

文章编号:1007-9629(2021)03-0656-07

脱硝粉煤灰中 NH_4HSO_4 在粉煤灰-水泥复合体系的留存释放规律及影响

刘振华, 王 智, 贺云飞, 秦洪一

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045)

摘要: 通过外掺 NH_4HSO_4 的模拟手段,研究了脱硝粉煤灰中 NH_4HSO_4 在粉煤灰-水泥复合体系(简称复合体系)的留存与释放行为规律,以及二者对复合体系的影响。结果表明:脱硝粉煤灰中的 NH_4HSO_4 在复合体系中分解,释放出氨气,部分留存在复合体系中。将 30% 脱硝粉煤灰掺入水泥中,所留存的 NH_4HSO_4 对复合体系 pH 值的降低程度较小且集中在前 1 h,对复合体系后期 pH 值基本无影响;脱硝粉煤灰中的 NH_4HSO_4 对水泥水化的影响也集中在早期,降低了水泥水化放热峰、延缓了放热峰的出现,后期虽然水泥水化不断进行,但其对水泥水化热和水化产物基本无影响;随着氨含量的提高,复合体系氨气释放量增大,释放速率加快, NH_4^+ 和 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的留存比例也越大;氨气释放导致硬化后的复合体系孔隙率增加,大孔数量增加;脱硝粉煤灰中氨含量增加、浆体搅拌、浆体水灰比增大均会加快复合体系的氨气释放速率。

关键词: 脱硝粉煤灰; NH_4HSO_4 ; 留存; 释放; 规律; 影响

中图分类号: TU525

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.029

Retention and Release of NH_4HSO_4 in Denitration Fly Ash in Fly Ash-Cement Composite System and Its Effect

LIU Zhenhua, WANG Zhi, HE Yunfei, QIN Hongyi

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The retention and release behavior of NH_4HSO_4 in fly ash-cement composite system (composite system for short) and the influence of NH_4HSO_4 on the composite system was studied by means of simulation. The results show that NH_4HSO_4 in denitration fly ash decomposes in the composite system and releases ammonia, part of which remains in the composite system. When 30% denitration fly ash is added into cement, the remaining NH_4HSO_4 has little effect on the pH value of the composite system, and it is concentrated in the first 1 h. The influence of retained NH_4HSO_4 on cement hydration is also concentrated in the early stage, which reduces the hydration exothermic peak and delays the appearance of exothermic peak. With the continuous hydration of cement in the late stage, it has no effect on the hydration heat and hydration products of cement. With the increase of ammonia content, the release amount and content of ammonia in the composite system increase, and the retention ratio of NH_4^+ and $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ also increases; the release of ammonia leads to the increase of porosity and the number of macropores after hardening of the composite system; the increase of ammonia content in denitration fly ash, paste mixing and water ce-

收稿日期:2019-12-11; 修订日期:2020-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51872032)

第一作者:刘振华(1996—),男,山东淄博人,重庆大学硕士生。E-mail:1550258216@qq.com

通讯作者:王 智(1968—),男,重庆人,重庆大学教授,博士生导师,博士。E-mail:cquwangzhi@126.com

ment ratio of the composite system will accelerate the release of ammonia.

Key words: denitration fly ash; NH_4HSO_4 ; retention; release; law; influence

中国燃煤发电厂已全面实施脱硝,水泥混凝土中使用的粉煤灰绝大多数为脱硝粉煤灰^[1],其在使用时会出现以下问题:一方面,脱硝粉煤灰在存放、运输或在混凝土拌和、硬化过程中均会以不同方式和程度释放氨气,对人体健康和环境产生不良影响^[2-4];另一方面,混凝土浇筑过程中坍落度损失加剧、凝结时间延长、凝结硬化后体积膨胀、表面出现孔洞,甚至在混凝土表层出现粉化,强度大幅度降低。目前大多数研究认为脱硝粉煤灰中的氨氮物质以 NH_4HSO_4 为主^[5-8], NH_4HSO_4 的存在是脱硝粉煤灰在应用过程中出现一系列问题最为主要的原因。

与其他硫酸盐对水泥混凝土影响不同,脱硝粉煤灰中的 NH_4HSO_4 在水泥浆体中会被分解,不仅有留存的 NH_4^+ 和 SO_4^{2+} ,还有 NH_4HSO_4 分解后产生的氨气。目前,很多学者采用模拟方式研究了脱硝粉煤灰中的 NH_4HSO_4 对粉煤灰-水泥复合体系(简称复合体系)工作性能、力学性能等的影响^[9-10]。而针对 NH_4HSO_4 的留存、氨气释放行为规律,以及二者对于复合体系的影响还未有相关报道。

