第 48 卷第 5 期
2020 年 5 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 5
May，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20190573

水泥乳化沥青砂浆静态力学性能与组成的关系

朱华胜[1,2]，曾晓辉[1,2]，刘海川[1,2]，谢友均[1]，龙广成[1]，马 聪[1]

(1. 中南大学土木工程学院，长沙 410075；2. 西南交通大学土木工程学院，成都 610031)

摘 要：基于背散射电子成像、扫描电子显微镜等微观实验结果，运用 Hashin 复合球模型，从水泥水化产物、水泥凝胶骨架、水泥沥青复合胶凝体系和水泥乳化沥青(CA)砂浆 4 个尺度，建立了 CA 砂浆的静态受压力学模型，分析了 CA 砂浆弹性模量 E_{CA}、抗压强度 f 与组成的关系。结果表明：水泥水化物相体积分数 V_{CH} 是影响 CA 砂浆弹性模量 E_{CA} 和抗压强度 f 的主要参数；沥青视为气孔或低模量组分时，CA 砂浆静态弹性模量 E_{CA} 与水泥水化物相体积分数 V_{CH}、抗压强度 f 与胶空比 x，均存在幂函数的关系，且 R^2>0.8；试验与模型分析表明，CA 砂浆中水泥水化物为连续相并构成复合胶凝体骨架，沥青穿插其中，沥青对 CA 砂浆静态强度和弹性模量贡献较小。

关键词：水泥乳化沥青；砂浆；乳化沥青；抗压强度；弹性模量；胶空比
中图分类号：TQ172　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)05–0644–08
网络出版时间：2020–03–06



Relationship between Static Mechanical Properties and Composition of Cement and Emulsified Asphalt Mortar

ZHU Huasheng[1,2], *ZENG Xiaohui*[1,2], *LIU Haichuan*[1,2], *XIE Youjun*[1], *LONG Guangcheng*[1], *MA Cong*[1]
(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. School of Civil Engineering, Southwest Jiao Tong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A mechanical model of cement and emulsified asphalt mortar (CA) from four different levels (*i.e.*, cement hydration products, cement gel skeleton, cement asphalt composite system and CA mortar) was proposed based on the microscopic experimental results by backscatter electron imaging and X-ray diffraction and the Hashin composite ball model. The relationships among the elastic modulus of CA mortar, compressive strength f and composition parameters were investigated. The results show that the volume fraction of cement hydrate phase is an important parameter affecting the CA mortar elastic modulus and the compressive strength f. When asphalt is regarded as a pore or a low modulus component, the static elastic modulus of the CA mortar and the volume fraction of cement hydrate, compressive strength f and gel-space ratio all have a power function relationship > 0.8. The cement hydrate in the CA mortar is still a continuous phase and constitutes the composite gel skeleton, asphalt interspersing among them, and the contribution of asphalt to the CA mortar strength and elastic modulus is relatively low.

Keywords: cement and emulsified asphalt; mortar; emulsified asphalt; compressive strength; elastic modulus; gel-space ratio

水泥乳化沥青(CA)砂浆是由水泥(C)、乳化沥青(A)、砂(S)和多种外加剂组成的复合材料，其广泛应用于日本、德国和中国的高速铁路中[1–3]，起支撑、调节、吸振和隔振等作用。根据弹性模量和强度的不同，CA 砂浆可分为 CRTS (China railway track system 中国铁路砟轨系统) I 型和 II 型 2 类。CRTS I 型具有高沥青含量、高韧性、低强度(28d 抗压强度不低于 1.8 MPa)、低弹性模量(28 d 弹性模量为 100~300 MPa)等特点；而 CRTS II 型具有低沥青含量、高强度(28 d 抗压强度不低于 15.0 MPa)、高弹

收稿日期：2019–08–18。　修订日期：2019–09–24。
基金项目：“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFB0303603-4)。
第一作者：朱华胜(1994—)，男，硕士研究生。
通信作者：曾晓辉(1982—)，男，博士，副教授。

Received date: 2019–08–18.　**Revised date:** 2019–09–24.
First author: ZHU Huasheng (1994–) ,male, Master candidate.
E-mail: 1453216189@qq.com
Corresponding author: ZENG Xiaohui (1982–), male, Ph.D., Associate Professor
E-mail: zxhzlh@126.com

性模量(28 d 弹性模量为 7~10 GPa)等特点[4–6]。服役状况下，2 种 CA 砂浆充填层都出现离缝、冲蚀、开裂和碎裂等劣化与破坏现象，而其微结构的演变是产生上述现象的重要原因。

CA 砂浆微结构的差异取决于其组分的不同，进而表现出不同的力学性能。针对 CA 砂浆微结构已有诸多研究，邓德华等[7]认为 CA 砂浆存在两种结构，即以沥青为连续相，水泥为分散相的 I 型结构以及以水泥为基体，沥青嵌入其中的 II 型结构；孔祥明等[8]研究表明乳化沥青颗粒可吸附水泥颗粒，最终形成水泥、水化物和沥青膜的互穿复合结构；杨进波等[9]研究表明沥青与水泥之间没有化学反应，在复合硬化体中，水泥水化物充当骨架，沥青膜包覆其上，二者形成互穿体系。

硬化浆体组成与 CA 砂浆力学性能关系密切，王发洲等[10]、谢永江等[11]研究表明 CA 砂浆水化及强度与其水灰比、沥青/水泥比关系密切。田青等[12]针对 I 型 CA 砂浆，借鉴颗粒增强聚合物基复合材料的相关理论建立了其弹性模量 E 与水化物相体积分数 V_{CH} 的函数关系式。组分中低模量的沥青使得 CA 砂浆力学性能与纯水泥砂浆之间存在很大差异，已有诸多经典理论表征水泥砂浆力学性能与组成的关系，Verbeck[13]通过试验发现水泥砂浆弹性模量 E 与孔隙率 P_c 呈幂函数关系；Powers[14]研究发现水泥砂浆抗压强度 f_c 与胶空比 x 亦呈幂函数关系。针对不同水灰比、沥青/水泥比的 CA 砂浆，上述力学性能与组成的关系尚不明确，亟需进一步深入研究。

