

变电站防火墙硅泥加气混凝土物理力学与耐火性能研究

Study on Physical Mechanics and Fire Resistance of Silica Slime Aerated Concrete for Substation Firewall

刘林田, 周钦龙, 林家兴, 杨彤薇

(山东送变电工程有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 变电站防火墙的砌体填充墙多采用加气混凝土, 将硅泥加入加气混凝土砌块, 可以有效消耗废弃物、保护资源。基于此, 制备了不同硅泥掺量的加气混凝土试件, 开展干密度、孔隙率和导热性能测试, 研究硅泥加气混凝土的热工性能、抗冻性能和耐火性能。结果表明: 加气混凝土的干密度、孔隙率、抗压强度和导热系数分别随硅泥掺量的增大而减小、增大、减小和减小; 硅泥掺量 42%~66% 加气混凝土砌块的耐火极限均可达 3 h 以上, 可用于构建变电站防火墙的砌体填充墙。为了保证加气混凝土的抗冻性能, 建议硅泥掺量范围为 48%~60%。

关键词: 变电站; 硅泥加气混凝土; 密度; 孔隙率; 抗压强度; 导热系数; 耐火性能

中图分类号: TU528.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 04-0036-04

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.04.007

LIU Lintian, ZHOU Qinlong, LIN Jiaying, YANG Tongwei

(Shandong Electrical Power Supply & Transformation Engineering Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: The masonry infill wall of substation firewall mostly adopts aerated concrete. Adding silica mud to aerated concrete can effectively consume waste and protect resources. Based on this, aerated concrete specimens with different amounts of silica mud were prepared, and the dry density, porosity and thermal conductivity were tested. The thermal performance, frost resistance and fire resistance of aerated concrete with silica mud were studied. The test results show that: the dry density, porosity, compressive strength and thermal conductivity of aerated concrete decrease, increase, decrease and decrease with the increase of silica mud content, respectively. The fire resistance limit of aerated concrete block can reach more than 3 h under the condition of 42%~66% silica mud addition, which can be used to construct the masonry infilled wall of substation firewall. In order to ensure the frost resistance of aerated concrete, it is recommended that the amount of silica mud added should be in the range of 48%~60%.

Keywords: substation; silica mud aerated concrete; density; porosity; compressive strength; thermal conductivity; fire resistance

0 引言

变电站是电网的重要组成部分, 关系到电网的安全、效益和质量。目前, 在室外主变压器之间的

防火距离不满足要求时, 需要设置主变防火墙, 防火墙多由钢筋混凝土框架和砌体填充墙结构共同组成^[1-2]。其中, 砌体填充墙主要起到隔热、防火的作用。加气混凝土因其在隔热、防火方面具有良好的性能, 在防火墙建造方面得到了广泛的应用^[3-5]。

硅泥、硅灰属于硅质资源生产开发过程中的废弃物, 大量堆积会造成环境污染和土地资源浪费, 特别是硅灰容易进入大气中造成大气污染, 严重影响周边居民的健康。为保护环境, 学者们将硅泥、

作者简介: 刘林田 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 变电站工程施工及管理。

收稿日期: 2023-05-25

硅灰加入混凝土中^[6-9]; 罗旷等^[6]以硅泥、矿渣等工业废弃物为原材料制备加气混凝土, 分析了硅泥和矿渣掺量变化对加气混凝土抗压强度的影响规律; 田键等^[7]利用硅泥、水泥、石灰、石膏等材料制备了蒸压加气混凝土, 研究了硅泥掺量对加气混凝土微观结构的影响; 叶斌^[8]针对硅泥加气混凝土开展了系统研究, 分析了硅泥掺量变化对加气混凝土抗压强度、保温性能、干湿循环性能的影响规律; 魏小凡等^[9]将矿渣和硅灰加入混凝土中, 分析了硅灰掺量对混凝土凝结时间、体积收缩和抗裂性能的影响规律。

上述研究成果对促进硅泥和硅灰在各类混凝土中的应用具有深远意义, 但目前关于硅泥加气混凝土方面的研究却较少, 其在变电站防火墙中的应用也鲜有提及。因此, 通过对不同硅泥掺量条件下加气混凝土的干密度、孔隙率、抗压强度、热工系数以及抗冻性能展开试验研究, 确定变电站防火墙中加气混凝土的最佳硅泥掺量。研究成果可为变电站防火墙设计提供重要参考依据。

