

水泥混凝土路面加铺沥青混凝土应力吸收层力学响应分析

胡晓

上海城建城市运营(集团)有限公司, 上海 200135

[摘要]反射裂缝是目前旧水泥混凝土路面加铺沥青层结构的一种主要病害。文章采用有限元分析法, 分析了不同加铺层和薄沥青混凝土应力吸收层厚度对铺装层力学响应, 研究表明: 加铺层厚度的增加对改善加铺层内应力状态有一定的效果, 但是过厚加铺结构在经济上并不合适。薄沥青混凝土应力吸收层可以很好的改善加铺层内的应力状况, 合理厚度宜为 2-3cm。

[关键词]应力吸收层; 水泥混凝土路面; 反射裂缝; 力学响应; 三维有限元

DOI: 10.33142/sca.v3i5.2265

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

Mechanical Response Analysis of Asphalt Concrete Stress-absorbing Layer on Cement Concrete Pavement

HU Xiao

Shanghai Urban Operation (Group) Co., Ltd, Shanghai, 200135, China

Abstract: Reflection crack is one of the main diseases of asphalt overlay on old cement concrete pavement. In this paper, the finite element analysis method is used to analyze the mechanical response of different overlay and thin asphalt concrete stress absorbing layer thickness on pavement. The results show that the increase of overlay thickness has a certain effect on improving the internal stress state of overlay, but over thick overlay structure is not suitable economically. The stress absorption layer of thin asphalt concrete can improve the stress condition in the overlay, and the reasonable thickness should be 2-3cm.

Keyword: stress absorbing layer; cement concrete pavement; reflection crack; mechanical response; three dimensional finite element method

引言

旧水泥混凝土路面加铺沥青面层最常见的病害形式之一是反射裂缝, 国内外对于反射裂缝的防治已经采取了诸多的理论分析和现场试验研究^[1-3], 目前主要的措施是采用加筋类和应力消散类(例如玻璃纤维格栅、土工布、改性沥青油毡、粘结间断层以及稀浆封层)结构层对反射裂缝进行防治, 但是现有的研究都是针对或者说更有效于减小水平拉应力, 而对于抑制竖向的剪应力效果不佳。

作为一种新型工艺, 在旧水泥混凝土上加铺一层薄沥青混凝土应力吸收层被越来越多的工程实践采用, 但是该措施在实际应用中缺乏理论支撑, 尤其是应力吸收层厚度的选择缺乏依据。本文采用数值分析的方法, 分析不同加铺层和薄沥青混凝土应力吸收层厚度对铺装结构的应力响应, 以指导施工实践。

1 有限元模型的建立

1.1 路面结构模型

为了采用有限元分析方法对应力吸收层结构沥青路面的受力机理进行合理分析, 对材料特性以及模型的结构特性作以下假定^[4], 模型几何尺寸如图 1 所示:

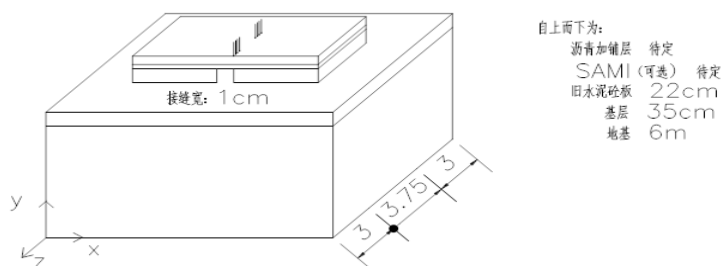


图 1 路面结构模型

- (1) 假定各结构层由均质、各向同性的弹性材料组成，材料的力学性能服从虎克定律；
- (2) 假定层间完全连续，且不计路面结构自重的影响；
- (3) 板间接缝宽度为 1cm，旧水泥混凝土路面在接缝处无传荷能力。

1.2 轮胎接地形状及接地压力分布

同济大学胡小弟^[6]对不同花纹不同胎压轴载的轮胎接地压力进行了实测，本文选用重型车辆常用的 11.00-20 型走向花纹轮胎接地压力用于路面结构的力学分析，在分析中选用了 600kPa/25kN（标准轴载）（胎压 kPa/负荷 kN）进行计算分析，荷载分布图示如图 2，各种工况荷载如表 1 和 2，此处仅列出 600kPa/25kN 处的详细参数。