测试了不同配合比 CA 砂浆力学参数，采用理论方法计算了其胶空比 x，并结合对已有文献 CA 砂浆抗压强度 f 和弹性模量 E_{CA} 数据的统计结果，分析了 CA 砂浆力学性能与组成的关系，为 CA 砂浆微结构在服役状况下的演变研究提供参考。

1　实验

1.1　材料

采用的水泥为安徽海螺 P•II52.5R 硅酸盐水泥，该水泥的比表面积为 342 m^2/kg，28 d 强度 58.1 MPa，化学组成见表 1。采用的膨胀剂是 UEA (简称 U 型)膨胀剂，其化学组成见表 2。砂采用机制砂，最大粒径为 1.18 mm。沥青为聚苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(SBS)改性阳离子乳化沥青，固体含量为 60.1%。拌和用水为自来水。减水剂选用上海花王公司生产的聚羧酸系高效减水剂。

表 1　水泥的化学组成

Table 1　Chemical composition (mass fraction *w*) of cement　　*w*/%

SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	Na_2Oeq	*f*-CaO	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
21.88	65.89	4.61	2.65	1.76	1.77	0.59	0.98	60.22	17.33	7.63	8.52

表 2　U 型膨胀剂的化学组成

Table 2　Chemical composition of U-type expansion agent(E)　　*w*/%

SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Loss of ignition
16.10	0.98	0.89	13.69	35.48	3.05	24.35	1.51

1.2　制备

以无机胶凝材料(水泥 C+膨胀剂 E，B)为基本单位 1，通过调整 SBS 改性沥青(A)与无机胶凝材料的比例(A/B 比)，砂(S)与无机胶凝材料的比例(S/B 比)，绝对用水量与无机胶凝材料的比例(W/B 比)，配合比见表 3。将搅拌好的 CA 砂浆注入 ϕ50 mm×50 mm 的模具内，约 24 h 左右拆模，然后在(20±3) ℃，相对湿度(65±5)%条件下养护 180 d，进行力学测试。

1.3　应力应变测试

采用电子万能试验机对试件进行单轴压缩试验，以规定的加载速率 0.5 mm/s 施加载荷，正式加载前预加载 3 次，预压应力为 0.1 MPa，当压力达到最大值后停止加载。记下最大抗压强度值 σ 以及相应的位移，并取相同试样重复以上操作，取同批次 3 个试件测试结果的算术平均值。

表 3　试验配合比

Table 3　Test mix ratio

Sample No.	Cement	E	Sand	Asphalt	Water	Super plasticizer	Aluminum powder
1	85	15	200	95	80	0.00	0.014
2	85	15	200	88	70	0. 55	0.014
3	85	15	150	82	70	0.00	0.014
4	85	15	150	88	70	0. 23	0.014
5	85	15	150	95	70	0. 48	0.014
6	85	15	150	68	60	0.00	0.013
7	85	15	150	75	60	0. 11	0.013
8	85	15	150	82	60	0.24	0.013
9	85	15	150	88	60	0.36	0.013
10	85	15	150	95	60	0.44	0.013
11	85	15	100	68	60	0.50	0.014
12	85	15	100	75	60	0.60	0.014
13	85	15	100	82	60	0.80	0.014
14	85	15	100	88	60	0.50	0.013
15	85	15	100	95	60	0.40	0.013
16	85	15	100	102	60	0.50	0.013

1.4 CA 砂浆微观结构观测

将 CA 砂浆试件切片制成若干 5 mm×5 mm，厚度为 3 mm 的小试块，部分试块长期(1 个月)浸泡于二硫化碳溶剂中将沥青溶出，对未经溶出处理和溶出处理后的试块进行机械抛光打磨，采用背散射电子成像(BSE)和扫描电子显微镜(SEM)技术观测其微观结构。

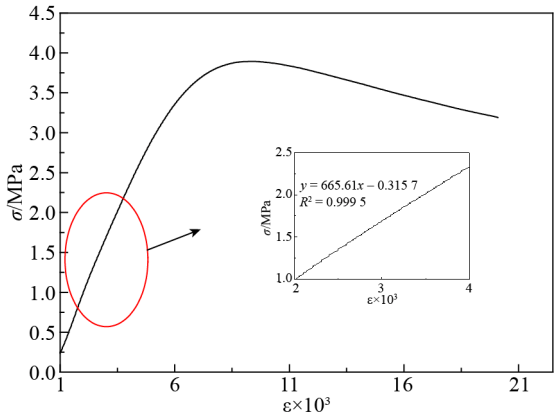
1.5 水泥乳化沥青浆体各相体积分数计算

邓德华等[15]基于 Powers[16]和 Brown yard[16]的研究结果推导出了水泥乳化沥青各相体积分数计算公式，实验结果表明理论计算值与实测值相差 5%以内。故采取文献[15]的公式计算了 CA 砂浆硬化浆体组成参数，计算时不考虑含量较少的外加剂。

2 结果与讨论

2.1 不同配比下 CA 砂浆力学特性

根据文献[15]的公式计算不同配比下水泥乳化沥青浆体各相体积分数，并基于文献和实验获得其力学性能参数，进而建立 CA 砂浆力学性能与硬化浆体组成参数的关系。图 1 为 CA 砂浆的应力 σ-应变 ε 曲线，CA 砂浆原点的切线斜率由于初始应力很小，试件的位移变化量很难测定，而砂浆的切线模量在加载曲线中期表现出极好的相关性，选取了 CA 砂浆应变量为 0.002~0.004 之间的 122 个点，其相关性达到 0.999 5，极好表征了砂浆在单轴压力状态下的线性变形。因此，采用 CA 砂浆 1/3 轴心抗压强度处的切线弹性模量来表征其弹性模量与 CA 砂浆组成之间的关系。



σ is stress; ε is strain.

