

膨胀蛭石的微波法制备及在建筑节能减碳中的应用

彭慧蕴^{1,2}, 陈吉明², 罗利明², 刘海峰², 黄跃华³, 李相锦¹, 习永广²

1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010;
2. 西南科技大学 矿物材料及应用研究所, 四川 绵阳 621010;
3. 海南科技职业大学, 海南 海口 571126

中图分类号: TD985; TU55 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)04-0030-08
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.01.035

摘要 基于蛭石结构层水分子遇热瞬间汽化导致体积快速膨胀的特点, 采用微波法和微波化学法对工业蛭石进行加热膨胀处理制备不同粒径的膨胀蛭石, 研究了模压成型和浇注成型工艺制作膨胀蛭石/石膏基复合保温板的力学和热学等性能, 评价了膨胀蛭石保温材料在建筑内墙和热工管道保温的节能效果。结果表明: 以微波化学法制备的膨胀蛭石为骨料制作的保温板具有更小的密度和导热系数($0.082 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), 含水率稍高; 膨胀蛭石/石膏复合保温板的密度、导热系数和抗压强度随膨胀蛭石的片径增大而减小; 在冬季室外平均气温为 $7 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 与内墙和管道未增加保温层相比, 节能保温样板和管道保温样板节能效率都稳定在 20%, 在建筑节能领域具有广阔的应用前景。

关键词 膨胀蛭石; 复合保温材料; 导热系数; 城市建筑节能; 节能降碳

1 引言

在全球气候变暖的大背景下, 基于大国责任担当, 我国提出碳达峰、碳中和“双碳目标”, 为后疫情时代推动绿色发展方式和生活方式、实施结构性减排提供了契机。据国务院发展研究中心发布的《2050年中国能源和碳排放报告》显示, 建筑领域用能占国家总能耗比例 20% 以上, 建筑领域的节能减排在实现温室气体减排的目标方面扮演着重要角色, 节能低碳建筑的发展已成为必然趋势^[1]。

我国建筑领域能耗问题十分突出, 建筑能耗是西方发达国家的 2~3 倍^[2]。为实现可持续发展目标, 建筑领域需扭转能源和碳排放持续增长的趋势。当前在节能建筑中所使用的主要是有机节能材料, 在价格、防火与寿命等方面存在很大局限性。在化工、电力、冶金、石油、建材等许多行业和建筑供暖中也涉及保温与节能。因此, 高性能矿物保温材料的研发与应用, 对

我国建筑节能、降低建筑碳排放量具有重要的意义。

目前, 用于耐高温的矿物保温材料主要有膨胀珍珠岩、矿棉、玻璃纤维、泡沫玻璃等, 但生产膨胀珍珠岩的温度高达 $1\ 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[3], 而生产矿棉、玻璃纤维、泡沫玻璃等常需要更高的温度, 能耗高, 碳排放量大。蛭石作为重要的节能非金属矿产, 可在较低温度下即开始膨胀, 在 $200 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时急剧膨胀, 在 $800 \sim 1\ 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 时达膨胀最大值, 最大膨胀倍数一般为 $10 \sim 25$ 倍^[4]。膨胀后的蛭石导热系数和松密度明显减小, 具有隔热、防火、隔音等功能, 通过冷压或热压成型工艺可将膨胀蛭石与胶凝材料复合成型制备蛭石复合保温材料, 广泛应用于节能降耗领域^[5-6]。研究发现, 水玻璃水解生成的硅酸溶胶可明显提高膨胀蛭石的黏结能力, 以无机黏结剂水玻璃^[7]、氟硅酸钠^[8]、硅丙树脂^[9]等与膨胀蛭石混合制备的保温材料具有低吸水率和高保温的特性; 优化工艺条件下制备的复合保温材料的压缩密度可达 297.2 kg/m^3 , 抗压强度 0.43 MPa , 导热系数

收稿日期: 2022-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42002039)

作者简介: 彭慧蕴(1985—), 女, 四川绵阳人, 博士后, 博士, 研究方向为绿色功能矿物材料, E-mail: penghuiyunxccc@163.com。