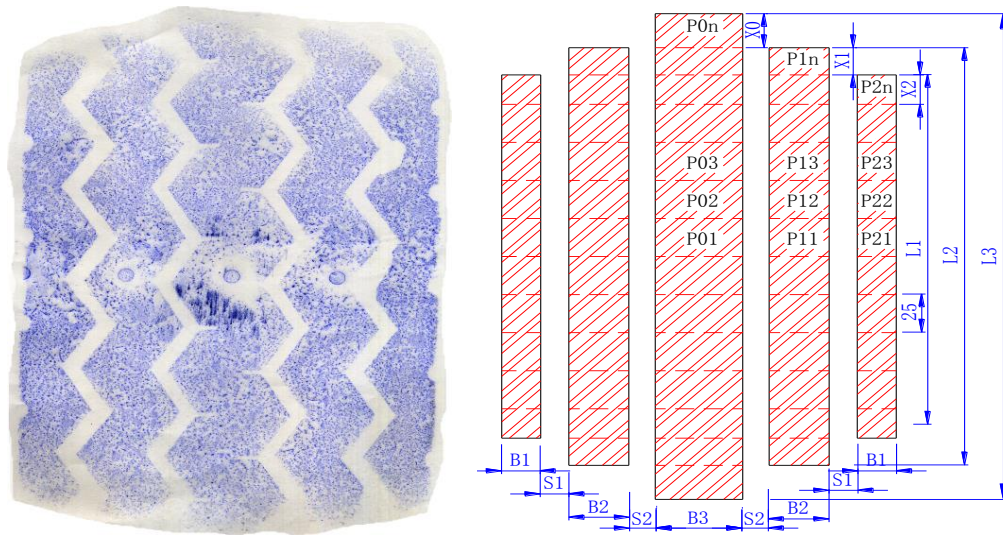


图 2 计算用的 11.00-20 走向花纹轮胎接地面简化图示

表 1 11.00-20 型走向花纹轮胎所选取的计算工况以及相应的荷载接地面参数

工况 (胎压 kPa/负荷 kg)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	B1 (mm)	B2 (mm)	B3 (mm)	X1 (mm)	X2 (mm)	X3 (mm)	S1 (mm)	S2 (mm)
600/2500	217.0	240.6	249.0	21.8	31.7	44.0	8.5	11.8	16.0	10	8

表 2 不同工况各小块接地面的接地压力 P_{ij} 值（单位：MPa）

工况 kPa/kN	600/2500	工况 kPa/kN	600/2500	工况 kPa/kN	600/2500
P01	0.720	P11	0.850	P21	1.110
P02	0.700	P12	0.893	P22	1.014
P03	0.677	P13	0.843	P23	0.921
P04	0.603	P14	0.674	P24	0.335
P05	0.438	P15	0.380	P25	0.113
P06	0.233	P16	0.132	P26	—
P07	—	P17	—		

1.3 最不利荷载位置

混凝土板有纵缝和横缝，荷载布置时分偏荷载（即荷载边缘切缝布置）和中荷载（荷载骑缝对称布置），从而使荷位的布置形式很多。很多研究人员对旧板直接加罩沥青面层后的最不利荷载位进行过分析^[6-7]，这些分析的结果都是以荷

载出现在裂缝边缘处为最不利荷载位。且荷载作用于裂缝边缘时（偏荷载位），对加铺层的应力影响最为显著；荷载处于正荷载位时（即单轮荷载对称作用于裂缝两侧），对沥青面层所产生的应力影响要小于偏荷载位。

对已经加铺沥青层的路面结构的调查表明，加铺层路面破坏多发生在旧混凝土路面板的横缝上方，由此可认为最不利荷位在接缝附近，如图 3 所示。

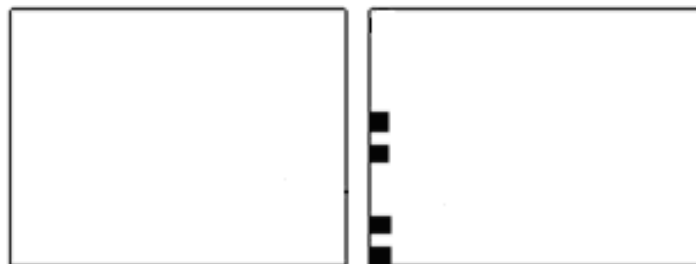


图 3 荷载作用位置示意图

1.4 有限元模型的建立

根据表 3 定义材料属性，建立有限元模型。为获得较好的计算精度，荷载作用区域附近的单元划分得较密一些，单元尺寸较小，其它单元按深度和距离逐渐扩大，有限元模型如图 4 所示：