图 1 CA 砂浆的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of CA mortar

文献[14, 17–22]针对 CA 砂浆静态力学性能主要集中于其抗压强度，为获得不同配比 CA 砂浆静态弹性模量数据，测试了养护龄期为 180 d，物理性能和施工性能均满足“暂行技术条件”[23]要求的 CA 砂浆力学性能。在硬化沥青水泥胶凝体系中，其主要组成为水泥水化物、毛细孔和沥青及自由水，其在浆体中的体积含量及 CA 砂浆力学性能参数见表 4 和表 5。

2.2 CA 砂浆的微细观结构及力学模型分析

对 CA 砂浆进行 BSE 和 SEM 分析，结果见图 2，在 CA 砂浆基体中，水泥凝胶体和沥青相混合，砂被包裹在其中，同时浆体中充满大量微小的气孔。CA 砂浆经长期(1 个月)沥青溶出处理后 BSE 及 SEM 结果(图 3)表明，对于 II 型 CA 砂浆沥青被溶出后，

表 4 基于文献数据 CA 砂浆硬化浆体组成计算值及其力学性能

Table 4 Composition and mechanical properties of CA mortar hardened slurry calculated based on the literature data

W/C ratio	A/C ratio	α	V_{CH}	V_{cw}	V_{ap}	x	σ/MPa	References
0.67	1.00	0.97	0.334	0.132	0.497	0.347	1.75	[14]
0.67	0.90	0.97	0.352	0.139	0.471	0.366	2.53	[14]
0.67	0.70	0.97	0.393	0.155	0.409	0.41	4.26	[14]
0.60	0.90	0.97	0.366	0.105	0.489	0.381	2.55	[14]
0.55	0.70	0.97	0.423	0.090	0.441	0.444	4.35	[14]
0.71	0.77	0.80	0.305	0.208	0.423	0.325	1.98	[17]
0.74	0.80	0.80	0.295	0.218	0.425	0.314	1.87	[17]
0.76	0.83	0.80	0.287	0.223	0.430	0.306	1.83	[17]
0.55	0.30	0.97	0.566	0.120	0.253	0.603	19.26	[18]
0.45	0.30	0.97	0.619	0.037	0.276	0.664	24.90	[18]
0.65	0.30	0.97	0.521	0.189	0.233	0.553	21.90	[18]
0.70	0.86	0.97	0.354	0.155	0.452	0.368	3.61	[18]
0.61	0.86	0.97	0.372	0.113	0.475	0.387	4.69	[18]
0.80	0.86	0.97	0.336	0.198	0.429	0.348	4.56	[18]
0.50	0.35	1.00	0.584	0.066	0.295	0.618	21.00	[19]
0.60	0.35	1.00	0.538	0.140	0.272	0.566	19.40	[19]
0.60	0.20	1.00	0.609	0.158	0.176	0.646	29.60	[19]
0.50	0.30	0.80	0.488	0.145	0.264	0.544	16.70	[20]
0.52	0.40	0.80	0.441	0.147	0.318	0.487	12.85	[21]
0.56	0.70	0.80	0.347	0.141	0.438	0.375	6.64	[21]
0.60	0.90	0.80	0.302	0.145	0.489	0.322	3.21	[21]
0.40	0.30	0.80	0.536	0.061	0.290	0.604	15.90	[22]
0.50	0.30	0.80	0.488	0.145	0.264	0.544	15.80	[22]
0.60	0.30	0.80	0.448	0.215	0.242	0.495	13.80	[22]
0.70	0.30	0.80	0.414	0.275	0.224	0.453	13.40	[22]
0.60	0.00	0.80	0.591	0.284	0.000	0.675	37.20	[22]
0.60	0.10	0.80	0.534	0.257	0.096	0.602	26.60	[22]
0.60	0.50	0.80	0.385	0.185	0.347	0.420	8.40	[22]
0.60	0.70	0.80	0.338	0.163	0.427	0.364	2.60	[22]

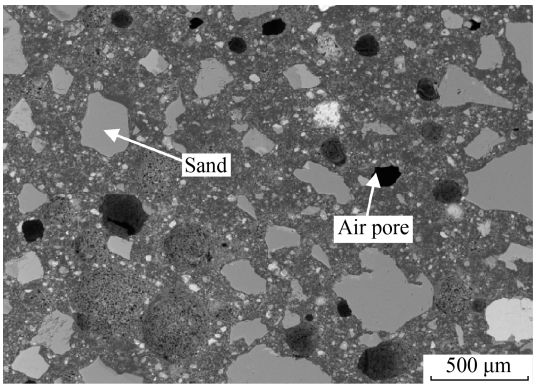
Notes: W/C is water to cement; A/C is asphalt to cement. α is degree of cement hydration; V_{CH} is volume fraction of cement hydrate (including gel pores) in hardened cement asphalt mortar; V_{cw} is volume fraction of capillary water (capillary pore); V_{ap} is volume fraction of asphalt in hardened cement asphalt mortar; x is gel-space ratio; σ is compressive strength of mortar.

表 5　基于试验 CA 砂浆硬化浆体组成计算值及其力学性能

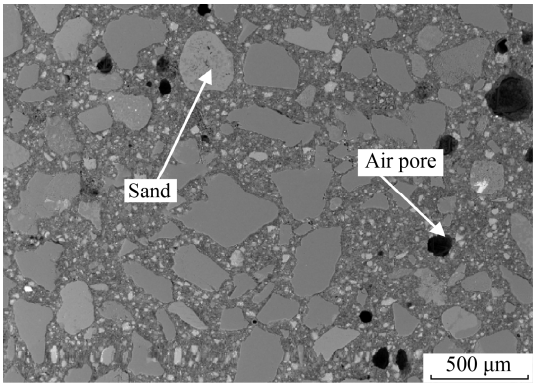
Table 5　Composition and mechanical properties of CA hadened mortar calculated based on test resilts