鉴于此,本研究根据脱硝粉煤灰中 NH_4HSO_4 在复合体系中的特点,开展 NH_4HSO_4 在复合体系中的分解、留存及氨气释放行为规律,以及它们对复合体系影响的研究,以期对脱硝粉煤灰在复合体系中的应用提供技术支持。

1 试验

1.1 原材料

粉煤灰为重庆珞璜电厂脱硝粉煤灰。水泥为重庆富皇有限公司产 P·O 42.5R 普通硅酸盐水泥。粉煤灰和水泥的化学组成见表 1,水泥性能见表 2。化学试剂主要包括分析纯 NH_4HSO_4 、氢氧化钠、水杨酸、酒石酸钾钠、亚硝基铁氰化钠、无水乙醇和硫酸溶液。

表 1 粉煤灰和水泥的化学组成										
Table 1 Chemical compositions of fly ash and cement w/%										
Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	MgO	IL	
Fly ash	53.51	25.01	7.32	4.64	2.52	2.07	1.05	0.75	3.11	
Cement	26.16	6.93	3.36	54.78	2.87	0	0.35	2.47	2.56	

表 2 水泥性能						
Table 2 Property of cement						
Initial setting time/min	Final setting time/min	Stability	Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa	
			3 d	28 d	3 d	28 d
150	195	Qualified	26.3	47.2	5.0	8.2

1.2 试验方法

表 3 为复合体系配合比。各原材料按表 3 称量、混合,并搅拌 4 min 后静置。采用 TG16-WS 型离心机(转速为 8 000 r/min)离心 3 min,获取复合体系的上层液体,用于测定复合体系 1 h 内的 pH 值。采用水泥基材料孔溶液压取装置,获取试件相应龄期的孔隙液,用于测定复合体系 1~7 d 的 pH 值。上述 pH 值测定均采用美国 MELTER TOLEDO 公司产 FE 28 pH 计。

表 3 复合体系配合比				
Table 3 Mix proportion of fly ash-cement composite system g				
System No.	Cement	Fly ash	NH_4HSO_4	Water
C	600.000	0	0	240.000
F ₀	420.000	180.000	0	240.000
F ₁₀₀	420.000	180.000	0.122	240.000
F ₁₀₀₀	420.000	180.000	1.218	240.000
F ₁₀₀₀₀	420.000	180.000	12.176	240.000

Note: F₀, F₁₀₀, F₁₀₀₀, F₁₀₀₀₀ respectively indicate that ammonia content of fly ash-cement composite system is 0, 100, 1 000, 10 000 mg/kg.

图 1 为复合体系氨气释放量测定装置示意图。其中,①为鼓风装置,通风速率控制为 3.5 L/min;②为除氨仪器,其中的液体为 0.1 mol/L H_2SO_4 水溶液;③为氨气产生装置,内置拌和好的浆体,通过鼓风装置将该装置内产生的氨气输送于氨气吸收装置中;④为氨气吸收装置(锥形瓶),其中的液体为 0.01 mol/L H_2SO_4 水溶液。记录锥形瓶与溶液的总初始质量,定期采用移液枪从氨气吸收装置④中移取 1 mL 液体,置于带磨塞口的试管内。每次取样后添加新的吸收液,使锥形瓶与溶液质量恢复到初始质量。用测试得到的氨气释放量计算复合体系中氨的留存比例。氨气测定方法采用 GB/T 14679—1993《空气质量 氨的测定 次氯酸钠-水杨酸分光光度法》。使用双光束紫外可见分光光度计(型号为 TU-1901)测试吸收液的吸光度,对照标准曲线,得到复合体系中的氨含量。

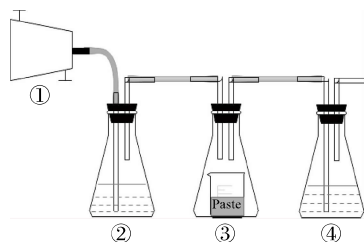


图1 复合体系氨气释放量测定装置示意图

Fig. 1 Experimental apparatus for determination of ammonia gas release from fly ash-cement composite system

水泥和粉煤灰的化学组成采用X射线荧光光谱分析仪(型号为XRF-1800)测定,以氧化物的形式表示,制样均采用压片法。孔结构采用美国Micromeritics公司的压汞仪(型号为AutoPore IV 9500)测定。粉煤灰中的N元素含量采用美国Exter Analytical公司元素分析仪(型号为CE440)测定。水化产物试样磨细后,过74 μm (200目)筛,采用PANalytical公司的X射线衍射仪(型号为Empyrean X)分析。水泥净浆的水化放热量和放热速率采用美国TA公司的TAM air微量热计测定。

