

## 水泥(粉煤灰)稳定煤气化多孔炉渣干缩抗裂性能研究

李庆宏<sup>1</sup>, 高鹏<sup>2\*</sup>, 王伟亚<sup>3</sup>, 赵慧静<sup>1</sup>, 刘喆<sup>1</sup>

(1. 山西路桥建设集团有限公司, 山西 晋城 048000; 2. 长治市武理工工程技术研究院; 3. 长治市交通运输局)

**摘要:**为了研究煤气化多孔炉渣制备的水泥(粉煤灰)稳定炉渣的干缩抗裂性能,该文对比分析了水泥稳定碎石、水泥稳定炉渣、水泥粉煤灰稳定炉渣的干缩应变、失水率和干缩抗裂系数。结果表明:与水泥稳定碎石相比,水泥稳定炉渣的最佳含水率高、失水周期长、干缩应变小,干缩抗裂系数明显提高;粉煤灰具有缓冲压力、填充密实、胶结骨料的作用,水泥粉煤灰稳定炉渣的劈裂强度高于水泥稳定炉渣,而干缩系数低于水泥稳定炉渣,因而具有更大的干缩抗裂系数。工程试验也表明,水泥(粉煤灰)稳定炉渣具有良好的干缩抗裂性。

**关键词:**道路工程; 干缩抗裂系数; 煤气化多孔炉渣; 水泥稳定; 水泥粉煤灰稳定

煤气化多孔炉渣是煤炭在煤气化炉中经最高温度 1 250 ℃ 反应后冷却形成的固态残渣,呈多孔结构,压碎值高、吸水率大,中国每年排放量可达 2 700 万 t,资源化利用途径少,基本采用填埋方式处理。研究利用多孔炉渣作集料制备路面基层材料是煤气化多孔炉渣资源化利用的发展方向。已有研究表明:尽管多孔炉渣部分替代天然集料会降低水泥稳定碎石的强度,但当炉渣掺量不超过 50% 时,仍可制备出强度满足要求的水泥稳定类路面基层材料。水泥稳定类路面基层材料具有强度高、板体性好、易于施工的优点,但也存在施工早期因集料级配不良、含泥量高、养护不到位等因素引起的干缩开裂问题,研究表明:基层材料含水量越高,产生干缩裂缝的概率就越高,但是关于水泥稳定碎石生活焚烧垃圾炉渣的干缩特性研究显示:炉渣掺量每增加 10%,混合料最佳含水率增大 1.2%,但掺入 30% 炉渣混合料抗干缩性却优于水泥稳定碎石。该文为探明水泥(粉煤灰)稳定炉渣路面基层材料的抗裂性,该文对比水泥稳定炉渣、水泥粉煤灰稳定炉渣和水泥稳定碎石的干缩性能和抗裂性。

## 1 试验材料

### 1.1 集料

试验用煤气化多孔炉渣(以下简称炉渣,PCGS)集料为原状炉渣破碎筛分制得,分为 0~5、5~15、15~25 mm 3 档;试验用天然集料为石灰岩制备而成,分

为 0~5、5~10、10~20、20~30 mm 4 档,均取自晋城市太行一号国家风景道高平市北部旅游大通道工程。炉渣集料与天然集料特性对比见表 1,不同规格集料的级配组成见表 2。

表 1 炉渣集料与天然集料特性

集料类型	粒径范围/mm	吸水率/%	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	压碎值/%	含泥量/%
炉渣集料	9.5~13.2	10.7	1 956	37.4	0
天然集料	9.5~13.2	1.2	2 641	23.2	1.2

### 1.2 结合料

试验用粉煤灰为普通燃煤电厂原状粉煤灰,其基本理化性能(表 3)满足 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》路面基层(底基层)用粉煤灰技术要求;试验用水泥为 P·C 42.5 级复合硅酸盐水泥。

### 1.3 固化剂

炉渣集料压碎值高,配制的路面基层材料强度低于水泥稳定碎石,为此选用某固废道路材料专用增强抗冻型固化剂来提高基层强度和耐久性。

## 2 试验方案

### 2.1 配合比设计

调整集料比例配制了合成级配相同的水泥稳定炉渣与水泥稳定碎石,并在水泥稳定炉渣基础上,采用 10% 粉煤灰替代炉渣集料形成了水泥粉煤灰稳定炉渣,3 种基层材料配合比如表 4 所示。