通信作者: 罗利明(1986—), 讲师, 硕士生导师, 研究领域为矿物材料, E-mail: luolimingdoc@163.com。

0.071 8 W/(m·K)^[7]。以有机黏结剂酚醛树脂^[10]、脲醛树脂^[11]、聚酰胺^[12]、硬质聚氨酯^[13]等,配合固化剂、发泡剂、表面活性剂等,可制备出具有优异性能的膨胀蛭石保温隔热材料,获得的材料不仅压缩密度更低,导热系数低至0.029 W/(m·K),且具有优异的阻燃特性,阻燃达到A级不燃。除使用普通黏结剂和有机树脂外,研究人员还利用水泥配合聚苯乙烯发泡颗粒^[14-15]、石膏^[16-18]、地聚物^[19]等与蛭石复合制备蛭石复合保温材料兼具耐高温性能和隔热性能。由于水泥、石膏、膨胀蛭石、石蜡之间相容性较好,也有学者利用石膏、水泥、石蜡等制备出蛭石基相变储能材料^[20-21],材料不仅具有良好的热稳定性,还具有较好的吸热潜热值。膨胀蛭石保温材料的广泛使用可大大减少工业和民用设施的能量耗散,达到节能和降碳的目的。但目前对于膨胀蛭石保温材料的施工试验研究较少。

本文从蛭石的膨胀性能出发,对微波法制备膨胀蛭石、膨胀蛭石/石膏复合保温材料的性能及在建筑和管道保温中的施工与应用进行研究和评价,以推进工业蛭石矿产的开发及在建筑节能和减碳领域中的应用,对于我国建筑节能和工业节能具有重要的意义,对于助力碳减排和碳达峰也具有重要的意义^[2]。

2 微波法制备膨胀蛭石

蛭石原料采自新疆尉犁且干布拉克蛭石矿床,粒径为2~4 mm,厚度≥0.5 mm,颜色以棕黄色为主,具油脂光泽,堆积密度为1.20 g/cm³,主要矿物组成为金云母-水金云母-蛭石分结型间层结构矿物。

(1)微波膨胀蛭石制备:采用微波法对蛭石原料进行加热膨胀,加热功率800 W,加热时间2 min,得到微波膨胀蛭石样品(EV),按片径编号为Sm(片径0.5~1 mm)和Bm(片径2~4 mm)。

(2)微波化学膨胀蛭石制备:使用质量浓度为30%的双氧水对蛭石原料浸泡12 h,将浸泡过的蛭石进行微波加热膨胀,功率800 W,加热时间2 min,得到微波化学膨胀蛭石,按片径编号为Smc和Bmc。按照国家建材行业标准JC/T 441—2009,测定膨胀蛭石颗粒材料的密度、导热系数和含水率,测试结果列于表1。

从表1可以看出,无论是微波法还是微波化学法,相对于电加热处理,大片径的蛭石膨胀效果都更好,堆积密度更低,这是由于微波加热是通过微波穿透样品,使蛭石样品中的水分子发生相互摩擦碰撞产生大量热

能,进一步将水分子汽化形成水蒸气,片径越大,气体逸出蛭石结构层越难,瞬间产生的压力越大,蛭石的膨胀效果越好。但大片径膨胀蛭石的含水率更高,这是因为吸水率主要受表层膨胀蛭石对空气中的水分的吸附-脱附动态反应的影响,膨胀效果好,比表面积大,吸附的水分子更多。

表1 膨胀蛭石的工艺性能

Table 1 Properties of expanded vermiculite

| 制备方法 | 编号 | 片径 /mm | 堆积密度 /(kg·m ⁻³) | 含水率 /% | 导热系数 /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) |
|-------|-----|-----------|--------------------------------|-----------|--|
| 微波法 | Sm | 0.5~1 | 472.30 | 2.30 | 0.112 |
| | Bm | 2~4 | 241.82 | 2.45 | 0.092 |
| 微波化学法 | Smc | 0.5~1 | 146.66 | 3.06 | 0.062 |
| | Bmc | 2~4 | 80.60 | 3.56 | 0.060 |

从表1还可以看出,相比于微波法,微波化学法制备的膨胀蛭石的堆积密度更低,最低可以达到80.60 kg/m³,远低于建材行业标准JC/T 441—2009《膨胀蛭石》4.1分类中优等品膨胀蛭石的堆积密度(100 kg/cm³),表现为材料导热系数更低,具有更好的应用性能和市场应用价值。