2 结果与讨论

2.1 脱硝粉煤灰中 NH_4HSO_4 在水泥浆体中的分解

NH_4HSO_4 常温下为无色结晶体,易潮解,易溶于水,其水溶液呈强酸性。当脱硝粉煤灰与水泥、水进行拌和时, NH_4HSO_4 会电离出 NH_4^+ 、 HSO_4^- 、 H^+ 和 SO_4^{2-} 。其中的 NH_4^+ 会继续与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 中的 OH^- 反应,生成 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 不稳定,易挥发,溢出氨气^[11]。图2为复合体系中的氨气释放量。由图2可见,氨含量不同的复合体系均有氨气释放,且释放量随氨含量的增加而增大。

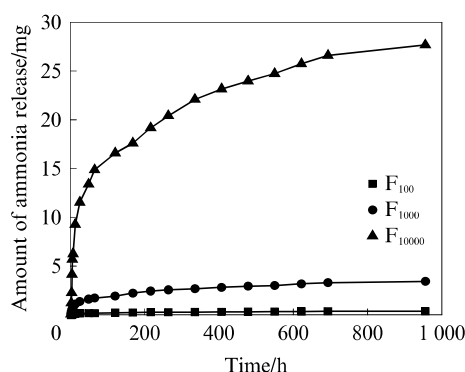


图2 复合体系中的氨气释放量

Fig. 2 Ammonia release from fly ash-cement composite system

NH_4HSO_4 分解产生的氨气一部分被释放出去,另一部分被浆体包裹。其中被包裹的氨气和存在

于孔隙液中的 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 NH_4^+ 会留存在复合体系中,导致复合体系中的氨含量发生变化。图3为复合体系孔隙液中的氨含量。由图3可见,随着脱硝粉煤灰氨含量的增加,留存在孔隙液中的氨含量显著增加。

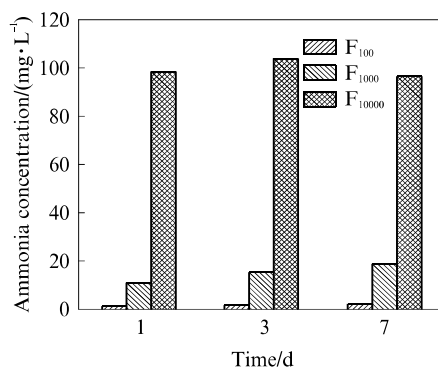


图3 复合体系孔隙液中的氨含量

Fig. 3 Ammonia content in pores of fly ash-cement composite system

2.2 留存 NH_4HSO_4 对复合体系的影响

2.2.1 留存 NH_4HSO_4 对复合体系 pH 值的影响

粉煤灰中的 NH_4HSO_4 是导致脱硝粉煤灰 pH 值降低的主要原因。张宇^[12]研究表明,脱硝粉煤灰的 pH 值较未脱硝粉煤灰最大下降了 5 左右。本试验将 30% 的脱硝粉煤灰掺入水泥中,新拌水泥浆体 pH 值的变化如图 4 所示。由图 4 可见:(1)1 h 内,随着脱硝粉煤灰氨含量的增加,复合体系 pH 值呈下降趋势,新拌水泥浆体 F_{10000} 组 pH 值较纯水泥组(C)最大下降了 1 左右,降幅较小;随着时间的延长,氨含量不同的新拌水泥浆体的 pH 值差距减小,1 h 时 F_{100} 和 F_{1000} 的 pH 值差距可忽略不计。(2)1~7 d 时硬化水泥浆体 pH 值维持在较小的波动范围内,且无明显规律。这是由于水泥水化产生了大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 NH_4HSO_4 发生反应,减弱了 NH_4HSO_4 对 pH 值的影响。由此可见, NH_4HSO_4 对复合体系 pH 值的影响主要集中在前 1 h,而对后期的复合体系 pH 值基本无影响。

2.2.2 留存 NH_4HSO_4 对水泥水化的影响

硫酸盐作为水泥的少量组分,参与水泥水化反应,主要与铝酸三钙反应生成钙矾石(Aft)或单硫型硫铝酸钙,进而影响水泥水化性能^[13-14]。图5为脱硝粉煤灰留存 NH_4HSO_4 对水泥水化放热速率和放热量的影响。由图5可见,与复合体系 F_0 相比,复合体系 F_{1000} 水泥水化放热峰值有所降低且延迟出现,但从放热总量来看,两组的放热总量几乎相同,且