Sample No.	α	V_{CH}	V_{cw}	V_{ap}	x	σ/MPa	E/MPa
1	0.97	0.343	0.277	0.343	0.357	1.75	391
2	0.97	0.376	0.236	0.347	0.392	3.53	525
3	0.97	0.385	0.241	0.332	0.402	2.67	450
4	0.97	0.376	0.236	0.347	0.392	2.59	419
5	0.97	0.366	0.229	0.365	0.381	2.30	364
6	0.97	0.440	0.197	0.314	0.462	4.48	788
7	0.97	0.427	0.191	0.336	0.447	4.29	717
8	0.97	0.414	0.185	0.356	0.433	3.50	621
9	0.97	0.403	0.181	0.372	0.422	3.05	466
10	0.97	0.391	0.175	0.390	0.409	2.53	461
11	0.97	0.440	0.197	0.314	0.462	4.40	767
12	0.97	0.427	0.191	0.336	0.447	3.44	624
13	0.97	0.414	0.185	0.356	0.433	3.19	586
14	0.97	0.403	0.181	0.372	0.422	2.65	496
15	0.97	0.391	0.175	0.390	0.409	2.70	415
16	0.97	0.381	0.171	0.407	0.396 934	2.27	393

Notes: E is tangent modulus



(a) Type I

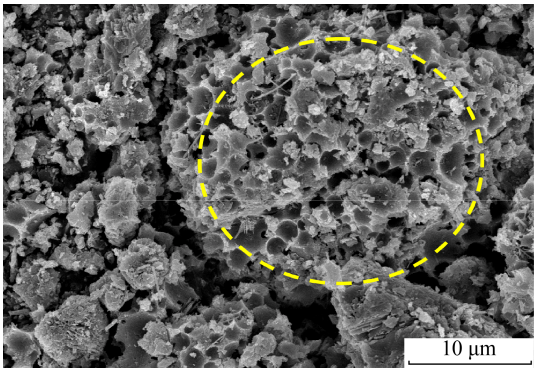


(b) Type II

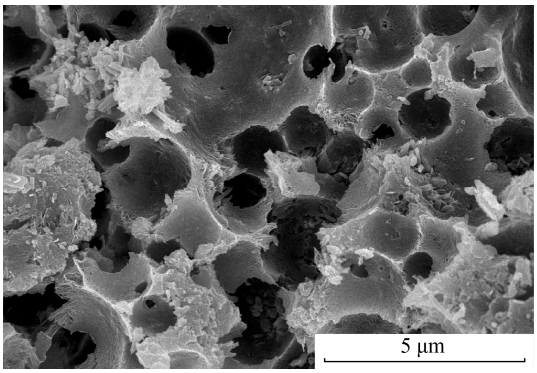
图 2　I 型(a)和 II 型(b) CA 砂浆沥青未溶出处理的 BSE

Fig. 2　BSE of CA mortars (Type I (a) and Type II(b)) without dissolution treatment

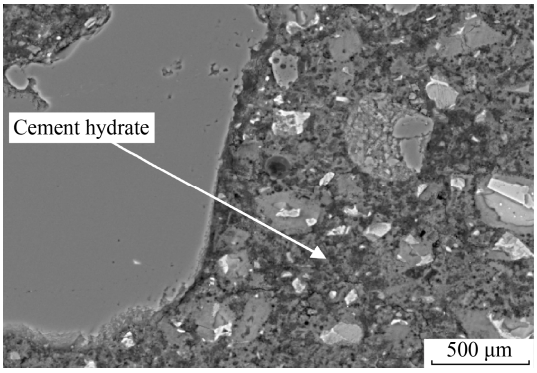
水泥胶凝体为连续骨架将砂粒包裹(图 3b)。I 型 II 型凝胶体上都观察到许多直径 5 μm 左右的球形空洞，这可能是沥青颗粒被溶出后而留下，说明沥青



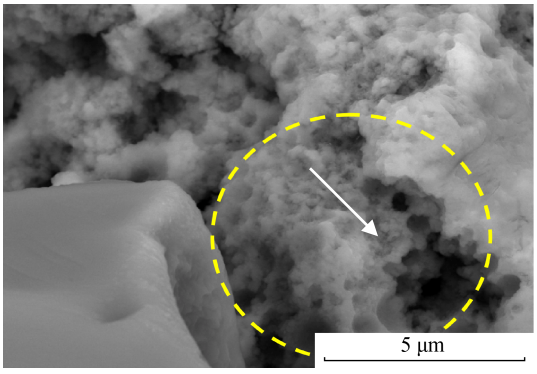
(a) Type I CA mortar, SEM



(b) Type I CA mortar, SEM



(c) Type II CA mortar, BSE



(d)Type II CA mortar, BSE

图 3　沥青溶出处理后的 CA 砂浆 BSE 及 SEM 分析

Fig. 3　SEM and BSE images of CA mortars after dissolution treatment

可能并未完全包裹水泥颗粒。而 C-S-H 凝胶作为硅酸盐水泥水化物的主要组成部分，其与沥青之间的相互作用与 CA 砂浆微结构的形成密切相关，研究表明沥青与 C-S-H 凝胶之间没有发生插层反应和“开孔”效应，没有改变 C-S-H 凝胶的微孔结构和生成新物相，即沥青相和 C-S-H 凝胶为简单的物理混合[24]。因此，CA 砂浆可视为沥青、水泥胶凝体、砂粒组成的多相复合材料，砂粒悬浮在沥青水泥胶浆中。

基于上述 CA 砂浆微观结构，采用 Hashin 提出用于描述多相复合材料的力学特性的复合球模型[25]。如图 4 所示，此模型由一系列尺寸渐变的球(砂粒)夹杂嵌入在连续的基体相(水泥-沥青胶凝体系)中组成。尽管每个复合球模型的大小并不一样，但 a_n/b_n(a_n 为砂粒半径；b_n 为复合球半径)为一常数。

