

# 粉煤灰资源化特性及路面修复应用技术研究\*

张全国 张相锋 周春杰 杨群发 刘圣勇  
(河南农业大学) (发祥登封电厂) (河南农业大学)

**摘要:** 研究了粉煤灰的资源化特性, 提出了粉煤灰脱炭高值利用理论; 利用脱炭粉煤灰和高效早强减水剂的“双掺”技术, 进行了公路混凝土路面的修复技术研究; 结果表明脱炭粉煤灰用于混凝土路面替代水泥量可达 20%, 较好地解决了公路路面工程中直接利用粉煤灰所存在的主要问题。  
**关键词:** 粉煤灰; 资源化特性; 脱炭粉煤灰; 路面修复

中国是世界上最大的生产和消耗煤炭的国家, 特别是改革开放以来, 电力工业迅猛发展, 导致粉煤灰排放量逐年锐增, 预计到 2000 年粉煤灰的排放量将达到 1.6 亿吨。然而, 我国电厂排放的粉煤灰品质极不稳定, 有 80% 以上的粉煤灰烧失量超过 6%, 有的达到 20% 以上, 资源化性能较差, 极大地限制了粉煤灰的应用范围和数量, 是导致我国粉煤灰利用率偏低的重要原因。为开拓粉煤灰综合利用的新途径, 作者对粉煤灰资源化特性及高等级公路路面的修复工程应用技术进行了研究, 揭示出粉煤灰中的不同成分和形貌对其资源化特性的影响规律, 完成了粉煤灰脱炭<sup>[2]</sup>及脱炭粉煤灰混凝土配合比等方面的小型试验研究, 应用脱炭粉煤灰修筑了试验路面, 实际道路运营和技术性能检测结果表明, 该技术符合路面修复工程要求, 具有显著的社会效益、经济效益和环境效益。

## 1 粉煤灰资源化特性

### 1.1 粉煤灰的化学组成

对发祥登封电厂粉煤灰的化学成分分析(表 1)表明<sup>[1,2]</sup>, 粉煤灰中硅的含量最高, 其次是铝, 以复杂的复盐形式存在, 酸溶性较差。铁含量相对较低, 以氧化物形式存在, 酸溶性好。此外还有未燃尽的炭粒、CaO 和少量的 MgO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、SO<sub>3</sub> 等。

表 1 发祥登封电厂粉煤灰的化学成分

Tab 1 The chemical composition of fly ash from Faxiang Dengfeng Power Plant %

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O 及 K <sub>2</sub> O	烧失量
含量	48~57	20~25	<4	1.5~2.0	0.4~0.8	<0.8	1.0~1.5	10~15

粉煤灰中的有害成分是未燃尽炭粒, 其吸水性大, 强度低, 易风化, 不利于粉煤灰的资源化。粉煤灰中的 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对粉煤灰的火山灰性质贡献很大, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对降低粉煤灰的熔点有

收稿日期: 1999-04-14

\* 国家“九五”重点科技攻关项目(96-920-22-02)

张全国, 教授, CSAE 高级会员, 郑州市文化路 95 号 河南农业大学可再生能源农业部重点开放实验室, 450002

利,使其易于形成玻璃微珠,均为资源化的有益成分。

## 1.2 粉煤灰的颗粒组成

按照粉煤灰颗粒形貌,可将粉煤灰颗粒分为玻璃微珠、海绵状玻璃体(包括颗粒较小、较密实、孔隙小的玻璃体和颗粒较大、疏松多孔的玻璃体)及炭粒。我国电厂排放的粉煤灰中微珠含量不高,大部分是海绵状玻璃体,颗粒分布极不均匀。因此通过研磨处理,破坏原有粉煤灰的形貌结构,使其成为粒度比较均匀的破碎多面体,提高其比表面积,从而提高其表面活性,改善其性能的差异性,达到粉煤灰资源化的要求<sup>[1,2]</sup>。

## 1.3 粉煤灰效应

粉煤灰粒形圆整、表面光滑、粉度较细、质地致密,可有效降低水泥浆体的需水量,减水率可达4%~11%,同时,保水性和匀质性增强,初始结构得到改善。但当粉煤灰呈多孔粗粒状、含碳量过高时,粉煤灰往往丧失其形态优越性,使需水量增大。因此,要通过各种途径除去炭粒、提高细度、改善粉煤灰的形态效应。

粉煤灰是以酸性氧化物为主的玻璃相物质,它在水泥的水化产物形成的碱性环境中逐渐受到腐蚀,发生火山灰反应,形成C-S-H凝胶,该反应减弱了OH<sup>-</sup>的浓度,促进了水泥的水化反应,二者相互促进,对水泥石强度的增长起了重要作用。

粉煤灰颗粒本身的强度很高,厚壁空心微珠抗压强度在700MPa以上,粒度30μm以下的粉煤灰颗粒在水泥中可以相当于未水化水泥熟料微粒的作用。水化后期粉煤灰表面生成低铝的C-S-H凝胶,使界面粘结力增强,明显增强了水泥石的结构强度。