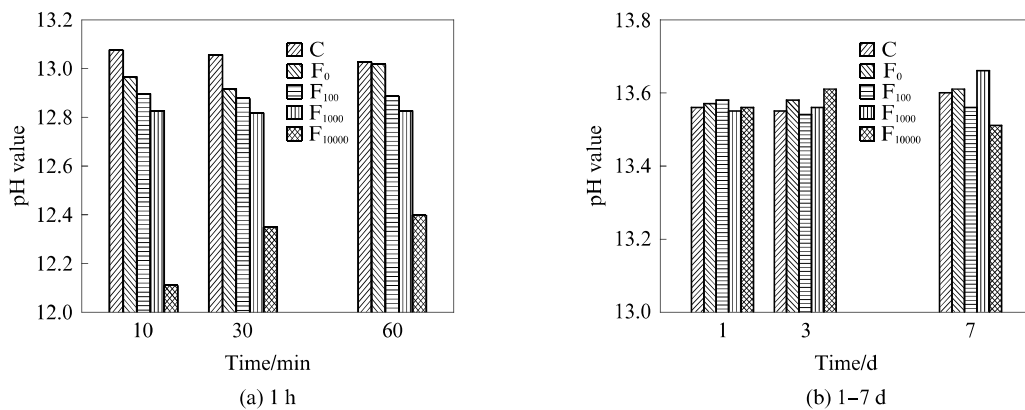


图4 脱硝粉煤灰含氨量对不同龄期复合体系 pH 值的影响

Fig. 4 Effect of ammonia content of denitration fly ash on pH value of fly ash-cement composite system at different ages

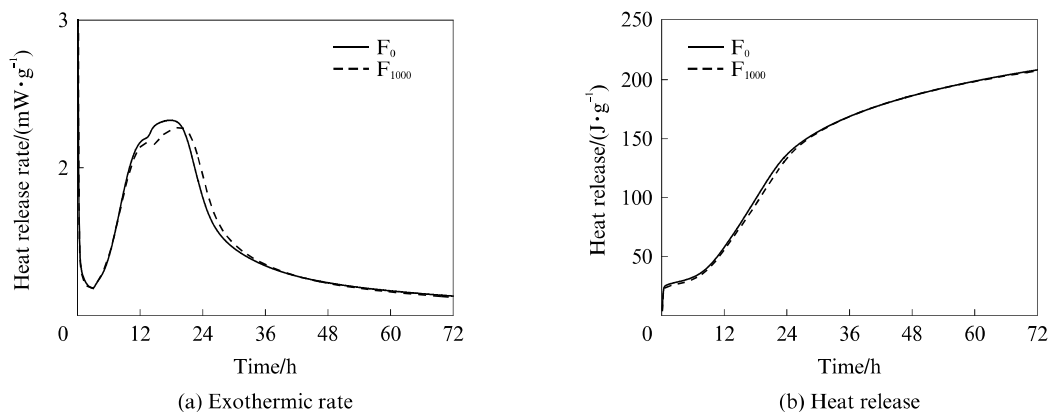
图5 脱硝粉煤灰的 NH_4HSO_4 对水泥水化放热速率和放热量的影响

Fig. 5 Effect of NH_4HSO_4 in denitration fly ash on heat release rate and heat release of cement hydration

30 h 后放热总量曲线重合. 这表明 NH_4HSO_4 主要降低和延迟了水泥早期的水化热, 对后期水化热未造成影响. 随着脱硝粉煤灰氨含量的增加, 水泥水化进程有所减缓, 早期强度降低, 这也解释了硬化复合体系强度随脱硝粉煤灰氨含量增加呈下降趋势的原因^[15].

水泥水化产物的数量、性质和结构直接决定了水泥的物理性能^[16]. 图 6 为复合体系水化产物的 XRD 图谱. 由图 6 可见, 1、3、7、28 d 龄期的水化产物种类相同, 并无新的水化产物产生, 也没有 NH_4HSO_4 特征峰出现. 这是由于水泥水化产生了大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 其与粉煤灰中的 NH_4HSO_4 发生反应, 生成了 CaSO_4 , 并释放氨气. 分析 7 d 龄期的水泥水化产物后发现, 脱硝粉煤灰中氨含量的变化主要对 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的生成量造成了影响.