进行单轴受压试验时，砂粒与沥青水泥胶凝浆体受到的应力相等。将沥青水泥砂浆简化为由沥青水泥浆体和骨料组成的两相复合材料，建立材料复合模型(图 5)。若将沥青视为孤立体存在于水泥浆体中，则沥青水泥浆体可简化为由沥青和水泥浆体(含毛细孔)组成的材料复合模型(图 5，Model 1)。若将沥青视作气孔分布于硬化水泥浆体中，则沥青水泥浆体可简化为由水泥浆体和气孔(毛细孔+沥青)组成的材料复合模型(图 5，Model 2)。由于 Pouliot 等[26]认为在水泥乳化沥青砂浆中，沥青的掺入将大幅度的降低砂浆的强度，分布在刚性基体中沥青应被看作是气孔，其对砂浆强度和弹性模量的贡献比较有限，即在较低加载速度下，沥青可认为有应变行为，而没有应力行为[27]。

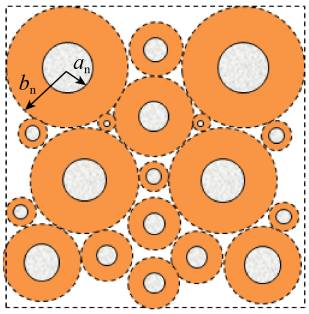


图 4 复合球模型

Fig.4 Composite ball model

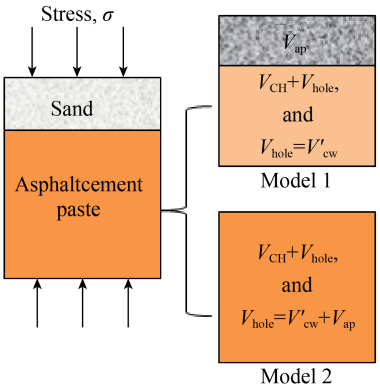


图 5 沥青水泥浆体-砂粒复合体系受力示意图

Fig. 5 Stress diagram of asphalt cement slurry-sand composite system

根据 Huck 定律：

$$\sigma=\varepsilon E,\ \sigma=\sigma_B=\sigma_s \tag{1}$$

$$\varepsilon_{CA}=\varepsilon_B+\varepsilon_s \tag{2}$$

$$\varepsilon_{CA}=\sigma/E_B+E_s \tag{3}$$

因为 $E_s \gg E_B$，所以：$\sigma/E_B \gg \sigma/E_s$ (4)

$$E_B \gg E_s \tag{5}$$

又：$\varepsilon_{CA} \approx \varepsilon_B$ (6)

$$\sigma=\varepsilon_{CA}E_{CA}=\varepsilon_B E_B \tag{7}$$

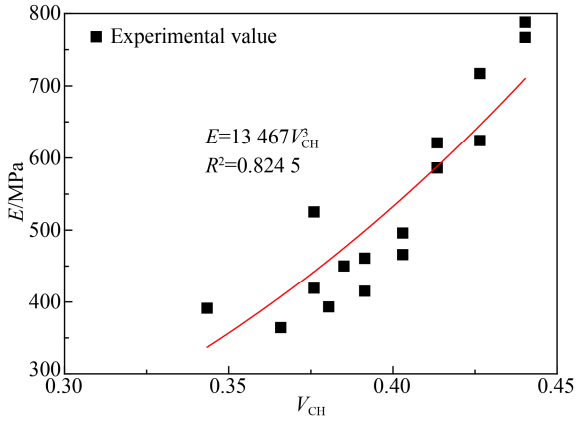
因此：$E_{CA} \approx E_B$ (8)

2.3 CA 砂浆弹性模量分析

Verbeck 试验的结果表明水泥石弹性模量与孔隙率存在一定关系(式 9)。如图 6 所示，CA 砂浆的弹性模量 E_{CA} 与水泥水化物体积分数 V_{CH} 也存在相似的幂函数关系，表明沥青在硬化水泥浆体中可视为气孔(也验证了 Pouliot 等的假设)，其对 CA 砂浆弹性模量 E_{CA} 的贡献十分有限。

$$E=E_0(1-P_c)^3 \tag{9}$$

式中：E 为水泥石的弹性模量；E_0 为孔隙率为零的弹性模量，水化凝胶体的弹性模量约为 14 GPa；P_c 为孔隙率，$1-P_c \approx V_{CH}$。



Asphalt is regarded as air pore.

图 6 CA 砂浆弹性模量 E 与水泥水化物体积分数 V_{CH} 的关系(沥青视为气孔)

Fig. 6 Relationship between elastic modulus E of cement mortar and volume fraction V_{CH} of cement hydrate

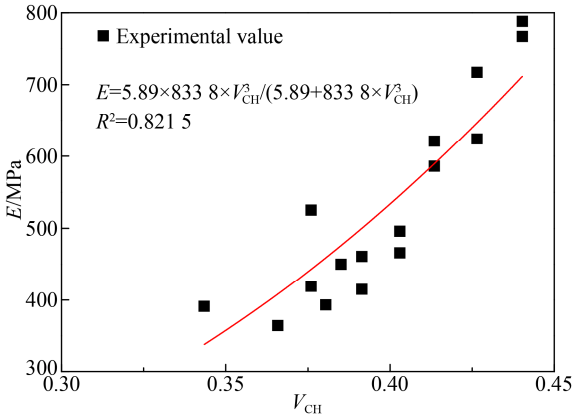
若将沥青视为低模量固体穿插于水泥浆体中，则沥青水泥浆体又可简化为由沥青和水泥浆体组成的材料复合模型(图 5，Model 1)。水泥沥青浆体弹性模量 E_B 应满足式(10)：

$$1/E_B=1/E_c+1/E_A \tag{10}$$

根据 Verbeck 试验的结果 $E_c=E_0(1-P_c)^3$ (式 9)可得 CA 砂浆弹性模量 E_{CA} 另一种数学表达式(11)：

$$E_{CA}\approx E_B=\frac{E_A\cdot E_0(1-P_c)^3}{E_A+E_0(1-P_c)^3}=\frac{E_A\cdot E_0(V_{CH})^3}{E_A+E_0(V_{CH})^3} \tag{11}$$

从图 7 可看出，试验结果与公式(11)有较好的相关性(R^2=0.821 5)，说明沥青可能以穿插存在于水泥浆体中，CA 砂浆弹性模量 E_{CA} 由沥青弹性模量 E_A 和水泥浆体弹性模量 E_0 共同决定，拟合结果 E_A=5.89 MPa 符合文献[28]试验结果(E_A=4~8 MPa)，相比水泥浆体弹性模量 E_0=8 338 MPa，E_{CA} 仍主要取决于 E_0。



Asphalt is regarded as low modulus composition phase.