1 试验方法

1.1 试验材料

水泥选用济南市中卧虎山水泥厂生产的 P · I 42.5 硅酸盐水泥, 主要化学成分见表 1; 生石灰选用济南东方石灰厂生产的生石灰, 主要化学成分见表 1; 硅泥选用山东潍坊鲁博达硅业厂生产的硅藻泥, 主要化学成分见表 1; 石膏选用济南市雅致石膏制品厂生产的石膏, 主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 选用济南银鹏建筑材料有限公司生产的铝粉作为硅泥加气混凝土的发泡剂, 主要成分为 99.8% 的 Al 和 0.09% 的 Fe; 选用青岛瑞诺化工有限公司生产的稳泡剂, 主要成分为离子型表面活性剂; 选用山东顾诚化工科技有限公司生产的水玻璃作为硅泥加气混凝土的激发剂, 主要成分为 70.5% 的 Na_2SiO_3 、20.4% 的 Al_2O_3 、5.3% 的 CaO 和 3.1% 的 MgO。

表 1 水泥、生石灰、硅泥的主要化学成分
Table 1 The main chemical composition of cement, quicklime and silica mud /%

材料	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	R ₂ O
水泥	1.90	6.03	22.15	2.95	57.51	0.65	3.37	0.54
生石灰	4.25	5.12	13.14	0.51	62.75	0.54	4.73	—
硅泥	—	1.23	96.06	0.12	0.37	0.07	0.58	—

1.2 试验方法

为了分析用于变电站防火墙建设的硅泥加气混凝土的物理、力学与耐火性能, 研究硅泥掺量对加气混凝土使用性能的影响规律, 制备硅泥掺量为 42%、48%、54%、60%、66% 的加气混凝土, 水泥与生石灰掺加比例为 2:1, 石膏掺量为 4%, 水料比为 0.65, 具体配比见表 2。

硅泥加气混凝土的制备、养护和测试均依据 GB/T 11969—2020 《蒸压加气混凝土性能试验方法》, 采用 YAW-300B 液压万能试验机测试硅泥加气混凝土的抗压强度, 采用 DRM 导热系数测定仪测试硅泥加气混凝土的导热系数。

表 2 硅泥加气混凝土配比
Table 2 Silica mud aerated concrete ratio

编号	各组分掺量/%							水料比
	硅泥	水泥	生石灰	石膏	发泡剂	激发剂	稳泡剂	
1	42	36	18	4	0.08	1.0	1.0	0.65
2	48	32	16	4	0.08	1.0	1.0	0.65
3	54	28	14	4	0.08	1.0	1.0	0.65
4	60	24	12	4	0.08	1.0	1.0	0.65
5	66	20	10	4	0.08	1.0	1.0	0.65

2 试验结果分析

2.1 干密度

当硅泥掺量分别为 42%、48%、54%、60%、66% 时, 硅泥加气混凝土出釜养护后的干密度分别为 638.8、626.5、610.3、605.2、586.5 kg/m^3 , 如图 1 所示。随着硅泥掺量的增大, 硅泥加气混凝土出釜养护后的干密度呈现逐渐减小的趋势。原因在于, 硅泥掺量越大, 硅泥加气混凝土中生石灰和水泥含量就越小, 硅泥加气混凝土的水泥水化产物也会越少, 导致颗粒间料浆黏结性变差, 稠度变低, 料浆发气速

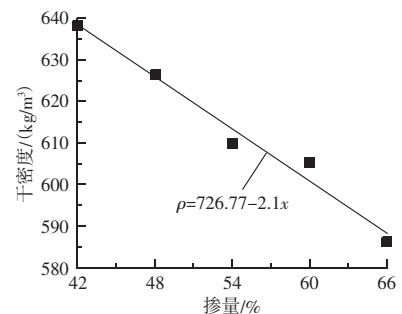


图 1 硅泥加气混凝土干密度随硅泥掺量的变化曲线
Fig. 1 The dry density variation curve of silica mud aerated concrete with silica slime addition

材料科学

度加快,其干密度逐渐下降。由试验数据拟合结果可知,硅泥加气混凝土出釜养护后的干密度 ρ 与硅泥掺量 x 呈线性减小关系。

2.2 孔隙率

当硅泥掺量分别为 42%、48%、54%、60%、66% 时,硅泥加气混凝土出釜养护后的孔隙率分别为 70.2%、71.4%、73.5%、75.1%、76.2%,如图 2 所示。随着硅泥掺量的增大,硅泥加气混凝土出釜养护后孔隙率呈现逐渐增大的趋势。原因在于,硅泥掺量越大,硅泥加气混凝土料浆稠度就越低,其发气速度就越快,导致其孔隙率逐渐变大。由试验数据拟合结果可知,硅泥加气混凝土出釜养护后的孔隙率 φ 与硅泥掺量 x 呈线性增大关系。