2.3 脱硝粉煤灰氨气释放

2.3.1 氨气释放对硬化复合体系孔结构的影响

图 7 为脱硝粉煤灰氨含量对硬化复合体系孔结

构的影响. 由图 7 可见: 随着脱硝粉煤灰氨含量的增加, 7、28 d 龄期硬化复合体系孔隙率均呈增加趋势, 28 d 时 F_{10000} 的孔隙率较 F_0 增加 5.4%; 随着脱硝粉煤灰氨含量的增加, 7、28 d 龄期硬化复合体系均表现为小孔减少, 大孔增加, 对于大于 200 nm 的孔径数量, 7、28 d 龄期时 F_{10000} 较 F_0 分别增加了 10.27% 和 3.61%. 因此, 脱硝粉煤灰的氨含量越大, 硬化复合体系的孔隙率越高, 大孔数量越多.

2.3.2 脱硝粉煤灰氨气释放的影响因素

2.3.2.1 脱硝粉煤灰氨含量

图 8 为脱硝粉煤灰氨含量对复合体系氨气释放及氨留存的影响. 由图 8 可见: 复合体系中氨气释放主要集中在前期, 其中复合体系 F_{10000} 200 h 的氨气释放量约为 6 mg, 占 960 h 释放总量的 66% 左右; 随着时间的延长, 氨含量不同的复合体系氨气释放速率均有所减小. 由图 8 还可见, 脱硝粉煤灰氨含量越大, 体系内氨气释放比例相对越小, NH_4HSO_4 留存比例相对越大, 超过 90% 的氨留存在复合体系中.