3 膨胀蛭石/石膏复合保温材料

将膨胀蛭石与一定配比的烧石膏均匀混合,加入适量水搅拌均匀,得到半干混合料或者浆体后移入长方体模具中,分别通过模压法(压缩比为2,0.05 MPa,30 s)和浇注法制备200 mm×200 mm×40 mm板状样品。置于电热恒温干燥箱中养护和干燥后,得到膨胀蛭石/石膏复合保温板。根据成型工艺及所用膨胀蛭石骨料的种类,膨胀蛭石保温板分类记录为:C-Sm, C-Bm, P-Sm, P-Bm, P-Smc, P-Bmc。其中,大写字母C表示浇注成型,P表示模压成型,Sm和Bm表示所使用的膨胀蛭石的编号。依照国家建材行业标准JC/T 442—2009,测定膨胀蛭石/石膏复合保温板的密度、抗压强度、导热系数和含水率。

3.1 密度和含水率

图1为膨胀蛭石/石膏复合保温板的密度、含水率与烧石膏/膨胀蛭石质量比的关系。从图1(a)可以看出,膨胀蛭石/石膏复合保温板的密度与烧石膏/膨胀蛭石质量比呈明显的线性相关关系,膨胀蛭石片径越大,密度拟合直线的斜率越小。随膨胀蛭石加入量和片径的增加,保温板的密度逐渐降低。

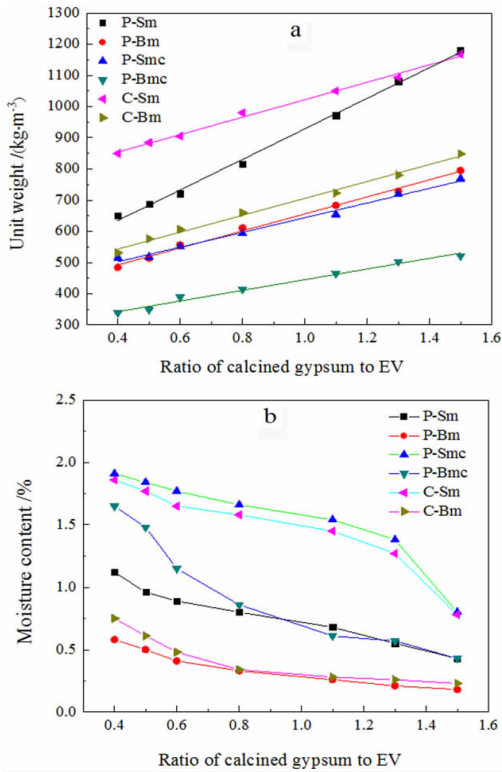


图1 蛭石保温板的密度(a)和含水率(b)与烧石膏/膨胀蛭石质量比的关系

Fig. 1 The relationship between density (a), moisture content (b) of vermiculite insulation board and mass ratio of calcined gypsum/expanded vermiculite

从图1(b)膨胀蛭石/石膏复合保温板的含水率与烧石膏/膨胀蛭石质量比的关系可以发现,随烧石膏/膨胀蛭石质量比的增加,复合保温板的含水率降低,而随膨胀蛭石的片径增大,含水率增加。复合保温板的吸水率主要由膨胀蛭石和石膏对空气中水分子的吸附引起,其中,膨胀蛭石的影响较大。膨胀蛭石颗粒的片径越大,其膨胀倍数和孔隙率越大,含水率越高(表1)。因此,膨胀蛭石复合保温板的含水率主要随膨胀蛭石片径的增大而增加。

由于微波化学法制备的膨胀蛭石较之微波膨胀蛭石膨胀更充分,比表面积更大,对水分子的吸附性更强,因而所制备的复合保温板的含水率较高。而浇注成型的膨胀蛭石保温板与模压板相比,含水率较低。这是由于浇注石膏板的质地比较致密,浇注过程中石膏浆体进入膨胀蛭石孔隙中,内部的气孔和孔隙减少,毛细作用较弱,吸水性不强,最终导致较低的含水率。