表 3 加铺层材料参数

结构层	弹性模量 E (MPa)	泊松比 ν
沥青加铺层	1200	0.35
应力吸收层	600	0.35
旧水泥混凝土层	25000	0.15
水泥砂砾基层	1200	0.20
路基	80	0.40

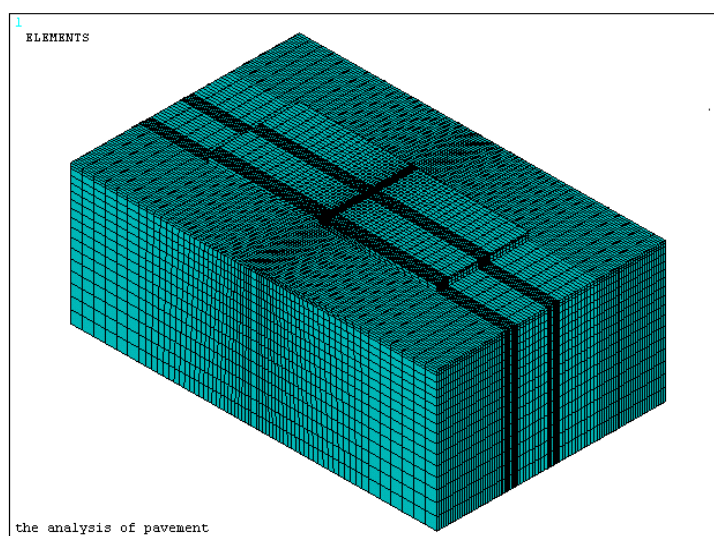


图 4 路面结构 FEM 模型

2 加铺层厚度敏感性分析

为分析不同加铺层厚度对结构应力场的影响，针对不同厚度的单层铺装结构，计算标准荷载工况（600/2500）在

临界荷位时铺装层的应力响应，计算结果如表 4 及表 5 所示。

表 4 不同加铺层厚度的应力应变计算结果

加铺层厚度 (cm)	层底拉应力 (MPa)			层底拉应变 (E-4)			最大剪应力 (MPa)	横缝最大剪应力 S_{xy} (MPa)
	横向	纵向	竖向	横向	纵向	竖向		
4	0.196	0.224	1.055	0.209	0.398	11.375	0.964	0.589
6	0.182	0.211	0.899	0.200	0.364	9.769	0.877	0.569
8	0.163	0.193	0.780	0.192	0.339	8.555	0.821	0.545
10	0.144	0.173	0.688	0.185	0.314	7.774	0.770	0.523
12	0.125	0.153	0.622	0.177	0.289	7.135	0.720	0.497
14	0.106	0.133	0.558	0.169	0.265	6.559	0.670	0.468
16	0.089	0.114	0.498	0.162	0.241	6.035	0.622	0.436
18	0.074	0.097	0.442	0.154	0.219	5.556	0.574	0.405
20	0.060	0.082	0.391	0.146	0.198	5.116	0.530	0.374

表 5 不同加铺层厚度的弯沉计算结果

加铺层厚度 (cm)	加铺层层底弯沉 (0.01mm)			加铺层层顶弯沉 (0.01mm)		
	无荷载板	荷载板	弯沉差	无荷载板	荷载板	弯沉差
4	30.53	33.14	2.62	30.60	35.05	4.45
6	30.11	32.47	2.36	30.26	35.32	5.06
8	29.72	31.88	2.16	29.90	35.62	5.72
10	29.34	31.33	1.99	29.59	35.88	6.30
12	28.97	30.79	1.83	29.32	36.09	6.77
14	28.59	30.27	1.67	29.08	36.22	7.14
16	28.21	29.75	1.53	28.86	36.29	7.44
18	27.83	29.23	1.40	28.65	36.31	7.65
20	27.44	28.73	1.29	28.45	36.27	7.82