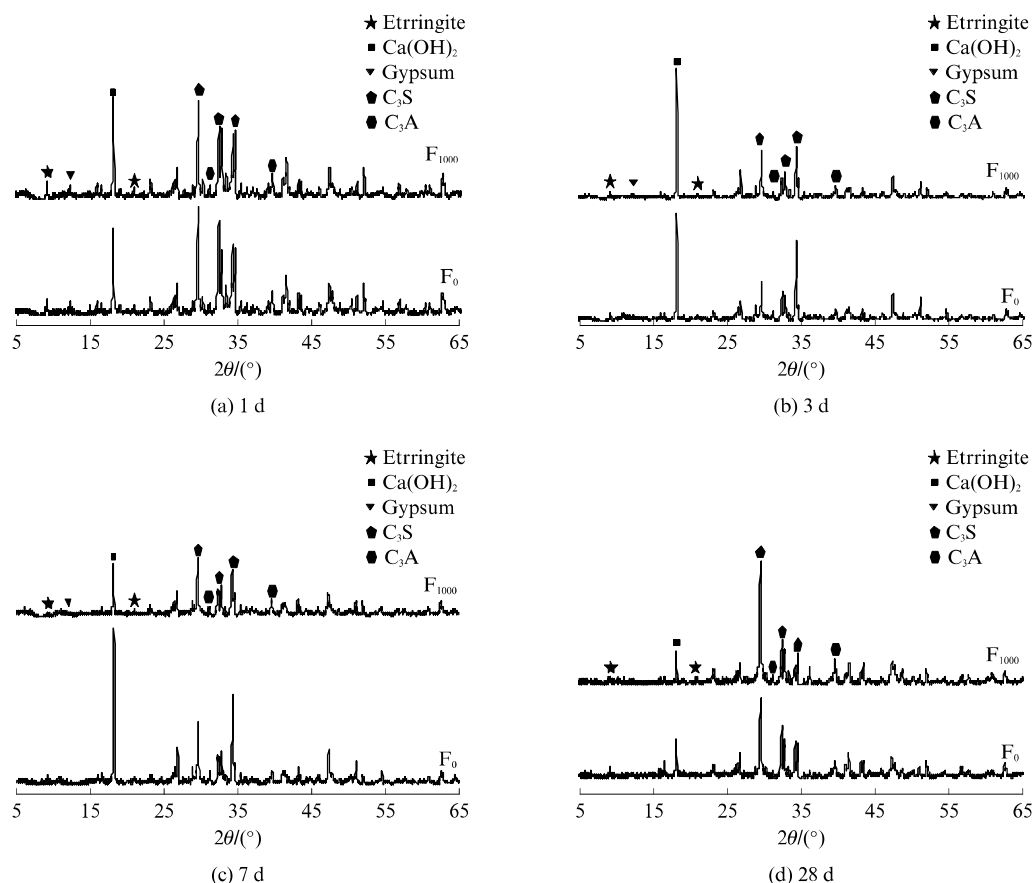


图6 复合体系水化产物的XRD图谱

Fig. 6 XRD patterns of hydration products of fly ash-cement composite system

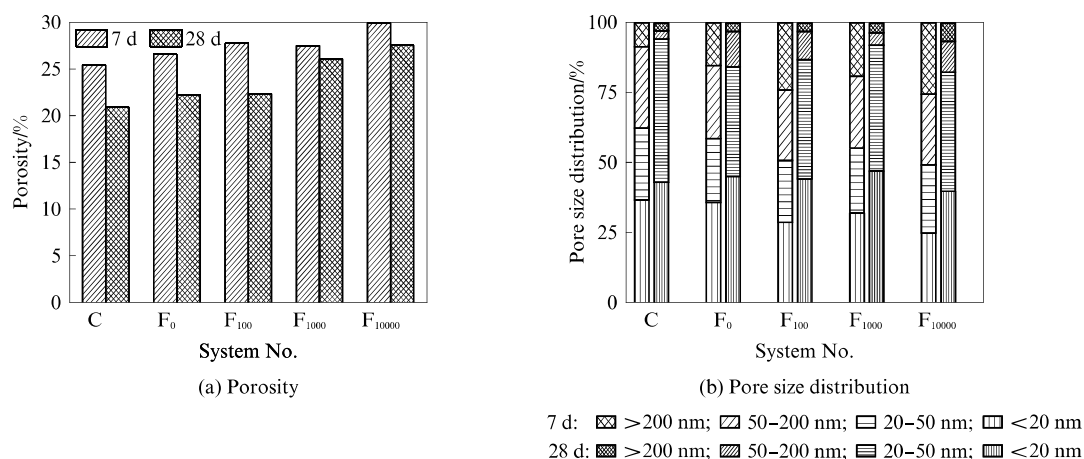


图7 脱硝粉煤灰氨含量对硬化复合体系孔结构的影响

Fig. 7 Effect of ammonia content of denitration fly ash on pore structure of fly ash-cement composite system

2.3.2.2 浆体搅拌

图9为浆体搅拌对复合体系氨气释放及氨留存的影响。由图9可见:经过2 min 搅拌的复合体系相比未搅拌的复合体系氨气释放速率明显加快,且氨气释放量明显增加;复合体系凝结硬化后,氨气释放速率逐渐减小,同时,搅拌和未搅拌的复合体系氨气

释放速率(图中曲线斜率)不断接近,700 h 后氨气释放速率相差无几。由于前期试验组释放氨气速率较快,所以相对于未搅拌的复合体系,搅拌后的复合体系中 NH_4HSO_4 留存量较小,搅拌有利于复合体系氨气释放,使氨气释放速率加快,但随着时间的延长,浆体搅拌对氨气释放速率的影响逐渐降低。

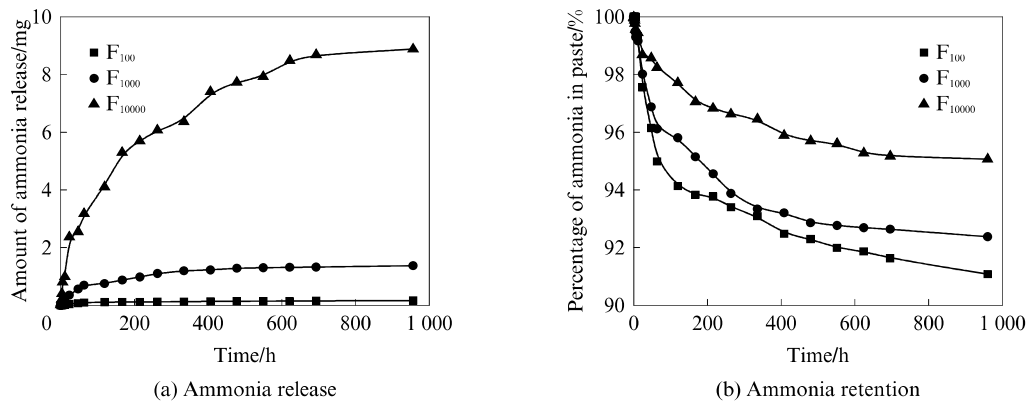


图8 脱硝粉煤灰氨含量对复合体系氨气释放及氨留存的影响

Fig. 8 Effect of ammonia content in denitrification fly ash on ammonia release and ammonia retention

