

(2) 试件成型方式:SGC法成型空隙率为4%的圆柱体试件。

(3) 轮胎压力:APA高温车辙试验是凹形轮通过一根充气橡胶管间接将力施加在试件上。文中轮载为 $(445 \pm 22)$  N,橡胶管的充气压强为 $(690 \pm 22)$  kPa。

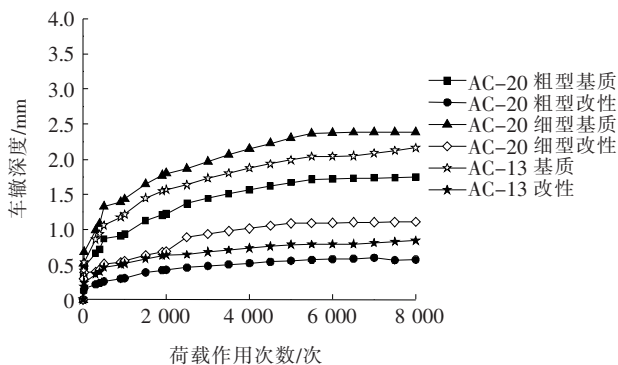
(4) 行走速度:荷载轮运行频率为60 Hz。

(5) 评价指标:采用车辙深度评价指标,选取3次平行试验的平均值作为最后的试验结果<sup>[6]</sup>。

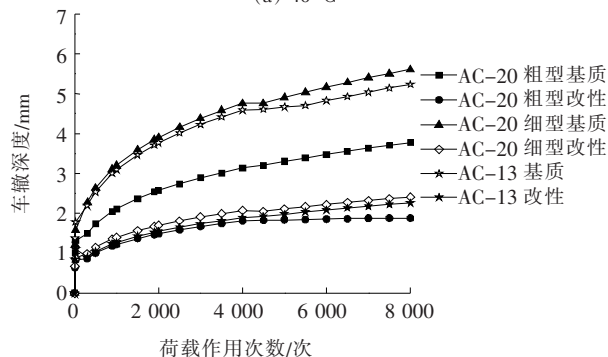
## 2 APA车辙温度影响回归模型

### 2.1 模型的建立

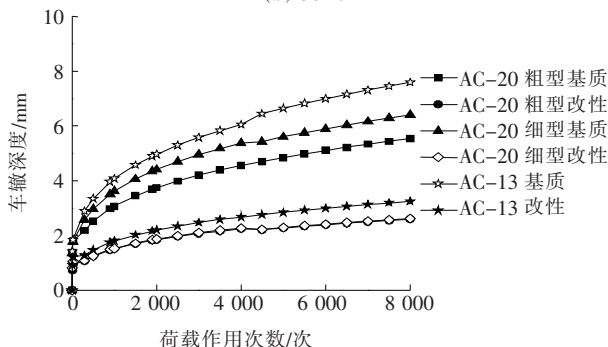
不同试验温度下的APA车辙试验结果见图3。



(a) 40 °C



(b) 50 °C



(c) 60 °C

图3 不同温度下沥青混合料APA车辙曲线图

从图3可知:车辙深度随着荷载作用次数和温度的变化而变化。基于6种沥青混合料在不同温度下的车辙试验结果建立温度影响回归模型。在回归分析中,采用不同的模型拟合,最后确定出最佳模型为:

$$[R/R_0] = [T/T_0]^\alpha [N/N_0]^\beta \quad (1)$$

式中: $R$ 为预测车辙深度(mm); $R_0$ 为基于车辙试验得到的温度 $T_0$ 、荷载作用次数 $N_0$ 下的基准车辙深度(mm); $T$ 、 $N$ 为预测车辙深度 $R$ 对应的试验温度、荷载作用次数; $\alpha$ 、 $\beta$ 为回归分析得到的相关系数。

沥青混合料类型,例如沥青性质、沥青含量、空隙率、集料级配等都对应式(1)中车辙深度 $R$ 和相关系数 $\alpha$ 、 $\beta$ 的影响很大。在车辙深度的温度影响回归模型中,考虑这些因素将会使模型非常复杂。为简化模型,将 $R_0$ 引入式(1)中,将沥青混合料类型对预测车辙深度的影响标准化。回归分析中采用了54次车辙试验得到的324组数据。选取了8个基准深度分别进行回归,每个分别对应不同的试验温度和荷载作用次数。回归分析时先对式(1)的等式两边取对数,将公式转化为二元一次方程,通过线性回归的方法求解 $\alpha$ 和 $\beta$ 。回归分析结果见表1。