分析表明：

加铺层层底拉应力与拉应变随加铺层厚度增大而减小，且减小幅度逐渐变缓，当厚度为 12cm 时，竖直方向拉应力为 0.622MPa。与其他方向拉应力拉应变相比，竖直方向应力应变要大很多，加铺结构与旧水泥混凝土板之间的粘性能尤为重要。

与普通路面结构内 0.3-0.4MPa 的最大剪应力峰值相比，由于受到混凝土板接缝的影响，加铺层内最大剪应力峰值增幅极大，虽然增大加铺层厚度能使最大剪应力的降低，但当厚度为 12cm 时，最大剪应力仍为 0.72MPa，加铺层混合料的抗剪性能不容忽视。

现有加铺层结构设计方法中，以加铺结构层在接缝两侧的路表弯沉差作为设计指标，而有限元分析表明，加铺结构路表弯沉差随着沥青加铺层厚度的增加而增大，也就是说增厚加铺层更为不利，这显然与事实不符；而分析也表明，旧混凝土板顶横缝两侧弯沉差逐渐减小，说明沥青加铺层厚度的增加对降低路面结构内的应力应变状况是有益。所以，以加铺层路表弯沉差作为设计指标有必要进一步探讨。

3 应力吸收层厚度敏感性分析

铺装结构层内应力吸收层的厚度必然对铺装结构内的应力场有非常显著的影响。为分析不同应力吸收层厚度对结

构应力场的影响，确定合适的吸收层厚度，针对不同吸收层厚度的铺装结构，计算荷载工况（600/2500）在临界荷位时铺装层的应力响应。根据之前的分析成果，取加铺层厚度为 8cm，材料参数见表 6，计算结果如表 7-表 9。

表 6 铺装层结构及材料参数

	厚度 (cm)	模量 (MPa)	泊松比
沥青混凝土	8	1200	0.35
应力吸收层	1-6	600	0.35

表 7 不同应力吸收层厚度时加铺层应力状态

SAMI 厚度 (cm)	层底拉应力 (MPa)			沥青层底拉应变 (E-4)			最大剪应力 (MPa)	横缝最大剪应力 S _{xy} (MPa)
	横向	纵向	竖向	横向	纵向	竖向		
0	0.163	0.193	0.780	0.192	0.339	8.555	0.821	0.545
1.0	0.018	0.009	0.198	0.497	0.648	2.940	0.358	0.298
2.0	0.017	0.009	0.094	0.822	1.149	2.127	0.251	0.217
3.0	0.016	0.009	0.057	1.071	1.507	1.586	0.266	0.182
4.0	0.016	0.009	0.042	1.242	1.755	1.313	0.277	0.172
5.0	0.016	0.009	0.034	1.364	1.930	1.094	0.284	0.178
6.0	0.016	0.009	0.027	1.447	2.057	0.925	0.289	0.183