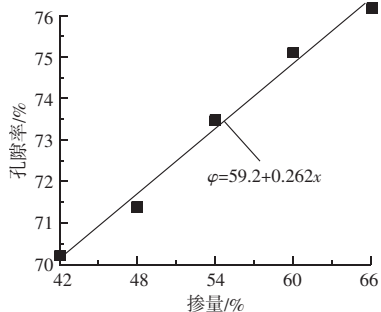


图 2 硅泥加气混凝土孔隙率随硅泥掺量的变化曲线
Fig. 2 The porosity variation curve of silica slime aerated concrete with silica slime addition

2.3 抗压性能

当硅泥掺量分别为 42%、48%、54%、60%、66% 时,硅泥加气混凝土出釜养护后的单轴抗压强度分别为 6.0、5.6、5.3、5.1、4.2 MPa,如图 3 所示。随着硅泥掺量的增大,硅泥加气混凝土出釜养护后单轴抗压强度呈现逐渐减小的趋势。原因在于,虽然掺入硅泥的能够在一定程度上起到填充效应作用,但由于硅泥掺量的增大会使得水泥掺量减小,水泥水化产物降低,颗粒黏结性变差,同时发气后的孔隙率提高,进而导致硅泥加气混凝土的抗压强度下降。由试验数据拟合结果可知,硅泥加气混凝土出釜养护后的抗压强度 σ 与硅泥掺量 x 近似呈线性减小关系。为保证硅泥加气混凝土具有较好的承载能力,建议硅泥加气混凝土中硅泥掺量不要超过 60%。

2.4 热工系数

硅泥掺量分别为 42%、48%、54%、60%、66% 时,硅泥加气混凝土出釜养护后导热系数分别

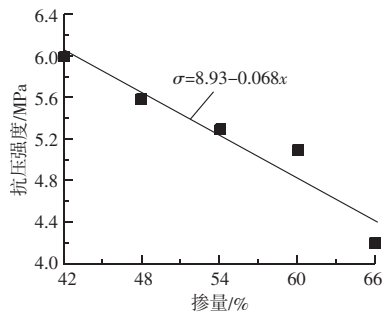


图 3 硅泥加气混凝土抗压强度随硅泥掺量的变化曲线
Fig. 3 The compressive strength variation curve of silica slime aerated concrete with the addition of silica slime

为 0.44、0.33、0.22、0.18、0.15 W/(m·K),如图 4 所示。随着硅泥掺量的增大,硅泥加气混凝土出釜养护后导热系数呈现逐渐减小的趋势。原因在于,硅泥掺量的增大将导致硅泥加气混凝土孔隙率提高,而孔隙内空气的导热系数明显要小于集料颗粒,因此孔隙率越大的加气混凝土,其导热系数就越低。由试验数据拟合结果可知,硅泥加气混凝土出釜养护后的导热系数 K 与硅泥掺量 x 近似呈指数递减关系。

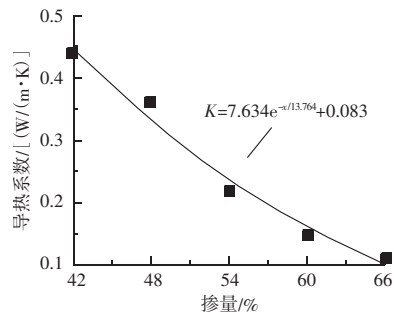


图 4 硅泥加气混凝土导热系数随硅泥掺量的变化曲线
Fig. 4 The thermal conductivity variation curve of silica slime aerated concrete with the addition of silica slime

2.5 抗冻性能

随着冻融循环次数的增加,不同硅泥掺量条件下加气混凝土抗压强度均呈现逐渐减小的趋势,且减小速率越来越快,如图 5 所示。当冻融循环次数为 10 次时,42%、48%、54%、60%、66% 硅泥掺量的加气混凝土抗压强度值是初始值的 91.7%、61.1%、90.5%、88.2%、76.2%;当冻融循环次数为 20 次时加气混凝土抗压强度值是初始值的 76.4%、66.7%、64.6%、66.7%、46.9%。由此可知,随着硅泥掺量提高,硅泥加气混凝土孔隙率也提高,导致其抗冻性能越来越差,尤其是硅泥掺量