3.2 抗压强度

表2为烧石膏/膨胀蛭石质量比与膨胀蛭石/石膏

复合保温板抗压强度变化的关系。可以看出,随烧石膏/膨胀蛭石质量比的增加,复合保温板的抗压强度逐渐升高;而随膨胀蛭石片径的增大,复合保温板的抗压强度逐渐降低。这是因为膨胀蛭石颗粒的片径越大,膨胀所产生的孔隙越多,因此大片径膨胀蛭石制备的复合保温板抗压强度和密度相对较低。与微波法相比,微波化学法制备的膨胀蛭石由于膨胀倍数较高,因而复合保温板的抗压强度相对较低。

表2 膨胀蛭石/石膏保温板的抗压强度

Table 2 Compressive strength of expanded vermiculite/gypsum insulation boards

| 烧石膏/膨胀 蛭石质量比 | P-Sm /MPa | P-Bm /MPa | P-Smc /MPa | P-Bmc /MPa | C-Sm /MPa | C-Bm /MPa |
|-----------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| 0.4 | 0.47 | 0.32 | 0.20 | 0.18 | 0.64 | 0.52 |
| 0.5 | 0.69 | 0.34 | 0.27 | 0.19 | 0.86 | 0.75 |
| 0.6 | 0.99 | 0.39 | 0.36 | 0.20 | 1.18 | 0.98 |
| 0.8 | 1.17 | 0.43 | 0.43 | 0.21 | 1.41 | 1.20 |
| 1.1 | 1.45 | 0.67 | 0.50 | 0.24 | 1.65 | 1.43 |
| 1.3 | 1.76 | 1.02 | 0.67 | 0.27 | 2.02 | 1.66 |
| 1.5 | 1.92 | 1.49 | 0.77 | 0.37 | 2.38 | 1.85 |

由表2还可以发现,在烧石膏/膨胀蛭石质量比、膨胀蛭石的片径和制备方法相同时,浇注的复合保温板比模压保温板具有更大的密度和更高的强度,主要的原因是浇注过程中石膏浆体进入膨胀蛭石孔隙中,成型的水量充足,石膏水化反应进行得更为充分,石膏的结晶性好,晶体致密度高,因此形成的保温板的密度和抗压强度均较高。

3.3 导热系数

图2为膨胀蛭石保温板的导热系数与烧石膏/膨

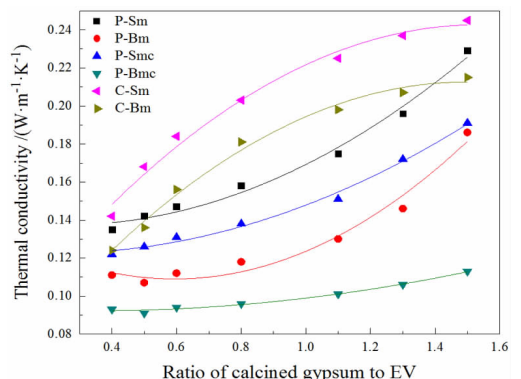


图2 膨胀蛭石保温板的导热系数与烧石膏/膨胀蛭石的关系

Fig. 2 Relationship between thermal conductivity of expanded vermiculite insulation board and calcined gypsum/expanded vermiculite

膨胀蛭石质量比的关系。可以看出,相对于大片径的膨胀蛭石,小片径膨胀蛭石制作的保温板的导热系数较大,分析认为小片径的膨胀蛭石由于膨胀倍数小,堆积密度大,因而颗粒内部空洞较小(少),接触点更多,热量在板体内部传递时热阻更小,因而板体的导热速率更快,导热系数更大。

而相对于微波法,微波化学法制备的膨胀蛭石的膨胀率更高,堆积密度更小,颗粒内部和颗粒间的间隙较多,所以制备的复合保温板的导热系数较低。相对于模压成型,浇注成型制备的膨胀蛭石复合保温板由于石膏进入膨胀蛭石颗粒的孔隙中,导致致密度增高,孔隙率降低。因此,浇注成型的复合保温板的导热系数明显高于模压成型的复合保温板。

4 微波法膨胀蛭石制备技术在建筑和管道保温中的应用

膨胀蛭石保温材料的保温性能受生产、施工等因素的影响,材料的保温性能可根据保温材料的相关标准测试导热系数等数据来评价,为全面直观评价保温效果,我们建设了内墙保温样板工程和管道保温样板工程。