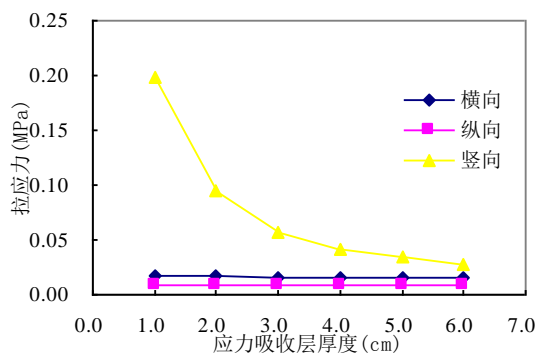


图 5 加铺层拉应力随应力吸收层厚度变化

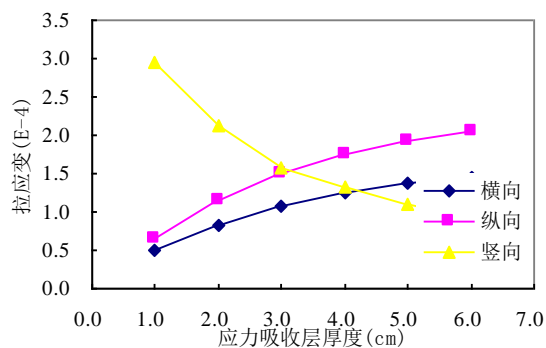


图 6 加铺层拉应变随应力吸收层厚度变化

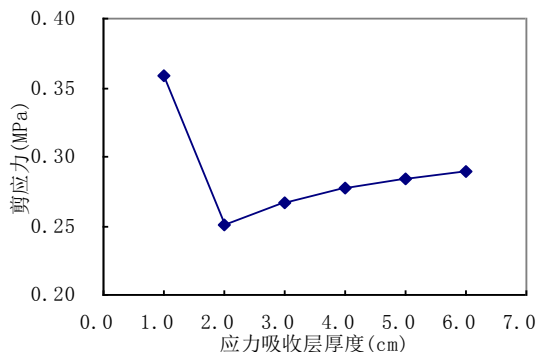


图 7 加铺层最大剪应力随吸收层厚度变化

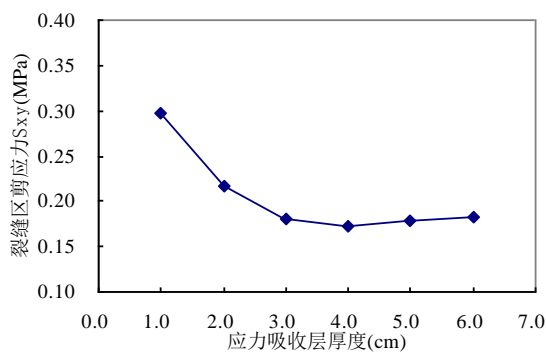
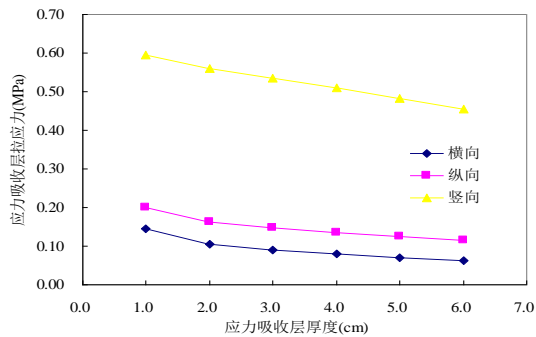
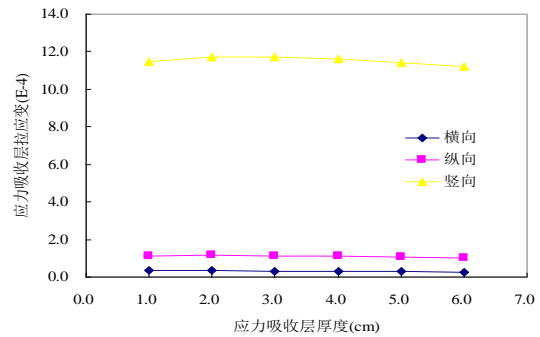
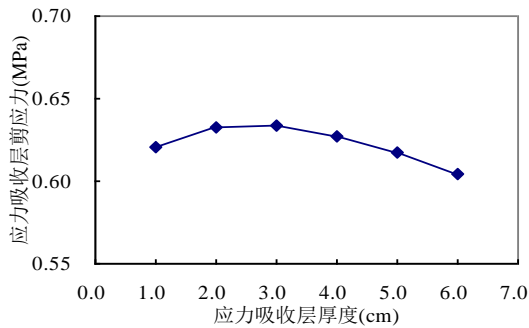
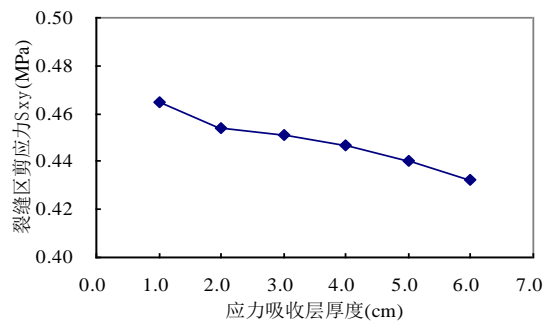


图 8 加铺层横缝区剪应力随吸收层厚度变化

表 8 不同应力吸收层厚度时应力吸收层应力应变状态

SAMI 厚度 (cm)	层底拉应力 (MPa)			层底拉应变 (E-4)			最大剪应力 (MPa)	横缝最大剪应力 S_{xy} (MPa)
	横向	纵向	竖向	横向	纵向	竖向		
1.0	0.145	0.199	0.595	0.365	1.108	11.442	0.621	0.465
2.0	0.106	0.163	0.559	0.347	1.154	11.725	0.633	0.454
3.0	0.090	0.147	0.536	0.326	1.141	11.713	0.633	0.451
4.0	0.080	0.135	0.511	0.305	1.108	11.597	0.627	0.447
5.0	0.070	0.124	0.483	0.284	1.068	11.421	0.617	0.440
6.0	0.062	0.114	0.454	0.264	1.026	11.207	0.605	0.432