表 2 炉渣集料和天然集料级配

集料 类型	粒径范 围/mm	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											
		31.5	26.5	19	16	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
炉渣 集料	15~25	100	92	41	15	4	1	1	1	1	1	1	0
	5~15	100	100	100	92	74	7	1	1	1	1	1	0
	0~5	100	100	100	100	100	96	67	46	28	18	11	6
	20~30	100	65	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
天然 集料	10~20	100	100	92	73	5	1	1	1	1	1	1	0
	5~10	100	100	100	100	100	16	1	0	0	0	0	0
	0~5	100	100	100	100	100	98	58	38	22	14	8	4

表 3 粉煤灰理化性能

项目	(SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	烧失量/ %	通过率/%		H <sub>3</sub> / %	H <sub>7</sub> / %	H <sub>28</sub> / %
			0.3 mm	0.075 mm			
实测值	90	3	100	70	53	54	55
标准要求	≥70	≤20	≥90	≥70	—	—	—

注:H<sub>3/7/28</sub>表示粉煤灰 3、7、28 d 的活性指数。

表 4 配合比

基层类型	水泥用量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	碎石集 料/%	炉渣集 料/%	粉煤 灰/%	固化剂/ %
水泥稳 定碎石	126	100	0	0	0
水泥稳 定炉渣	126	0	100	0	0.5
水泥粉煤灰 稳定炉渣	126	0	90	10	0.5

表 5 击实结果及 7 d 无侧限抗压强度

基层类型	击实结果		7 d 无侧 限抗压强 度/MPa
	最大干密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	最佳含 水率/%	
水泥稳定碎石	2.345	5.8	6.1
水泥稳定炉渣	1.632	13.7	4.8
水泥粉煤灰稳定炉渣	1.645	14.0	6.2

2.2 干缩试验方法

根据表 4 试验结果制备了尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 的梁形试件,标准养护至 7 d 龄期后进行干缩试验。

3 试验结果与分析

(1) 击实结果及强度

3 种基层材料的击实结果和强度如表 5 所示。

结合表 1、5 可以发现:由于炉渣具有多孔、吸水率高特性,水泥稳定炉渣最佳含水率为 13.7%,较水泥稳定碎石提高 136%,水泥粉煤灰稳定炉渣与水泥稳定炉渣相近;通过优化级配以及添加固化剂,水泥稳定炉渣 7 d 无侧限抗压强度可达 4.8 MPa,较水泥稳定碎石降低 21%,添加粉煤灰后强度明显提高,水泥粉煤灰稳定炉渣与水泥稳定碎石抗压强度基本相同。

(2) 干缩应变

水泥稳定碎石、水泥稳定炉渣、水泥粉煤灰稳定炉渣干缩应变随干燥养生时间的变化趋势如图 1 所示。

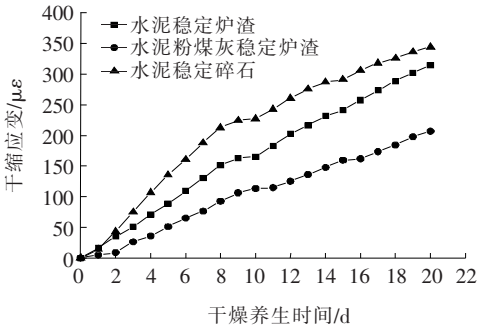


图 1 干缩应变与干燥养生时间的关系

图 1 表明:各基层材料的干缩应变均随龄期增加而不断增长,且呈现水泥粉煤灰稳定炉渣最小、水泥稳定炉渣次之,水泥稳定碎石最大的规律。7 d 龄期时,水泥稳定炉渣干缩应变为  $130.9 \times 10^{-6}$ ,较水泥稳定碎石降低 30.3%,加入粉煤灰后 7 d 干缩应变变为 76.6

$\times 10^{-6}$ ,较水泥稳定碎石降低 59.2%;20 d 龄期时,水泥稳定炉渣、水泥粉煤灰稳定炉渣干缩应变较水泥稳定碎石分别降低 8.6%、39.9%。由此可见,水泥稳定炉渣的干缩应变随龄期增长与水泥稳定碎石趋于接近,而粉煤灰可提高材料密实度,改善孔隙结构,抑制水分迁移,因而水泥粉煤灰稳定炉渣的干缩应变明显低于水泥稳定碎石。

(3) 失水率

水泥稳定碎石、水泥稳定炉渣、水泥粉煤灰稳定炉渣失水率随干燥养生时间的变化趋势如图 2 所示,并用养生浸水后试件含水率与失水率的差值表征材料内部剩余含水率,结果如表 6 所示。