图 7　CA 砂浆弹性模量 E 与水泥水化物体积分数 V_{CH} 的关系(沥青视为低模量组成相)

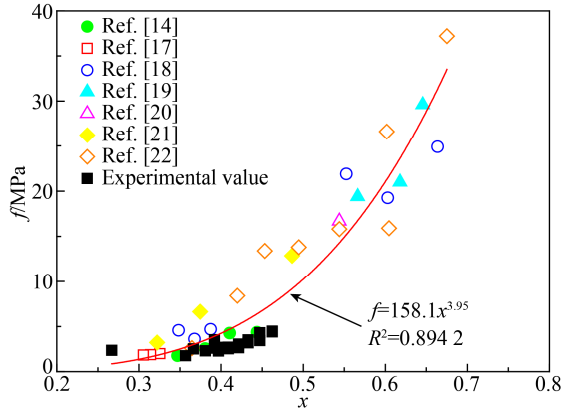
Fig. 7　Relationship between elastic modulus E of cement mortar and volume fraction V_{CH} of cement hydrate

2.4　CA 砂浆抗压强度分析

T.C. Powers[14]基于实验和理论分析得到水泥石的强度与胶空比 x 存在幂函数关系(式 12)，且研究表明 CA 砂浆抗压强度 f 与水泥浆体密切相关[26]。如图 8 所示，若将沥青视为气孔存在于硬化水泥浆体中，抗压强度 f 与胶空比 x 也存在相似的幂函数关系。因此，沥青在硬化水泥浆体中可视为气孔，其对 CA 砂浆抗压强度 f 的贡献比较有限。

$$f=f_0x^n \tag{12}$$

式中：f 为水泥石的抗压强度；f_0 为毛细孔为零(即 x=1)时水泥石的强度；n 为试验常数，一般为 2.6~3.0；x 为凝胶体的体积/水泥浆体所占空间。



Asphalt is considered as pore.

图 8　CA 砂浆抗压强度 f 与胶空比 x 的关系

Fig. 8　Relationship between compressive strength f of CA mortar and gel-space ratio x

若将沥青视为低模量黏性固体时，CA 砂浆为一种典型的黏弹性材料[29]，则适用于黏弹性固体的 Kelvin 模型[30](式 13)可作为其基体模型，模型中的弹性体视为 CA 砂浆中硬化水泥浆体，黏性体视为沥青相。

$$\sigma=E\varepsilon+\eta\theta \tag{13}$$

式中：σ 为应力；E 为弹性模量；ε 为应变；η为 CA 砂浆黏性系数；θ 为应变率。

如图 9 所示，CA 砂浆抗压强度 f 与水泥水化物体积分数 V_{CH} 存在明显的幂函数关系。研究表明硬化水泥浆体抗压强度与(1–孔隙率 P)存在幂函数关系[31]式(14)。因此，式(13)中描述弹性体的部分($E\varepsilon$)可近似为式(14)。文献[29]表明 CRTSII 型 CA 砂浆和 CRTSI 型 CA 砂浆在常规应变率下的黏性系数 η 分别为 1 000 MPa·s 和 300 MPa·s，可认为不同配比 CA 砂浆其黏性系数 η 在该区间(300~1 000 MPa·s)变化，CA 砂浆抗压强度测试时加载速率为 0.5 mm/s 左右，其应变率为 1.7×10^{-4} s^{-1}，故(式 13)中 $\eta\theta$ 取值范围为 0.05~0.17 MPa，该项可认为是黏性体(沥青)对 CA 砂浆强度 f 的贡献，因其数值远小于 CA 砂浆抗压强度 f，简化为常数项 c (0.05~0.17 MPa)。

$$\sigma_c=\sigma_0(1-P)^n \tag{14}$$

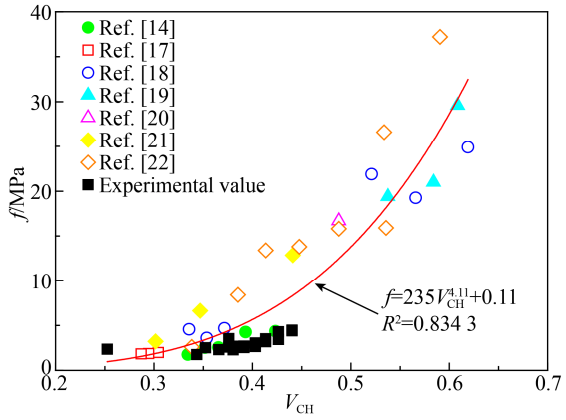
式中：σ_c 为硬化水泥浆体抗压强度；σ_0 为孔隙率 P 为零时硬化水泥浆体抗压强度；P 为孔隙率，$1-P\approx V_{CH}$；n 为常数。

因此，式(13)可简化为式(15)。该式可用于表征 CA 砂浆抗压强度 f 与水泥水化物体积分数 V_{CH} 的关系。

$$\sigma=\sigma_0(V_{CH})^n+c \tag{15}$$

式中：σ_0 为孔隙率 P 为零时硬化水泥浆体抗压强度，

取值为 235 MPa[14]；V_{CH} 为水泥水化物体积分数；c 为常数。



Asphalt is regarded as low modulus composition phase.