将粉煤灰进行综合处理,除去其有害成分,添加有益成分,改善其粒度,增大其表面活性,可以提高粉煤灰的资源化性能,拓宽其应用范围。

## 2 粉煤灰在路面修复工程中的利用

### 2.1 粉煤灰作为路面材料所存在的主要问题

目前,国内外公认只有优质粉煤灰才可直接作为路面材料。作者经过试验研究发现粉煤灰应用受到限制的主要原因是由粉煤灰本身的物理化学特性所致<sup>[3]</sup>。

1) 在于多数粉煤灰中含碳量较大,普遍在6%~15%之间。因为炭粒是煤粉在锅炉炉膛内的不完全燃烧所形成的,它不仅使煤粉的发热量减少,而且降低粉煤灰的品质。这类粉煤灰若不加处理即应用于路面工程将导致混凝土的需水量增加,密实度降低,孔隙率增大,还会明显地影响减水剂的掺量以及混凝土外观的颜色和均匀性。炭粒往往又会在泌水过程中逐渐与浆体分离,上升到混凝土的表面,影响公路面层混凝土的质量。所以,含碳量高是造成粉煤灰品质低劣且难以推广利用的主要原因。

2) 多数粉煤灰中粗颗粒组分过多,80μm方孔筛筛余一般在10%~30%,不符合混凝土混合料对粉煤灰的基本要求。粉煤灰的矿物研究和形貌研究表明,粉煤灰中较粗颗粒主要由游离炭粒及炭粒、疏松多孔玻璃体的共生体组成。而粉煤灰的细度是影响其品质的又一重要指标,通过改善其细度可以明显提高粉煤灰的比重、比表面积,降低混凝土的含气量,进而明显提高粉煤灰的工作性、强度、耐久性、耐磨性。而应用分离技术将含碳的粗颗粒分离出去,可以明显提高粉煤灰的细度,改善粉煤灰的品质,有利于粉煤灰混凝土早期强度的提高。

3) 粉煤灰作为路面材料要求浇筑的粉煤灰混凝土具有较好的耐磨性和耐久性。由于多数粉煤灰中存在较多的游离炭粒及炭粒与松散玻璃体的共生物,而炭粒的强度低,吸水大,在粉煤灰混凝土中易形成强度低,含气量大,耐磨性差等病害。通过脱炭技术,可使粉煤灰中的绝大

部分成分为玻璃微珠和颗粒较小、较密实、孔隙小的玻璃体,而这些成分具有强度高、耐磨性好、颗粒细等特点,有利于降低混凝土的含气量,提高混凝土的耐久性和耐磨性。

### 2.3 粉煤灰混凝土配合比优化试验

试验路段主要是在豫 03 号公路上进行水泥混凝土路面的修复工作,要求混凝土面板的 3 d 强度达到设计强度的 80%。作者在配合比设计中采用在混凝土中同时掺加粉煤灰和高效早强减水剂的“双掺”技术,在置换水泥方面采用超量系数  $K = 1.1$  的超量替代法,以期达到该工程的早强指标要求。粉煤灰混凝土混合料的拌制以基准混凝土混合料的坍落度和配合比为参照物,按等稠度的原则,进行了粉煤灰掺量为 10%、20%、30% 的粉煤灰混凝土混合料的拌制及抗压强度、抗折强度的试件制备。将制备的各试件在标准条件下养护到一定龄期后,在万能试验机上对其进行抗压强度和抗折强度试验。试验结果(表 2)表明,同一掺量的粉煤灰混凝土随着龄期的增加,强度增长速度均比基准混凝土快;随着粉煤灰掺量的增加,混凝土单位用水量有所减少,提高了混凝土的工作性和密实性,对其强度和耐久性有利;粉煤灰不同掺量的混凝土随龄期所形成的强度曲线有所不同。随着粉煤灰掺量的增加,混凝土早期强度有所下降。显然,粉煤灰掺量为 20% 的混凝土试件的强度增长和基准混凝土的强度增长相关性较好,可将其配合比(粉煤灰·水泥·砂·碎石 = 0.22·0.8·2.1·4,水灰比为 0.46)做为本次试验的最佳配合比。

表 2 C30 混凝土抗压强度和抗折强度试验结果

Tab 2 Compressive strength and bending strength of C30 concrete

试件序号	基准混凝土						脱炭粉煤灰混凝土					
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3
粉煤灰掺量/%	0			10			20			30		
配合比(粉煤灰·水泥·砂·石)	1·2.1·4			0.11·0.9·2.1·4			0.22·0.8·2.1·4			0.33·0.7·2.1·4		
水灰比	0.5			0.48			0.46			0.45		
减水剂/%	2			2.25			2.5			2.75		
龄期/d	3	7	28	3	7	28	3	7	28	3	7	28
抗压强度/MPa	28.5	30.0	32.2	27.9	29.5	33.0	27.4	29.3	33.6	25.1	27.6	33.8
抗折强度/MPa	3.4	4.2	4.6	3.3	4.1	4.7	3.2	4.0	4.5	2.9	3.5	4.3