相关系数 $R \geq 0.94$ ,说明自变量和因变量之间有较高的相关性;标准误差 $\leq 0.2$  mm,说明回归方程的拟合程度较好;Significance  $F$  ( $F$ 显著性统计量) $< 0.01$ ,说明所建立的回归方程非常显著。这些数据都表明式(1)模型可以较好地模拟APA车辙数据。从表1发现:基于8个基准深度分别得到的回归系数 $\alpha$ 、 $\beta$ 差别不大,取均值得到 $\alpha = 3.062$ , $\beta = 0.246$ 用于回归方程,如式(2)所示:

$$[R/R_0] = [T/T_0]^{3.062} [N/N_0]^{0.246} \quad (2)$$

### 2.2 模型的验证

采用式(2)预测6种不同沥青混合料在不同温度和荷载作用次数下的车辙深度,预测车辙深度和实测车辙深度的结果见表2~7。预测车辙深度和实测车辙深度非常接近。在864个数据中,只有25个数据与实测车辙深度的偏差超过0.8 mm,最大偏差为2.092 mm。

### 2.3 模型的意义

这一模型可以基于一定的试验条件下得到的沥青混合料的抗车辙性能,预测该种混合料在不同的温度和荷载作用次数下的抗车辙性能,其意义如下:

(1) 该模型可以缩短室内车辙试验时间,更有利于其在施工质量控制与管理(QC/QA)中的应用。例如,常规车辙试验为60 °C、8 000次荷载作用次数,大

表 1 车辙的温度影响模型回归分析

基准状态	基准状态试验温度/℃	基准状态荷载作用次数/次	$\alpha$	$t$ Stat	$P$ -value	$\beta$	$t$ Stat	$P$ -value	$R$	$R^2$	标准差/mm	Significance $F$
1	40	25	2.849	35.473	2.9E-113	0.229	43.655	2.76E-137	0.985	0.970	0.120	2.516E-245
2	40	500	3.173	54.850	2.04E-165	0.249	31.794	2.41E-101	0.971	0.943	0.117	4.084E-200
3	40	1 000	3.367	60.748	1.92E-178	0.243	30.565	3.375E-97	0.967	0.934	0.116	1.517E-190
4	40	2 000	3.115	59.096	6.66E-175	0.239	33.985	1.57E-108	0.960	0.922	0.105	8.416E-179
5	40	4 000	2.960	51.700	5.45E-158	0.243	37.308	6.11E-119	0.948	0.899	0.105	4.680E-161
6	40	8 000	3.073	49.049	1.88E-151	0.234	39.482	1.92E-125	0.943	0.889	0.106	4.029E-154
7	50	8 000	2.992	33.338	1.96E-106	0.286	53.934	2.72E-163	0.964	0.930	0.116	5.671E-186
8	60	8 000	2.968	48.883	4.91E-151	0.244	44.226	7.61E-139	0.985	0.969	0.100	1.031E-243

表 2 基于回归模型的 AC-20 粗型基质沥青混合料的预测车辙深度

试验温度/℃	荷载作用次数/次	实测车辙深度/mm	基于不同 $T(^{\circ}\text{C})/N(\text{次})$ 的预测车辙深度/mm				最大偏差/mm	基于不同 $T(^{\circ}\text{C})/N(\text{次})$ 的预测车辙深度/mm				最大偏差/mm
			40/25	40/500	40/1 000	40/2 000		40/4 000	40/8 000	50/8 000	60/8 000	
40	25	0.469	0.469	0.415	0.377	0.415	0.092	0.449	0.421	0.439	0.442	0.048
	500	0.867	0.980	0.867	0.788	0.868	0.113	0.939	0.881	0.917	0.924	0.072
	1 000	0.935	1.162	1.028	0.935	1.030	0.227	1.113	1.044	1.088	1.096	0.178
	2 000	1.221	1.378	1.219	1.109	1.221	0.157	1.320	1.239	1.290	1.299	0.099
	4 000	1.566	1.635	1.446	1.315	1.448	0.251	1.566	1.469	1.529	1.541	0.097
	8 000	1.742	1.938	1.715	1.559	1.717	0.196	1.857	1.742	1.814	1.827	0.115
50	25	0.967	0.929	0.822	0.747	0.823	0.220	0.890	0.835	0.869	0.876	0.132
	500	1.819	1.941	1.717	1.561	1.719	0.258	1.859	1.744	1.816	1.829	0.075
	1 000	2.186	2.302	2.036	1.852	2.039	0.334	2.205	2.068	2.154	2.170	0.118
	2 000	2.579	2.729	2.415	2.196	2.418	0.383	2.615	2.453	2.554	2.573	0.126
	4 000	2.838	3.237	2.864	2.604	2.868	0.399	3.101	2.909	3.029	3.051	0.263
	8 000	3.592	3.839	3.396	3.088	3.401	0.504	3.678	3.450	3.592	3.619	0.142
60	25	1.359	1.623	1.436	1.306	1.438	0.264	1.555	1.459	1.519	1.530	0.196
	500	3.252	3.392	3.001	2.729	3.005	0.523	3.250	3.048	3.174	3.197	0.204
	1 000	3.656	4.022	3.558	3.236	3.563	0.420	3.854	3.615	3.764	3.792	0.198
	2 000	4.425	4.770	4.220	3.838	4.226	0.587	4.570	4.287	4.464	4.497	0.145
	4 000	5.394	5.657	5.005	4.551	5.011	0.843	5.420	5.084	5.293	5.333	0.310
	8 000	6.324	6.709	5.935	5.397	5.943	0.927	6.427	6.029	6.278	6.324	0.295