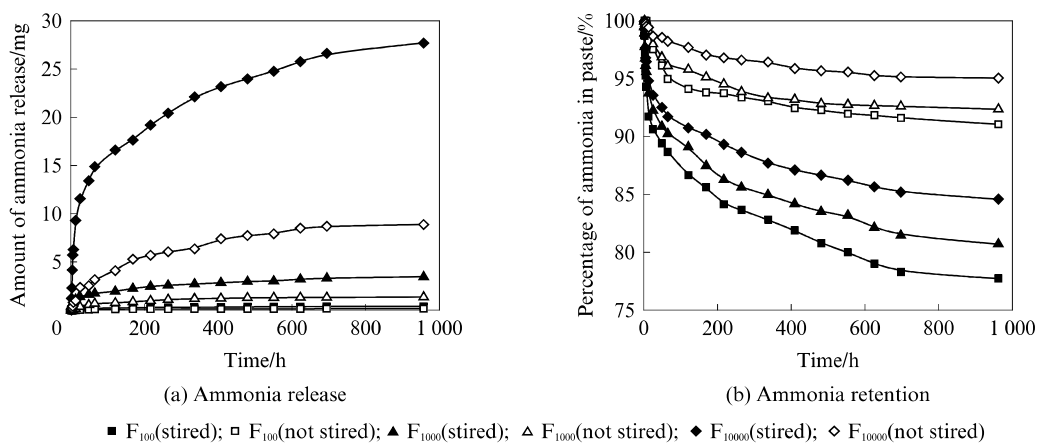


图9 浆体搅拌对复合体系氨气释放及氨留存的影响

Fig. 9 Effect of mixing on ammonia release and ammonia retention in fly ash-cement composite system

2.3.2.3 浆体水灰比

为研究浆体水灰比对复合体系氨气释放与氨留存的影响,试验采用2种水灰比(0.4和0.6)浆体进行研究.图10为浆体水灰比对复合体系氨气释放及氨留存的影响.由图10可见,复合体系中氨气释放速率(图中曲线斜率)随浆体水灰比增加

而明显加快,随着时间的延长,浆体水灰比对氨气释放速率影响减小,40 d左右时氨气释放速率十分接近,但浆体水灰比大的复合体系氨气释放速率仍较快,说明浆体水灰比对复合体系氨气的释放影响时间较长,在试验设定时间内,影响并未消失.

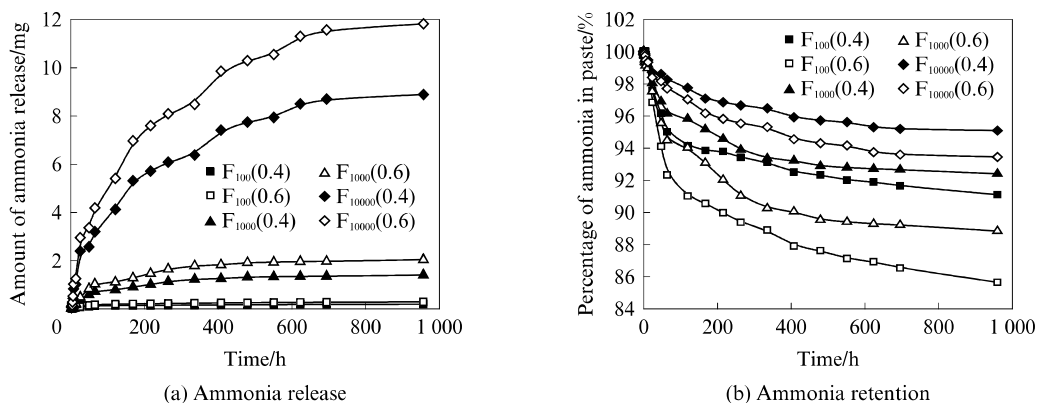


图10 水灰比对复合体系氨气释放及氨留存的影响

Fig. 10 Effect of water-cement ratio on ammonia release and ammonia retention in fly ash-cement composite system

3 结论

(1) 脱硝粉煤灰中一部分 NH_4HSO_4 在复合体系中分解, 释放出氨气, 另一部分留存于复合体系孔隙液中。

(2) 虽然 NH_4HSO_4 能够显著降低脱硝粉煤灰的 pH 值, 但将 30% 脱硝粉煤灰掺入水泥中时, 所留存的 NH_4HSO_4 对复合体系 pH 值的降低程度较小, 且集中在前 1 h。随着水泥水化的持续进行, NH_4HSO_4 对复合体系 pH 值的影响逐渐减弱, 甚至消失。脱硝粉煤灰中 NH_4HSO_4 对水泥水化的影响体现在早期, 表现为水泥水化的放热峰值降低, 水化放热峰值出现时间延迟。随着水泥水化反应的持续进行, 水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量减少, 其他水化产物种类与数量几乎不受影响。

(3) 脱硝粉煤灰氨含量增加、浆体搅拌、浆体水灰比增大均会加快复合体系氨气的释放速率, 提高前期氨气的释放量。脱硝粉煤灰氨含量越大, 氨的留存比例就越大。氨气释放导致硬化复合体系孔隙率增加, 大孔数量增加。

参考文献:

- [1] 王穆君, 徐玲玲, 刘方, 等. 脱硝粉煤灰对水泥性能影响的研究[J]. 新型建筑材料, 2011, 38(6): 12-14.
WANG Mujun, XU Lingling, LIU Fang, et al. Effect of denitrified fly ash on cement performance[J]. New Building Materials, 2011, 38(6): 12-14. (in Chinese)
- [2] 王子仪, 王智, 孙化强, 等. 脱硝对粉煤灰作为矿物掺合料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(3): 220-226.
WANG Ziyi, WANG Zhi, SUN Huaqiang, et al. Effect of denitrification on performance of fly ash as mineral admixture[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(3): 220-226. (in Chinese)
- [3] JENSEN A, JOHNSON J E, ANDRIES J, et al. Formation and reduction of NO_x in pressurized fluidized bed combustion of coal[J]. Fuel, 1995, 74(11): 1555-1569.
- [4] 朱小文. 燃煤发电厂 SCR 脱硝技术原理及催化剂的选择[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(9): 98-99.
ZHU Xiaowen. Principles of SCR denitrification technology and selection of catalysts for coal fired power plants[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(9): 98-99. (in Chinese)
- [5] 张宇, 王智, 孙化强, 等. 脱硝后粉煤灰中氨氮物质的性质探讨[J]. 粉煤灰, 2015, 27(5): 5-6.
ZHANG Yu, WANG Zhi, SUN Huaqiang, et al. Discussion on the properties of ammonia nitrogen in fly ash after denitration[J]. Fly Ash, 2015, 27(5): 5-6. (in Chinese)
- [6] 李靖华, 张桂恩. 硫酸氢铵分解动力学及其分解机理的研究[J]. 物理化学学报, 1992, 8(1): 123-127.
LI Jinghua, ZHANG Guen. Study on the decomposition kinetics and mechanism of ammonium bisulfate[J]. Journal of Physical Chemistry, 1992, 8(1): 123-127. (in Chinese)
- [7] 马双忱, 金鑫, 孙云雪, 等. SCR 烟气脱硝过程硫酸氢铵的生成机理与控制[J]. 热力发电, 2010, 39(8): 12-17.
MA Shuangchen, JI Xin, SUN Yunxue, et al. Formation mechanism and control of ammonium bisulfate in SCR flue gas denitration process[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(8): 12-17. (in Chinese)
- [8] ZHOU C Y, ZHANG L N, DENG Y, et al. Research progress on ammonium bisulfate formation and control in the process of selective catalytic reduction[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2016, 35(6): 1664-1672.
- [9] 王利新. 脱硝脱硫粉煤灰对水泥性能影响的机制及控制技术研究[D]. 济南: 济南大学, 2017.
WANG Lixin. Research on the mechanism and control technology of the effect of denitrification and desulfurization fly ash on cement performance[D]. Jinan: Jinan University, 2017. (in Chinese)
- [10] 梁登科. 脱硝过程伴生硫酸氢铵对于烟气灰颗粒性质影响的实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
LIANG Dengke. Experimental study on the effect of ammonia hydrogen sulfate on the properties of soot particles in the process of denitration[D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese)
- [11] 马双忱, 邓悦, 吴文龙, 等. SCR 脱硝过程中硫酸氢铵形成特性实验研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(2): 143-150.
MA Shuangchen, DENG Yue, WU Wenlong, et al. Experimental study on the formation characteristics of ammonium bisulfate during SCR denitration[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2016, 36(2): 143-150. (in Chinese)
- [12] 张宇. 选择性催化还原脱硝(SCR)对粉煤灰性能的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
ZHANG Yu. Study on the effect of selective catalytic reduction denitrification(SCR) on the performance of fly ash[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [13] 钱觉时. 粉煤灰特性与粉煤灰混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 102-132.
QIAN Jueshi. Fly ash characteristics and fly ash concrete[M]. Beijing: Science Press, 2002: 102-132. (in Chinese)
- [14] 马英. 碱金属硫酸盐对硅酸盐水泥早期水化硬化的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
MA Ying. Effect of alkali metal sulfate on early hydration and hardening of Portland cement[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [15] 贺云飞. 脱硝粉煤灰氨释放与留存对水泥混凝土性能的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
HE Yunfei. Effects of ammonia release and retention of denitrated fly ash on the properties of cement concrete[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)
- [16] 王建华, 肖佳, 陈雷, 等. 粉煤灰对水泥水化与强度的影响[J]. 粉煤灰综合利用, 2009(5): 38-40.
WANG Jianhua, XIAO Jia, CHEN Lei, et al. Effect of fly ash on cement hydration and strength[J]. Comprehensive Utilization of Fly Ash, 2009(5): 38-40. (in Chinese)