(2): 228-234.
Zhang Xiaoyun, Jin Xianlong, Ge Long, et al. National regulation oriented crashworthiness simulation of vehicle steering system [J].

Journal of System Simulation, 2003, 15(2): 228-234.

[3] 李志刚,张金换,马春生,等. 汽车转向机构安全性能仿真分析及试验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(5): 649-653.
Li Zhigang, Zhang Jinhuan, Ma Chunsheng, et al. Safety simulation and tests of automotive steering mechanism [J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science, 2010, 50(5): 649-653.

[4] 王宏雁,瞿喆文. 吸能式转向系统在正面碰撞中运动响应模拟[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2003, 31(12): 1454-1458.
Wang Hongyan, Qu Zhewen. Simulation of energy-absorbing steering system in frontal impact [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(12): 1454-1458.

[5] 张晓云,金先龙,李玉璇,等. 人体模块撞击汽车转向机构数值模拟与试验分析[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(2): 289-291.
Zhan Xiaoyun, Jin Xianlong, Li Yuxuan, et al. Numerical simulation and experimental analysis of human model crashing to the steering system of a car [J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(2): 289-291.

[6] 徐引龙. 吸能式转向系统对乘员保护的研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.
Xu Yinlong. The Research on the Protection to the Drivers of Energy-Absorbing Steering System [D]. Beijing: Tsinghua University, 2002.

[7] 宋晓华,李伟. 材料特性对转向柱碰撞性能影响的仿真研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2012, 31(4): 866-868.

- Song Xiaohua, Li Wei. Crashworthiness numerical simulation of vehicle steering mast [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Nature Science, 2012, 31(4): 866-868.
- [8] Song Xiaohua, Liu Jing. The effect of material parameters on crashworthiness of vehicle steering column [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 197: 3-6.
- [9] 钟志华. 汽车耐撞性分析的有限元法[J]. 汽车工程, 1994, 16(1): 1-6, 11.
- Zhong Zhihua. Finite element method in crashworthiness analysis of automobiles [J]. Automobile Engineering, 1994, 16(1): 1-6, 11.
- [10] Hallquist J O. LS-DYNA Theory Manual [M]. Livermore, U. S.: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [11] 朱平, 张宇, 葛龙, 等. 基于正面碰撞性仿真的轿车车身材料轻量化研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 207-211.
- Zhu Ping, Zhang Yu, Ge Long, et al. Research on lightweight of auto-body material based on crashworthiness simulation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 207-211.

(上接第613页)

1) Evotherm 温拌混合料现行设计方法不考虑材料特性及成型方式等因素对试验温度的内在影响, 在相同的材料组成及成型方式下, 其设计沥青用量会随着建议温度的不同而出现偏差, 必然存在风险。

2) Evotherm 温拌技术在混合料的拌和及成型过程中未改变沥青的黏度, 难以采用等黏温度来确定其混合料的适宜试验温度, 建议采用成型试件空隙率基本相等为判据, 综合确定其适宜的试验温度, 并通过设定空隙率偏差来确定其允许控制范围。

3) 两阶段设计法将 Evotherm 温拌混合料材料设计与对应的热拌混合料相联系, 既能保证设计沥青用量的合理性, 又能充分考虑沥青胶结料和混合料成型方式的差异性来确定施工控制温度, 能够有效避免现行设计方法存在的风险, 对于其他温拌技术具有普适意义。

参考文献(References):

- [1] 李德超. 温拌沥青混合料技术综述[J]. 石油沥青, 2008, 22(5): 1-5.
- Li Dechao. Review on research and application of warm mix technology [J]. Petroleum Asphalt, 2008, 22(5): 1-5.
- [2] 黄文元, 秦永春. 沥青温拌技术在国内外应用现状[J]. 上海公路, 2008(3): 1-4.
- Huang Wenyuan, Qin Yongchun. Review on application of warm mix asphalt technologies [J]. Shanghai Highways, 2008(3): 1-4.
- [3] 岳辉, 周亦唐, 梁恩茂. Evotherm 温拌沥青混合料技术在云南地区的应用研究[J]. 福建建材, 2010(2): 20-22.
- Yue Hui, Zhou Yitang, Liang Enmao. Application of the evotherm temperature asphalt mixture technology in Yunnan region [J]. Fujian Building Materials, 2010(2): 20-22.
- [4] 张镇, 刘黎萍, 汤文. Evotherm 温拌沥青混合料性能研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4): 438-441.
- Zhang Zhen, Liu Liping, Tang Wen. Research on performance of Evotherm warm-mix asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(4): 438-441.
- [5] 王飞, 李立寒. 温拌沥青混合料配合比设计中若干问题的试验探究[J]. 华东交通大学学报, 2010, 27(4): 22-25.
- Wang Fei, Li Lihan. Experimental research on some problems in mixture design of warm mix asphalt [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2010, 27(4): 22-25.
- [6] 刘至飞, 吴少鹏, 陈美祝, 等. 温拌沥青混合料现状及存在问题[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(4): 170-173.
- Liu Zhifei, Wu Shaopeng, Chen Meizhu, et al. Status and problems of warm mix asphalt [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(4): 170-173.
- [7] 吴超凡, 曾梦澜, 王茂文, 等. 添加 Sasobit 温拌沥青混合料的拌和和压实温度确定[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2010, 37(8): 1-5.
- Wu Chaofan, Zeng Menglan, Wang Maowen, et al. Determination of the mixing and compaction temperatures for warm mix asphalt with Sasobit [J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2010, 37(8): 1-5.
- [8] 张镇, 周和庆, 花付南, 等. Evotherm 温拌沥青混合料温度控制研究[J]. 上海公路, 2009(1): 51-54.
- Zhang Zhen, Zhou Heqing, Hua Funan, et al. The temperature control research of evotherm warm-mix asphalt [J]. Shanghai Highways, 2009(1): 51-54.
- [9] 郭平, 祁峰, 弥海晨. 温拌沥青混合料的路用性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(3): 10-13.
- Guo Ping, Qi Feng, Mi Haichen. Road performance of warm mix asphalt mixture [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science, 2010, 30(3): 10-13.
- [10] 李正中, 何兆益, 宋晓燕, 等. 基于 GTM 方法的橡胶沥青混合料性能试验[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2009, 28(4): 715-719.
- Li Zhengzhong, He Zhaoyi, Song Xiaoyan, et al. Experiment study on the performance of rubber-asphalt mixtures based on GTM design method [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2009, 28(4): 715-719.