图 9 CA 砂浆抗压强度 f 与水泥水化物体积分数 V_{CH} 的关系(沥青视为低模量组成相)

Fig. 9 Relationship between compressive strength f of CA mortar and volume fraction V_{CH} of cement hydrate

若将 CA 砂浆中的沥青视为气孔存在时，胶空比模型 $f=f_0x^n$ 可用于表征 CA 砂浆抗压强度 f 与胶空比 x 的关系(图 8)，水泥石弹性模量 E 与孔隙率 P_c 的模型 $E=E_0(1-P_c)^3$ 亦可用于表征 CA 砂浆弹性模量 E_{CA} 与水泥水化物相体积分数 V_{CH} 的关系(图 6)，CA 砂浆在承受静态荷载时低模量的沥青仅起到胶凝体骨架的填充作用，其静力学性能主要取决于高模量的水泥水化物凝胶相。根据 CA 砂浆静态力学性能(抗压强度 f 和弹性模量 E_{CA})与组成参数的关系，并结合 CA 砂浆 BSE 结果(图 2 和图 3)，对 CA 砂浆微结构可做如下推断：CA 砂浆硬化浆体中水泥水化物仍为连续相并构成复合胶凝体骨架，沥青穿插其中，沥青对 CA 砂浆静态抗压强度 f 和静态弹性模量 E_{CA} 贡献比较有限，可视为气孔存在[26]。

然而沥青作为一种黏弹性材料，其温度敏感性、速度敏感性等不容忽视。孔祥明等[8]研究表明 CA 砂浆的弹性模量和抗压强度随温度的升高和沥青含量的增大而降低。王平等[32]研究表明 CA 砂浆具有明显的应变率敏感性，随着应变率的增大，其动态抗压强度、弹性模量和峰值应力处应变均随之增加。图 10 为 CA 砂浆应力松弛曲线，其中曲线 1、2、3、4 的松弛特征为：松弛时的应变均大于屈服应变，应力松弛较快，且趋于 0，此外尽管松弛时的应力差别较大，但除松弛开始的几秒钟外，松弛曲线几乎重合。曲线 5、6 的松弛征为：松弛时的应变均小于屈服应变，松弛较慢，且趋于某个大于 0 的值，曲线不重合。即 CA 砂浆特屈服前呈黏弹性固体特征，而屈服后呈黏弹性液体特征，说明屈服前等效结构中存在弹簧元件，而屈服后，可能该弹簧元件被破坏掉了。因此，沥青对 CA 砂浆表现出的粘弹性行为具有重要影响，在研究 CA 砂浆动态力学性能时沥青的贡献不容忽视。

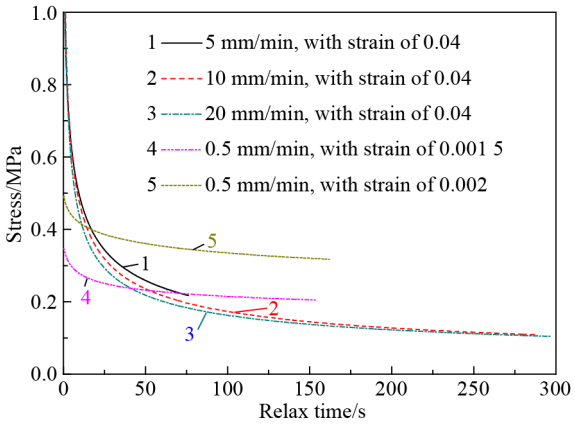


图 10 CA 砂浆应力松弛曲线

Fig. 10 Relaxation curves of CA mortar stress

3 结论

1) 沥青溶出处理后，其水泥水化产物表面存在大量直径约 5 μm 的球形空洞，表明乳化沥青颗粒吸附于水泥水化产物表面，与水化产物构成复合胶凝体，砂粒被包裹其中。

2) CA 砂浆静态抗压强度 f 与胶空比 x 的关系可用幂函数 $f=f_0x^n$ 表征，静态弹性模量 E_{CA} 与水泥水化物相体积分数 V_{CH} 的关系可用公式 $E=E_0V_{CH}^3$ 表征，沥青视为孔隙时，试验数据亦符合上述关系式，表明沥青对 CA 砂浆静态抗压强度和弹性模量 E_{CA} 的贡献有限。

3) 对于 I 型和 II 型 CA 砂浆，力学模型分析表明水泥水化物相体积分数 V_{CH} 是影响 CA 砂浆弹性模量 E_{CA} 和抗压强度 f 的重要参数，水泥水化物为连续相并构成复合凝胶体骨架，沥青穿插其中。

参考文献:

[1] KAZUYOSI O, YOSIO I. Compressive strength of the CA mortar and its temperature–susceptibility[J]. Memoirs Faculty Technol, 1976, 10(2): 1–13.

[2] ZENG X H, XIE Y J, DENG D H. Conductivity behavior of the fresh CA mortar and its relationship with the fluidity properties[J]. Constr Build Mater, 2012, 36: 890–894.

[3] WANG Q, YAN P Y, RUHAN A, et al. Strength mechanism of cement asphalt mortar[J]. J Mater Civ Eng, 2011, 23(9): 1353–1359.

[4] WANG Y, YUAN Q, DENG D, et al. Measuring the pore structure of cement asphalt mortar by nuclear magnetic resonance[J]. Constr Build Mater, 2017, 137: 450–458.

[5] XIE Y J, FU Q, ZHENG K R, et al. Dynamic mechanical properties of cement and asphalt mortar based on SHPB test[J]. Constr Build Mater, 2014, 70: 217–225.

[6] XIE Y J, FU Q, LONG G C, et al. Creep properties of cement and asphalt mortar[J]. Constr Build Mater, 2014, 70: 9–16.

[7] FANG L, DENG D H, PENG J W, et al. Study of dynamic mechanical properties on cement asphalt mortar of high elastic type[J]. Adv Mater Res, 2014, 1049/1050: 346–353.

[8] KONG X M, LIU Y L, ZHANG Y R, et al. Influences of temperature on mechanical properties of cement asphalt mortars[J]. Mater Struct, 2014, 47(1/2): 285–292.