超过 60% 时, 这种变化现象尤为明显。因此为保证硅泥加气混凝土具有良好的经济性和抗冻性能, 建议硅泥掺量控制在 48%~60%。

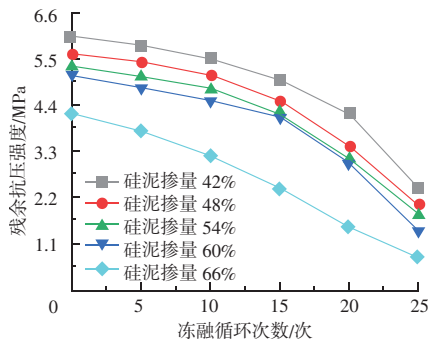


图 5 硅泥加气混凝土抗压强度随冻融循环次数的变化曲线

Fig. 5 Compressive strength variation curves of silica slime aerated concrete with the number of freeze-thaw cycles

2.6 耐火性能

随着燃烧试验炉内升温时间的增加, 不同硅泥掺量加气混凝土外表面温度均呈现逐渐增大的趋势, 且增大速率越来越快, 如图 6 所示。燃烧试验炉内升温时间为 1 h 时, 42%、48%、54%、60%、66% 硅泥掺量的加气混凝土外表面温度分别为 35、33、32、31、29 °C。燃烧试验炉内升温时间为 2 h 时, 加气混凝土外表面温度分别为 61、55、52、47、43 °C。燃烧试验炉内升温时间为 3 h 时, 加气混凝土外表面温度分别为 91、89、85、80、75 °C。由此可知, 随着硅泥掺量的提高, 硅泥加气混凝土孔隙率也提高, 导致其耐火性能提高, 不同硅泥掺量加气混凝土砌

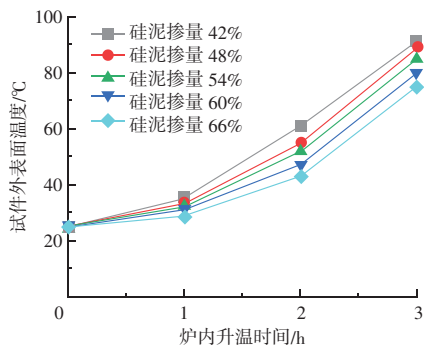


图 6 硅泥加气混凝土外表面温度随炉内升温时间的变化曲线

Fig. 6 The surface temperature variation curves of silica mud aerated concrete with heating time in furnace

块的耐火极限均可达 3 h 以上, 满足 GB 50016—2014《建筑设计防火规范》中规定的防火极限时间要求, 能够用来构建结构工程防火墙。

3 结论

(1) 随着硅泥掺量的增大, 硅泥加气混凝土砌块出釜养护后干密度和抗压强度线性减小, 而孔隙率则线性增大。

(2) 硅泥加气混凝土砌块出釜养护后导热系数与硅泥掺量近似呈指数递减关系。

(3) 随着硅泥掺量提高, 硅泥加气混凝土砌块孔隙率也提高将导致其抗冻性能越来越差, 为保证硅泥加气混凝土砌块具有良好的经济性和抗冻性能, 建议硅泥掺量控制在 48%~60%。

(4) 42%~66% 硅泥掺量加气混凝土砌块的耐火极限均可达 3 h 以上, 可用来构建变电站防火墙的砌体填充墙。

参 考 文 献

- [1] 樊习英, 王正, 谢东升, 等. 变电站穿墙套管防火隔板设计与耐火极限研究 [J]. 电力学报, 2023, 38 (2): 136-145.
- [2] 张金伟, 许颖, 李栋梁, 等. 基于 BIM-CFD 的变压器防火墙火灾性能化设计 [J]. 北京交通大学学报, 2021, 45 (3): 84-92.
- [3] 王晓军, 蒋旭, 王石, 等. 加气混凝土相变充填体强度及热学特性研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (2): 391-399.
- [4] 于敬海, 吴晓萌, 张雪涛, 等. 内嵌轻质墙板 L 形方钢管混凝土组合柱框架结构抗震性能试验与数值模拟 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2023, 56 (5): 460-470.
- [5] 邬琦夫. 加气混凝土砌块填充墙施工技术研究 [J]. 建材发展导向, 2023, 21 (20): 111-113.
- [6] 罗旷, 张威, 张力, 等. 二氧化碳矿化养护全固废加气混凝土研究 [J]. 能源工程, 2023, 43 (2): 41-47.
- [7] 田键, 陈坤, 叶斌, 等. 硅泥制备蒸压加气混凝土研究 [J]. 湖北大学学报 (自然科学版), 2018, 40 (1): 68-72.
- [8] 叶斌. 硅泥加气混凝土制备及性能研究 [D]. 武汉: 湖北大学, 2017.
- [9] 魏小凡, 何牟, 段后红, 等. 矿物掺合料对硫铝酸盐水泥混凝土性能的影响 [J]. 四川水泥, 2023 (5): 8-10, 17.