约需要 3 h。有了这一模型,可以在 60 ℃ 条件下测试同一种沥青混合料 1 000 次荷载作用次数下的车辙深度,使用模型预测其在 8 000 次荷载作用下的车辙深度。1 000 次的荷载作用次数往往只需要 0.5 h,大大缩短了试验时间。不同荷载作用次数对应的车辙深度占 8 000 次作用下车辙深度的比例系数可以从模型中计算得到,见表 8。

(2) 不同工程的气温条件有很大差异,基于这一

模型可以依据一种试验条件下的沥青混合料抗车辙性能,预测不同环境条件下的该种沥青混合料的抗车辙性能。表 9 为不同温度和荷载作用次数的组合,这些试验组合能够产生相同的车辙深度。

3 结 论

(1) 基于 6 种沥青混合料在不同温度下的车辙试

表 3 基于回归模型的 AC-20 粗型改性沥青混合料的预测车辙深度

试验 温度/ ℃	荷载作 用次 数/次	实测车 辙深 度/mm	基于不同 $T(^{\circ}\text{C})/N(\text{次})$ 的 预测车辙深度/mm				最大 偏差/ mm	基于不同 $T(^{\circ}\text{C})/N(\text{次})$ 的 预测车辙深度/mm				最大 偏差/ mm
			40/25	40/500	40/1 000	40/2 000		40/4 000	40/8 000	50/8 000	60/8 000	
40	25	0.164	0.164	0.124	0.123	0.144	0.040	0.149	0.138	0.229	0.164	0.065
	500	0.259	0.343	0.259	0.258	0.301	0.084	0.312	0.289	0.479	0.343	0.22
	1 000	0.306	0.406	0.307	0.306	0.357	0.100	0.370	0.342	0.568	0.407	0.262
	2 000	0.423	0.482	0.364	0.363	0.423	0.060	0.439	0.406	0.674	0.483	0.251
	4 000	0.521	0.572	0.432	0.430	0.502	0.091	0.521	0.481	0.799	0.573	0.278
	8 000	0.571	0.678	0.512	0.510	0.595	0.107	0.618	0.571	0.947	0.679	0.376
50	25	0.538	0.325	0.245	0.245	0.285	0.293	0.296	0.274	0.454	0.325	0.264
	500	0.957	0.679	0.513	0.511	0.596	0.446	0.619	0.572	0.948	0.680	0.385
	1 000	1.142	0.805	0.608	0.606	0.706	0.536	0.734	0.678	1.125	0.807	0.464
	2 000	1.331	0.954	0.721	0.719	0.838	0.612	0.870	0.804	1.334	0.957	0.527
	4 000	1.641	1.132	0.855	0.852	0.993	0.789	1.032	0.954	1.582	1.134	0.687
	8 000	1.876	1.342	1.014	1.011	1.178	0.865	1.224	1.131	1.876	1.345	0.745
60	25	0.496	0.568	0.429	0.427	0.498	0.072	0.517	0.478	0.793	0.569	0.297
	500	1.311	1.186	0.896	0.893	1.041	0.418	1.081	0.999	1.658	1.189	0.347
	1 000	1.430	1.407	1.063	1.059	1.234	0.371	1.282	1.185	1.966	1.410	0.536
	2 000	1.583	1.668	1.261	1.256	1.464	0.327	1.520	1.405	2.331	1.672	0.748
	4 000	1.856	1.978	1.495	1.489	1.736	0.367	1.803	1.666	2.765	1.982	0.909
	8 000	2.351	2.346	1.773	1.766	2.059	0.585	2.138	1.976	3.279	2.351	0.928