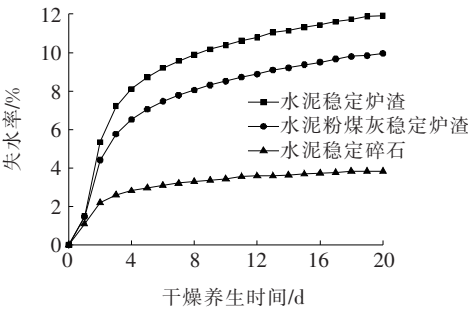


图 2 失水率与干燥养生时间的关系

表 6 剩余含水率与干燥养生时间的关系

基层类型	不同龄期(d)剩余含水率/%			初始含水率/%
	5	10	20	
水泥稳定炉渣	9.2	7.6	6.0	18.0
水泥粉煤灰稳定炉渣	10.9	9.5	8.0	18.0
水泥稳定碎石	3.8	3.3	3.0	6.8

由图 2 可得:各类基层材料早期失水速率较快,干燥养生 5 d 累计失水率分别达到养生后初始含水率的 39%~49%;干燥养生时间 20 d 后,水泥稳定碎石失

水速率趋于稳定,而水泥稳定炉渣初始含水率高,20 d 仍有 6.0%的剩余含水率,为水泥稳定碎石的 2 倍,粉煤灰具有填充密实、细化孔隙作用,因而水泥粉煤灰稳定炉渣的失水速率降低,释水周期进一步延长,可见炉渣路面基层材料具有保水性强、释水周期长的特点,有利于降低材料因失水产生的干燥收缩。

(4) 干缩抗裂系数

路面基层材料可用极限拉应变( $\epsilon_{\max}$ )与干缩系数( $\alpha_d$ )的比值干缩抗裂系数(W)来综合评价材料抗裂性能,根据研究,路面基层材料极限拉应变可用劈裂强度与抗压回弹模量的比值表征;图 3 为干缩应变随失水率增加的变化趋势,曲线斜率即为干缩系数(表 7)。

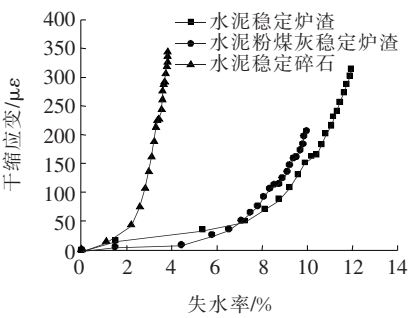


图 3 干缩应变与失水率的关系

从图 3 可知:水泥稳定碎石干缩应变与失水率曲线较陡,表明水泥稳定碎石干缩系数较大,明显高于水泥粉煤灰稳定炉渣。水泥稳定炉渣 7 d 干缩系数为  $13.7 \times 10^{-6}$ ,为水泥稳定碎石的 23.4%;加入粉煤灰后,7 d 干缩系数降低至  $9.8 \times 10^{-6}$ ,仅为水泥稳定碎石的 16.8%,这是因为炉渣为多孔结构,不仅具有较强吸水作用,还具有较强的保水性,可以在干燥环境下持续释放水分,补充因环境温度高、湿度小导致的水分蒸发,以及水泥水化消耗的水分,为基层提供良好的内养生条件。

表 7 干缩抗裂系数

基层类型	抗压回弹模量/MPa	劈裂强度/MPa	极限拉应变/ $\mu\epsilon$	干缩系数/ $(\times 10^{-6})$	干缩抗裂系数
水泥稳定碎石	936	0.52	555.6	58.3	9.5
水泥稳定炉渣	669	0.48	717.5	13.7	52.4
水泥粉煤灰稳定炉渣	785	0.57	726.1	9.8	74.1

从表 7 可以看出:水泥稳定炉渣的干缩抗裂系数较水泥稳定碎石提高 452%,可达 52.4,掺入粉煤灰后干缩抗裂系数进一步提高至 74.1。这是因为固化剂的增强作用,加之炉渣集料表面粗糙产生的嵌锁作用,

使得水泥稳定炉渣具有较高的劈裂强度,仅比水泥稳定碎石低 0.04 MPa,同时由于炉渣集料本身刚度较低,水泥稳定炉渣的抗压回弹模量低于水泥稳定碎石,因而水泥稳定炉渣具有较高的极限拉应变和较小的干

缩系数,所以其干缩抗裂系数明显高于水泥稳定碎石。掺入粉煤灰后,炉渣基层材料极限拉应变略有提高、干缩系数略有下降,因而干缩抗裂性更优。

4 抗裂性能的工程观测

为研究炉渣路面基层的抗裂性,采用表8所示配合比铺筑了200 mm厚水泥稳定炉渣试验段,未覆盖薄膜或者土工布养护,仅采用洒水的方式在最高温度为30℃的夏季养生观测28 d,并在第5 d进行钻芯取样检测。