4.1 内墙保温

选择大小、结构相同样板房共两间,样板房内墙用微波化学膨胀蛭石进行保温抹灰处理,作为对照的另一间样板房未做任何保温处理(图3)。在冬季室外平均气温为 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,采用相同型号的分体落地式空调(型号KFR-50LW/DHR(W1-G)+T)对试验样板房间和对照样板房间进行供热,空调预设温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (制热模式)。在相同试验条件下,比较保温处理样板房与未保温处理样板房内的空调维持预设室内温度所消耗的电量差异,从而计算二者的差值,得到节能效率并对保温效果做出相应评价。



图3 石膏基保温砂浆的施工(a.保温层的施工;b.抹面层的施工)

Fig. 3 Construction of gypsum-based thermal insulation mortar (a. construction of thermal insulation layer; b. construction of plastering layer)

图4a为两间样板房能耗与运行时间的关系。可以看出,样板房的耗电量与系统运行时间呈显著的线性相关关系,耗电量随运行时间的增长而增加,保温样板房耗电量对应直线的斜率明显小于对比样板房耗电量对应直线的斜率;从图4b保温样板房节约电量、节能效率与运行时间的关系图可以看出,从系统开始运行至50 h,节能效率快速提升至20%左右,之后稍有提升,约300 h后,保温样板房的节能效率一致稳定在20%左右。在运行700 h时,保温样板房较对照样板房节电 $150\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

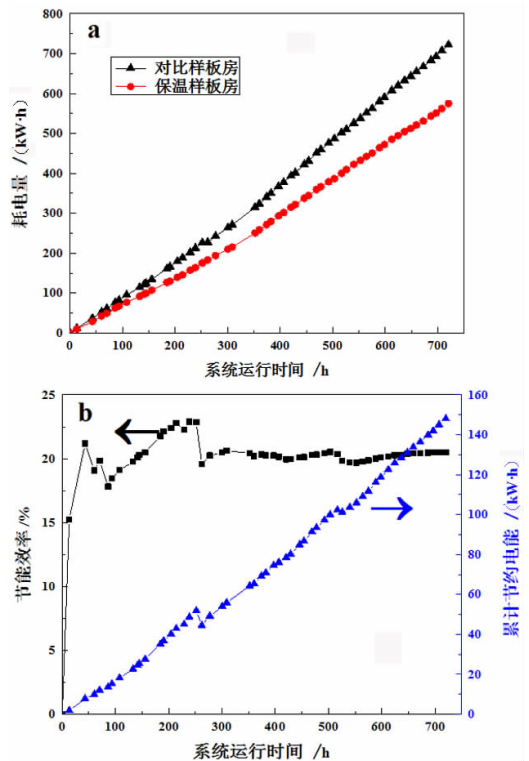


图4 样板房能耗与保温样板房节电量、节能效率与运行时间的关系(a.耗电量;b.节约电量、节能效率)

Fig. 4 The relationship between the energy consumption of the model house and the power saving, energy saving efficiency and running time of the thermal insulation model house (a. power consumption; b. power saving and energy saving efficiency)

4.2 管道保温

建设两组热水循环管道,其中一组为保温样板管道,采用微波化学膨胀蛭石保温材料保温;另一组为对照组,管道全裸露,没有敷设保温材料进行保温处理。在冬季室外平均气温为 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,分别采用储水式电热水器(型号F65-21B1,额定功率 $1\text{ }000\text{ W}$)加热产生恒温热水,预设水温 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用循环热水泵使热水在管道中循环。在相同试验条件下,比较保温管道系

统与裸露管道系统电热水器维持预设热水温度所消耗的电量差异,计算二者的差值得到保温管道累计节约电量,进一步计算节能效率并对保温系统的保温效果做出相应评价。

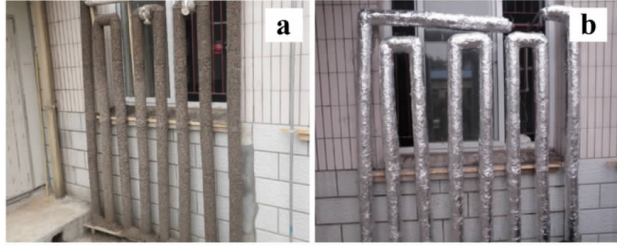


图5 管道保温层水泥基保温砂浆的施工(a. 保温层的施工;b. 防水层的施工)