表 4 基于回归模型的 AC-20 细型基质沥青混合料的预测车辙深度

试验 温度/ ℃	荷载作 用次 数/次	实测车 辙深 度/mm	基于不同 $T(^{\circ}\text{C})/N(\text{次})$ 的 预测车辙深度/mm				最大 偏差/ mm	基于不同 $T(^{\circ}\text{C})/N(\text{次})$ 的 预测车辙深度/mm				最大 偏差/ mm
			40/25	40/500	40/1 000	40/2 000		40/4 000	40/8 000	50/8 000	60/8 000	
40	25	0.675	0.675	0.634	0.578	0.611	0.097	0.616	0.577	0.642	0.582	0.098
	500	1.324	1.410	1.324	1.208	1.278	0.116	1.288	1.205	1.342	1.215	0.119
	1 000	1.432	1.673	1.570	1.432	1.515	0.241	1.527	1.429	1.591	1.441	0.159
	2 000	1.797	1.984	1.862	1.698	1.797	0.187	1.811	1.694	1.887	1.709	0.103
	4 000	2.148	2.352	2.208	2.014	2.131	0.204	2.148	2.009	2.238	2.027	0.139
	8 000	2.383	2.790	2.619	2.388	2.527	0.407	2.547	2.383	2.654	2.404	0.271
50	25	1.118	1.337	1.255	1.144	1.211	0.219	1.221	1.142	1.272	1.152	0.154
	500	2.119	2.793	2.622	2.391	2.530	0.674	2.550	2.386	2.657	2.407	0.538
	1 000	2.500	3.312	3.109	2.836	3.001	0.812	3.025	2.829	3.151	2.854	0.651
	2 000	3.439	3.928	3.688	3.363	3.559	0.489	3.587	3.355	3.737	3.385	0.298
	4 000	4.320	4.659	4.373	3.988	4.220	0.339	4.254	3.979	4.432	4.014	0.341
	8 000	5.256	5.525	5.186	4.730	5.005	0.526	5.045	4.719	5.256	4.760	0.537
60	25	1.491	2.336	2.193	2.000	2.116	0.845	2.133	1.995	2.222	2.013	0.731
	500	3.999	4.881	4.582	4.179	4.422	0.882	4.457	4.170	4.644	4.206	0.645
	1 000	4.371	5.789	5.434	4.956	5.244	1.418	5.286	4.945	5.507	4.988	1.136
	2 000	5.570	6.865	6.444	5.877	6.219	1.295	6.269	5.864	6.531	5.915	0.961
	4 000	6.778	8.142	7.643	6.970	7.376	1.364	7.434	6.954	7.746	7.015	0.968
	8 000	8.319	9.655	9.063	8.266	8.747	1.336	8.816	8.247	9.186	8.319	0.867