[9] 杨进波, 阎培渝, 孔祥明, 等. 水泥沥青胶凝材料的硬化机理研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 53: 1406−1412.
YANG J B, YAN P Y, KONG X M, et al. Sci China Tech Sci (in Chinese), 2010, 53: 1406−1412.

[10] 王涛, 胡曙光, 王发洲, 等. 沥青乳液加料顺序影响CA砂浆早期强度的机理研究[J]. 铁道建筑技术, 2008(1): 1–3.
WANG Tao, HU Shuguang, WANG Fazhou, et al. Railway Constr Technol (in Chinese), 2008(1): 1–3.

[11] 翁智财, 谢永江, 郑新国, 等. W/C 和 A/C 对水泥乳化沥青复合胶凝材料水化的影响[J]. 铁道建筑, 2011(11): 128–131.
WENG Zhicai, XIE Yongjiang, ZHENG Xinguo, et al. Railway Eng (in Chinese), 2011(11): 128–131.

[12] TIAN Q, YUAN Q, FANG L, et al. Estimation of elastic modulus of cement asphalt binder with high content of asphalt[J]. Constr Build Mater, 2017, 133: 98–106.

[13] VERBECK G J. Pore Structure: Portland Cement[M] Assoc R & D Lab Bull, 1966.

[14] POWERS T C, BROWNYARD T L. Studies of the properties of hardened Portl and cement paste[J]. J Am Concr Inst (proc), 1947, 33: 1–6.

[15] 邓德华, 田青, 刘赞群, 等. 高速铁路用水泥乳化沥青浆体的物理结构[J]. 中国科学:技术科学, 2014,44(7): 661–671.
DENG D H, TIAN Q, LIU Z Q, et al. Sci Sin Tech (in Chinese), 2014, 44(7): 661–671.

[16] POWERS T C, BROWNYARDS T L. Studies of the Physical Properties of Hardened Cement Paste[C]. Chicago: Portland Cement Association, Research Laboratories, 1948. 101–132, 249–336, 469–505, 549–602, 669–712, 845–880, 933–99.

[17] 蔡锋良. 水泥沥青复合硬化浆体孔结构特点及表征. 硕士学位论文, 中南大学, 2013.
CAI Fengliang. Characteristization of Pore Structures of Hardened Cement-asphalt Pastes (Dissertation, in Chinese). Central South University, 2013.

[18] WANG Y, YUAN Q, DENG D, et al. Modeling compressive strength of cement asphalt composite based on pore size distribution[J]. Constr Build Mater, 2017, 150: 714–722.

[19] WANG Q, YAN P, KONG X, et al. Compressive strength development and microstructure of cement-asphalt mortar[J]. J Wuhan Univ Technol, 2011, 26(5): 998–1003.

[20] HU Shuguang, ZHANG Yunhua, WANG Fazhou. Effect of temperature and pressure on the degradation of cement asphalt mortar exposed to water[J]. Constr Build Mater, 2012, 34: 570–574.

[21] 彭涛, 傅强. 复杂应力条件下水泥沥青砂浆徐变特性试验研究[J]. 世界科技研究与发展, 2013, 35(1): 15–20.
PENG Tao, FU Qiang. World SCI-Tech R&D (in Chinese), 2013, 35(1): 15–20.

[22] 张良. 纳米SiO_2对CA砂浆材料性能的影响及作用机理研究[D]. 浙江大学, 2017.
ZHANG Liang. Effect and Mechanism of Nano-SiO_2 on Properties of Cement Asphalt Mortar (Dissertation, in Chinese), Zhejiang University, 2017.

[23] 客运专线铁路 CRTSI 型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆暂行技术条件[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
Temporary specification for CRTS I type slab ballastless track cement emulsified asphalt mortar for passenger dedicated railway (in Chinese). Beijing: China Railway Press, 2008.

[24] 曾晓辉, 朱华胜, 潘璋, 等. 乳化沥青对水化硅酸钙孔结构及微观形貌影响[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5): 87–94.
ZENG Xiaohui, ZHU Huasheng, PAN Zhang, et al. J Build Mater (in Chinese), 2019, 22(5): 87–94.

[25] HASHINZ. The Elastic Moduli of heterogeneous materials[J]. J Appl Mech, 1962, 29(1): 2938–2945.

[26] POULIOT N, MARCHAND J, PIGEONM. Hydration mechanisms, microstructure, and mechanical properties of mortars prepared with mixed binder cement slurry-asphalt emulsion[J]. J Mater Civ Eng, 2003, 15(1): 54–59.

[27] 尹明. 水泥乳化沥青砂浆质量控制的相关问题研究. 中南大学, 2010.
YIN Ming. Study on quality Control of cement emulsified Asphalt mortar (Dissertation, in Chinese).Central South University, 2010.

[28] 单丽岩, 谭忆秋, 李晓琳. 沥青疲劳特性的研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(1): 190–193.
DAN Liyan, TAN Yiqiu, LI Xiaolin. J Wuhan Univ Technol (Traffic Sci Eng Ed) (in Chinese), 2011, 35(1): 190–1931.

[29] 傅强, 谢友均, 郑克仁, 等. CRTSII 型水泥乳化沥青砂浆力学性能的应变率效应及模型[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(8): 989–995.
FU Qiang, XIE Youjun, ZHENG Keren, et al. J Chin Ceram Soc, 2014, 42(8): 989–995.

[30] MARKOVITZAH. Theory of Viscoelasticity. An Introduction[M]. Academic Press, 1982.

[31] BALSHIN M Y. Relation of mechanical properties of powder metals and theirporosity and the ultimate properties of porousmetal ceramic materials[J]. Dokl Akad Nauk, SSSR, 1949, 67: 831–834.

[32] 王平, 王彪, 徐浩. 循环荷载历史下 CA 砂浆的动态受压试验研究[J]. 铁道工程学报, 2015(7): 29–33.
WANG Ping, WANG Wei, XUHao. J Railway Eng Soc (in Chinese), 2015(7): 29–33.