表8 试验段配合比

水泥/(kg·m <sup>-3</sup> )	炉渣集料/%	固化剂/%
126	100	0.5

工程试验表明:水泥稳定炉渣基层5 d钻芯取样完整,抗压强度可达4.5 MPa,洒水养生28 d未发现任何干缩开裂现象,而且水泥粉煤灰稳定炉渣路面基层已在山西省推广应用40 km,未发现一条干缩裂缝,充分表明炉渣路面基层具有良好的干缩抗裂性。

5 结论

为研究煤气化多孔炉渣制备的水泥(粉煤灰)稳定炉渣的抗裂性能,对比进行了水泥稳定碎石、水泥稳定炉渣、水泥粉煤灰稳定炉渣的一系列对比试验,得到以下结论:

- (1) 与水泥稳定碎石相比,水泥稳定炉渣早期干缩应变低于水泥稳定碎石,掺入粉煤灰后,干缩应变进一步降低。
- (2) 由于炉渣具有多孔特性,水泥(粉煤灰)稳定炉渣含水率高、储水性好,在干燥条件下释水周期长,失水收缩敏感性低。
- (3) 炉渣吸水率高,配制的水泥稳定炉渣干缩系数小,固化剂增强作用与炉渣集料嵌锁作用则有利于提高水泥稳定炉渣的劈裂强度,炉渣多孔特性降低了水泥稳定炉渣模量,所以水泥稳定炉渣干缩系数显著高于水泥稳定碎石;掺入粉煤灰可提高基层材料密实度,起到降低失水速率、提升抗拉强度的作用,因此水泥粉煤灰稳定炉渣干缩抗裂系数高于水泥稳定炉渣。

(4) 水泥稳定炉渣路面基层应用效果良好,工程观测表明炉渣路面基层具有优良的抗干缩、抗裂性能。

参考文献:

[1] 王辅臣,于广锁,龚欣,等.大型煤气化技术的研究与发展[J].化工进展,2009(2).

[2] 胡文豪.煤气化渣铝硅组分活化分离与资源化利用基础研究[D].中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所)硕士学位论文,2019.

[3] 章丽萍,温晓东,马圣存,等.煤间接液化残渣制备免烧砖研究[J].煤炭工程,2014(4).

[4] 普煜,马永成,陈樑,等.鲁奇煤气化炉渣在废水净化中的应用研究[J].工业水处理,2007(5).

[5] 刘转年,全海山,舒瑞,等.煤气发生炉煤气化炉渣改性和吸附性能[J].环境工程学报,2013(3).

[6] 李明明.垃圾焚烧灰渣在水泥稳定碎石层应用试验研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2019.

[7] 何昌轩.水泥稳定炉渣碎石混合料的疲劳特性[J].公路交通科技,2020(7).

[8] 刘栋,李立寒,崔华杰.水泥稳定炉渣碎石基层路用性能[J].同济大学学报(自然科学版),2015(3).

[9] 张向东,任昆.水泥稳定煤渣路面基层强度及导热性试验研究[J].非金属矿,2017(4).

[10] 张向东,任昆.水泥稳定煤渣填料的耐腐蚀性能试验研究[J].非金属矿,2017(5).

[11] 张华.水泥稳定碎石基层施工质量影响因素及控制措施[D].重庆交通大学硕士学位论文,2013.

[12] 李娟燕,周娟.水泥稳定碎石干缩研究进展简述[J].交通科技,2017(6).

[13] 魏建明,何兆益,李文广.水泥稳定碎石基层收缩特性试验研究[J].公路交通科技,2006(6).

[14] 蒋应军.水泥稳定碎石基层收缩裂缝防治研究[D].长安大学硕士学位论文,2001.

[15] 高鹏,李庆宏,田建平,等.煤气化炉渣路面基层材料研究与应用[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020(1).

[16] JTG/T F20—2015 公路路面基层施工技术细则[S].

[17] 黄煜镔,吕伟民.粉煤灰水泥稳定碎石基层材料的力学和收缩特性[J].公路,2006(11).

[18] 徐鸥明,王有贵,陈俊宇,等.掺粉煤灰水泥稳定碎石收缩特性研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2014(4).

[19] 陈潇,周明凯,沈卫国.SO<sub>3</sub>对水泥粉煤灰稳定碎石力学与抗干缩开裂性能的影响[J].建筑材料学报,2009(4).