表 5 基于回归模型的 AC—20 细型改性沥青混合料的预测车辙深度

试验 温度/ ℃	荷载作 用次 数/次	实测车 辙深 度/mm	基于不同 $T(^{\circ}\text{C})/N(\text{次})$ 的 预测车辙深度/mm				最大 偏差/ mm	基于不同 $T(^{\circ}\text{C})/N(\text{次})$ 的 预测车辙深度/mm				最大 偏差/ mm
			40/25	40/500	40/1 000	40/2 000		40/4 000	40/8 000	50/8 000	60/8 000	
40	25	0.387	0.387	0.244	0.223	0.234	0.164	0.291	0.268	0.294	0.241	0.146
	500	0.509	0.809	0.509	0.466	0.488	0.3	0.609	0.560	0.615	0.503	0.106
	1 000	0.553	0.959	0.604	0.553	0.579	0.406	0.722	0.664	0.729	0.597	0.176
	2 000	0.687	1.137	0.716	0.656	0.687	0.45	0.856	0.787	0.865	0.708	0.178
	4 000	1.015	1.349	0.849	0.778	0.815	0.334	1.015	0.933	1.026	0.839	0.176
	8 000	1.107	1.599	1.007	0.922	0.966	0.492	1.204	1.107	1.216	0.995	0.112
50	25	0.648	0.766	0.482	0.442	0.463	0.206	0.577	0.530	0.583	0.477	0.171
	500	0.997	1.601	1.008	0.923	0.967	0.604	1.205	1.108	1.218	0.996	0.221
	1 000	1.151	1.899	1.195	1.095	1.147	0.748	1.429	1.314	1.444	1.182	0.293
	2 000	1.523	2.252	1.418	1.299	1.360	0.729	1.695	1.559	1.713	1.401	0.19
	4 000	1.888	2.671	1.681	1.540	1.613	0.783	2.010	1.849	2.031	1.662	0.226
	8 000	2.409	3.167	1.994	1.827	1.913	0.758	2.384	2.192	2.409	1.971	0.438
60	25	0.665	1.339	0.843	0.772	0.809	0.674	1.008	0.927	1.019	0.833	0.354
	500	1.877	2.799	1.762	1.614	1.691	0.922	2.106	1.937	2.129	1.741	0.252
	1 000	2.137	3.319	2.089	1.914	2.005	1.182	2.498	2.297	2.524	2.065	0.387
	2 000	2.373	3.936	2.478	2.270	2.378	1.563	2.962	2.724	2.994	2.449	0.621
	4 000	3.027	4.668	2.938	2.692	2.820	1.641	3.513	3.231	3.550	2.904	0.523
	8 000	3.444	5.536	3.484	3.192	3.344	2.092	4.166	3.831	4.210	3.444	0.766

表 6 基于回归模型的 AC—13 基质沥青混合料的预测车辙深度

试验 温度/ ℃	荷载作 用次 数/次	实测车 辙深 度/mm	基于不同 $T(^{\circ}\text{C})/N(\text{次})$ 的 预测车辙深度/mm				最大 偏差/ mm	基于不同 $T(^{\circ}\text{C})/N(\text{次})$ 的 预测车辙深度/mm				最大 偏差/ mm
			40/25	40/500	40/1 000	40/2 000		40/4 000	40/8 000	50/8 000	60/8 000	
40	25	0.530	0.530	0.507	0.489	0.534	0.041	0.537	0.523	0.588	0.538	0.058
	500	1.060	1.107	1.060	1.022	1.116	0.056	1.122	1.093	1.228	1.125	0.168
	1 000	1.212	1.313	1.257	1.212	1.323	0.111	1.331	1.296	1.456	1.334	0.244
	2 000	1.569	1.558	1.491	1.437	1.569	0.132	1.579	1.537	1.727	1.582	0.158
	4 000	1.872	1.847	1.768	1.705	1.861	0.167	1.872	1.822	2.048	1.877	0.176
	8 000	2.161	2.190	2.097	2.021	2.207	0.140	2.220	2.161	2.428	2.225	0.267
50	25	1.294	1.050	1.005	0.969	1.057	0.325	1.064	1.035	1.164	1.066	0.259
	500	2.557	2.193	2.099	2.024	2.209	0.533	2.223	2.164	2.431	2.228	0.393
	1 000	2.927	2.601	2.489	2.400	2.620	0.527	2.636	2.566	2.883	2.642	0.361
	2 000	3.412	3.084	2.952	2.846	3.107	0.566	3.126	3.043	3.419	3.134	0.369
	4 000	4.182	3.658	3.501	3.376	3.685	0.806	3.707	3.609	4.055	3.716	0.573
	8 000	4.809	4.338	4.152	4.003	4.370	0.806	4.396	4.280	4.809	4.407	0.529
60	25	1.622	1.834	1.756	1.693	1.848	0.226	1.859	1.810	2.033	1.864	0.242
	500	3.968	3.833	3.669	3.537	3.861	0.431	3.885	3.781	4.249	3.894	0.281
	1 000	4.587	4.545	4.351	4.195	4.579	0.392	4.607	4.484	5.039	4.618	0.452
	2 000	5.474	5.390	5.159	4.974	5.430	0.500	5.463	5.318	5.976	5.476	0.502
	4 000	6.366	6.393	6.119	5.899	6.440	0.467	6.479	6.307	7.087	6.495	0.721
	8 000	7.702	7.581	7.256	6.996	7.637	0.706	7.683	7.479	8.404	7.702	0.702