图 9 应力吸收层拉应力随厚度变化

图 10 应力吸收层拉应变随厚度变化

图 11 应力吸收层最大剪应力随厚度变化

图 12 应力吸收层横缝区剪应力随厚度变化
表 9 应力吸收层厚度对弯沉的影响

应力吸收层厚度 (cm)	加铺层层顶弯沉 (0.01mm)			加铺层层底弯沉 (0.01mm)			SAMI 层层底弯沉 (0.01mm)		
	无荷载板	荷载板	弯沉差	无荷载板	荷载板	弯沉差	无荷载板	荷载板	弯沉差
1.0	30.16	36.59	6.43	30.23	32.52	2.29	29.86	32.12	2.26
2.0	30.20	37.24	7.03	30.34	33.10	2.77	29.76	32.04	2.28
3.0	30.23	37.80	7.57	30.37	33.62	3.25	29.64	31.89	2.25
4.0	30.26	38.30	8.04	30.38	34.12	3.74	29.51	31.70	2.20
5.0	30.29	38.75	8.46	30.39	34.59	4.20	29.37	31.50	2.13
6.0	30.34	39.16	8.83	30.42	35.02	4.60	29.23	31.28	2.06

分析表明:

(1) 应力吸收层对加铺层内的应力状态应力改善效果非常明显, 加入应力吸收层后, 加铺层层底拉应力、最大剪应力及接缝处的竖向剪应力显著降低。与应力吸收层厚度为 1cm 的结构相比, 无应力吸收层时的最大剪应力峰值从 0.821MPa 降低到 0.358MPa, 降幅达到了两倍多, 但是加铺层底的拉应变却有所增大。

(2) 随应力吸收层厚度逐渐增大, 加铺层底拉应力降低, 最大剪应力及层底拉应变反而随着厚度的增大而增大, 所以如果应力吸收层过厚, 加铺层内的应力响应也会变得不利。

(3) 应力吸收层内应力应变都随着厚度的增大而降低, 但是剪应力指标降低幅度有限, 增大应力吸收层结构的厚度, 并不是防止剪切型疲劳裂缝的有效方法。

(4) 应力吸收层厚度的增加有效地减小了应力吸收层层底(即水泥混凝土板表面)接缝两侧的弯沉差, 这有利于减小应力吸收层发生剪切型裂缝的风险, 但却使得加铺层层底弯沉差增大, 这对加铺层抵抗剪切裂缝是不利的。

4 结论

本文利用有限元方法, 分析了不同加铺层和薄沥青混凝土应力吸收层厚度对铺装结构的应力响应。研究表明, 当不设应力吸收层时, 加铺层厚度的增加对改善加铺层内的应力状态有一定的效果, 但是过厚的加铺结构经济上并不合适。应力吸收层可以很好的改善加铺层内的应力状况, 但是过厚的应力吸收层也不利于抵抗剪切型裂缝, 考虑到施工等因素, 合理的厚度一般应为 2-3cm。

[参考文献]

- [1]沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象预防[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2]栾利强. 半刚性基层沥青路面疲劳裂缝扩展与寿命预估研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(09): 118-128.
- [3]王雪莲, 黄晓明, 卞国剑. LSPM 对防治半刚性基层沥青路面反射裂缝机理分析[J]. 公路交通科技, 2016, 33(07): 12-18.
- [4]夏蕊芳. 基于有限元分析法在半刚性基层路面反射裂缝的研究[J]. 公路工程, 2017, 42(03): 18-25.
- [5]胡小弟. 轮胎接地压力分布实测及沥青路面力学响应分析[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- [6]陆金燕. 轮胎接地面三向力的动态测量[J]. 橡胶工业, 1992(10): 609-614.
- [7]杨始燕. 改善轮胎接地面垂直压力分布的研究[J]. 橡胶工业, 1992(11): 689-691.

作者简介: 胡晓(1982.2-), 男, 上海市人, 汉族, 硕士研究生学历, 高级工程师, 研究方向为道路桥梁专业。