### 2.3 粉煤灰混凝土路面的铺筑试验

作者在豫 03 号公路的郑密路段修复中进行了粉煤灰混凝土试验路的铺筑工作。修复路段的范围为 K 9+ 910 至 K 20+ 240,混凝土面板板厚 24 cm。设计要求在施工完成 4 d 后开放交通,即混凝土板 3 d 强度达到 C30 混凝土设计强度的 80%。试验路段分为掺粉煤灰路段和不掺粉煤灰路段两部分。路面的铺筑、质量检测按照国家工程标准进行,抗折强度的测试结果见表 3。工程竣工后,采用目前国际上通用的先进试验设备——Dynatest 800 FWD 落锤式弯沉仪进行无破损检测,其测试结果见表 4。表 4 中的中央弯沉基本反映了路面的综合强度,表明掺粉煤灰的路面强度与不掺粉煤灰的路面强度比较接近,相关性较好,符合国家路面工程标准要求。

表 3 郑密路补强试验段抗折强度检测结果

Tab. 3 The results of bending strength test on Zhengm i Road Renovation M Pa

分类	3 d		7 d		28 d	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
掺粉煤灰	3.68	0.159	4.02	0.167	31.9	1.697
未掺粉煤灰	3.38	0.161	4.12	0.214	32.1	1.657
设计值	3.38		4.02		30	

表 4 郑密路补强试验段中央弯沉检测结果

Tab. 4 The results of central deflection test on Zhengm i Road Renovation  $\mu\text{m}$ 

板况	2 t 荷载		3 t 荷载		4 t 荷载		5 t 荷载	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
掺粉煤灰	34.2	0.15	53.5	0.13	71.8	0.18	94.8	0.18
未掺粉煤灰	34.1	0.11	53.9	0.14	71.4	0.15	90.6	0.16
未补强	52.7	0.27	91.3	0.18	114.1	0.19	140.9	0.20
设计值							150.0	
总况	40.2	0.31	67.0	0.30	86.0	0.28	107.5	0.28

### 3 经济效益分析

利用脱炭粉煤灰修复公路路面时,在路面混凝土中可替代 20% 的水泥,每  $\text{m}^3$  路面混凝土产生直接经济效益为 23.85 元/ $\text{m}^3$ 。本试验路段的路面宽 26m,混凝土板厚 24 cm,每 km 需混凝土 6 240  $\text{m}^3$ ,即应用脱炭粉煤灰修复 1 km 公路路面所产生的直接经济效益可达 14.88 万元,经济效益十分显著。

利用脱炭粉煤灰还可为发电厂节省大量的粉煤灰排放处置费,并副产出含碳量超过 90% 的炭粉,不仅可作为高热值优质燃料出售,而且进一步加工即成工业用炭黑的替代产品,直接向塑料厂、橡胶厂等大量使用炭黑的企业出售,产生高附加值的经济效益。

### 4 结束语

本文从研究粉煤灰的资源化特性入手,将粉煤灰中的未燃尽炭粒脱除,从根本上解决了劣质粉煤灰需水量大,泌水多,颗粒过粗等缺陷,为粉煤灰的资源化利用开辟了一条新途径。粉煤灰预处理后产生的炭粉用于制备碳黑,剩余的脱炭粉煤灰用于公路路面的修复工程,并且在大量掺粉煤灰条件下所修筑的路面质量达到了国家工程标准,具有显著的经济效益和环境效益,对缓解能源危机,减少环境污染及推动资源综合利用具有重大意义。

#### [参 考 文 献]

- [1] 沈旦申 粉煤灰混凝土 北京: 中国铁道出版社, 1989 55~ 155
- [2] 冯乃谦 高性能混凝土 北京: 中国建筑工业出版社, 1996 91~ 94
- [3] 朱战良, 邹 闯 粉煤灰混凝土在公路工程中的应用 公路, 1997, 9: 1~ 7

## Fly Ash Resource Characteristics and Application on Concrete Pavement Renovation

ZHANG Quan-guo   ZHANG Xiang-feng                      ZHOU Chun-jie

(Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002)      (Faxiang Diefeng Power Plant)

YANG Qun-fa   LU Sheng-yong

(Henan Agricultural University)

**Abstract:** The characteristics of fly ash as a resources were studied. The theory of separating carbon from fly ash and utilizing them was presented. The equipment of separating carbon from fly ash through high voltage and static field was produced. Using "double-mixed" technology of separated-carbon-fly-ash and decreasing aqua of highly effect and early strong, the renovation technologies of highway concrete pavement were studied. The separated-carbon-fly-ash can highly improve the property of concrete pavement. And the quantity of fly ash replacing cement reaches 20%. The main problems of utilizing fly ash directly on pavement engineering were solved preferably.

**Key words:** fly ash; resource characteristics; separated-carbon-fly-ash; pavement renovation