表7 基于回归模型的AC-13改性沥青混合料的预测车辙深度

试验 温度/ ℃	荷载作 用次 数/次	实测车 辙深 度/mm	基于不同 $T(^{\circ}\text{C})/N(\text{次})$ 的				最大 偏差/ mm	基于不同 $T(^{\circ}\text{C})/N(\text{次})$ 的				最大 偏差/ mm
			预测车辙深度/mm					预测车辙深度/mm				
			40/25	40/500	40/1 000	40/2 000		40/4 000	40/8 000	50/8 000	60/8 000	
40	25	0.241	0.241	0.221	0.206	0.216	0.035	0.211	0.203	0.273	0.198	0.043
	500	0.462	0.504	0.462	0.431	0.452	0.042	0.440	0.425	0.571	0.414	0.109
	1 000	0.511	0.597	0.548	0.511	0.535	0.086	0.522	0.504	0.677	0.491	0.166
	2 000	0.635	0.708	0.650	0.606	0.635	0.073	0.619	0.597	0.803	0.583	0.168
	4 000	0.734	0.840	0.771	0.719	0.753	0.106	0.734	0.708	0.953	0.691	0.219
	8 000	0.840	0.996	0.914	0.852	0.893	0.156	0.870	0.840	1.130	0.820	0.290
50	25	0.782	0.477	0.438	0.408	0.428	0.374	0.417	0.402	0.541	0.393	0.389
	500	0.890	0.997	0.915	0.853	0.894	0.107	0.872	0.841	1.131	0.821	0.241
	1 000	1.069	1.183	1.085	1.012	1.060	0.114	1.034	0.997	1.341	0.973	0.272
	2 000	1.388	1.403	1.287	1.200	1.258	0.188	1.226	1.183	1.591	1.154	0.234
	4 000	1.753	1.663	1.526	1.423	1.491	0.330	1.454	1.403	1.886	1.369	0.384
	8 000	2.237	1.973	1.810	1.688	1.769	0.549	1.724	1.663	2.237	1.623	0.614
60	25	0.436	0.834	0.765	0.714	0.748	0.398	0.729	0.703	0.946	0.686	0.510
	500	1.535	1.743	1.599	1.491	1.563	0.208	1.523	1.470	1.977	1.434	0.442
	1 000	1.706	2.067	1.896	1.769	1.853	0.361	1.806	1.743	2.344	1.701	0.638
	2 000	1.767	2.451	2.249	2.097	2.198	0.684	2.142	2.067	2.780	2.017	1.013
	4 000	2.408	2.907	2.667	2.487	2.606	0.499	2.540	2.451	3.297	2.392	0.889
	8 000	2.837	3.447	3.163	2.950	3.091	0.610	3.013	2.907	3.909	2.837	1.072

表8 不同荷载作用次数对应的车辙深度占  
8 000次作用下车辙深度的比例系数

荷载作用次数/次	比例系数 $(N/N_0)^{0.246}$
1 000	0.60
2 000	0.71
3 000	0.79
4 000	0.84
8 000	1.00

表9 具有车辙等效效应的试验温度和荷载作用次数组合

试验温度/ ℃	荷载作用 次数/次	试验温度/ ℃	荷载作用 次数/次
40	8 000	55	152
45	1 847	60	51
50	498		

验结果建立温度影响回归模型: $[R/R_0]=[T/T_0]^{3.062} \cdot [N/N_0]^{0.246}$ 。

(2) 温度影响回归模型可以缩短室内车辙试验时间,实现APA在施工质量控制与管理中的应用。

(3) 温度影响回归模型可以依据一种试验条件下的沥青混合料抗车辙性能,预测不同环境下的该种沥

青混合料的抗车辙性能。

参考文献:

[1] 李洪华. 沥青路面车辙成因分析及车辙试验研究[D]. 西安:长安大学,2008.

[2] 汪文宁. 基于使用性能衰变的重庆高速公路沥青路面大修时机与大修技术选择研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.

[3] 靳书庆. 沥青路面车辙成因及影响因素分析[J]. 交通世界(建养·机械),2012(8):108—109.

[4] WILLIAMS C R, PROWELL B D. Comparison of Laboratory Wheel-Tracking Test Results with West Track Performance [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board,1999,1 681:121—128.

[5] LAI J S. Development of a Simplified Test Method to Predict Rutting Characteristics of Asphalt Mixes [R]. Georaia DOT,1986.

[6] 王慧,谭好奇,张久鹏. 沥青混合料试件成型形状和空隙率对APA车辙试验的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版),2016,46(3):589—593.

[7] 肖凯. 沥青混合料集料颗粒行为及区域划分研究[D]. 西安:长安大学,2014.

[8] 杜荣耀,林有贵. 汉堡车辙和APA车辙试验适用范围研究[J]. 中外公路,2019,39(5):237—242.