Fig. 5 Construction of cement-based thermal insulation mortar for pipeline thermal insulation layer (a. Construction of thermal insulation layer; b. Construction of waterproof layer)

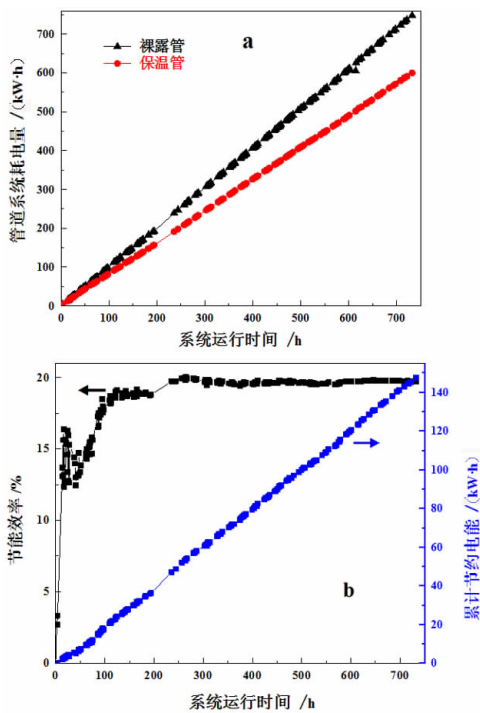


图6 保温管能耗、节能与系统运行时间的关系(a. 耗电量;b. 节约电量、节能效率)

Fig. 6 The relationship between energy consumption, energy saving and system running time of thermal insulation pipes (a. power consumption; b. power saving and energy saving efficiency)

图6a为保温管道和裸露管道的能耗与系统运行时间的关系。可以看出,保温管道的耗电量和裸露管道的耗电量均与系统运行时间存在显著的线性关系,耗电量随运行时间的增长而成正比增加,保温管道耗

电量的变化速率明显小于裸露管道的耗电量变化速率;从图6b保温管道的节约电量、节能效率与系统运行时间的关系可以看出,保温管道累计节省电能与系统运行时间呈显著的线性相关关系,从系统运行至100 h节能效率快速提高,之后稍有提升,约240 h后,保温管道系统的节能效率一直稳定在20%左右。在运行700 h时,保温管道较对照的裸露管道节电147 kW·h。

5 膨胀蛭石在建筑节能和减碳中的作用

膨胀蛭石保温样板房工程和管道保温样板工程实例表明,膨胀蛭石保温材料具有很好的保温节能效果。若将膨胀蛭石作为建筑保温材料使用,以其良好的保温、隔热、隔音性能和优异的防火性能,加之可与其他材料复合加工制备高性能的保温隔热材料,在建筑节能和减碳领域将会有广阔的应用空间。

5.1 在保温、隔热、吸音材料方面

用膨胀蛭石与其他黏结材料(如石膏、水泥、水玻璃、沥青、合成树脂等)或增强材料(如石棉、玻璃纤维等)混合,根据不同用途的需要制造出各种形状和规格尺寸的砖、板、管、壳等制品以及膨胀蛭石混凝土、膨胀蛭石灰浆等,它们可被广泛地用作温室和冷冻库的墙壁及各种工业管道(如输油、输汽(气)、输水管道)、热工设施和窑炉的保温和绝热层;高层建筑钢架的包裹材料等,可达到保温、隔热或保冷的目的。用于礼堂、影剧院、广播室、电话室、录音室等建筑物的内壁,还可达到吸音、隔音的目的^[22]。

以膨胀蛭石制成的高强度轻质耐火板,可用作高级建筑物的耐火夹层、防火门的门芯、隧道电气和电缆的防火隔板、舰船上的隔板、顶板、防火家具等。用膨胀蛭石砌块或板材装修屋顶或天花板,或用松散的膨胀蛭石作为绝热夹层,可保持屋内温度,且能抗震、抗裂、防火,用于冷藏库、仓库、图书馆、档案室及特殊要求场所^[23]。

5.2 在节能、降耗方面

膨胀蛭石除在保温、隔热领域中应用具有节能降耗的作用外,在浇铸钢锭时也用膨胀蛭石对钢水液面保温,使钢材合格率提高20%,钢材总成本减少10%~39%。由于膨胀蛭石能起到使钢水缓慢冷却和除去杂质的作用,因而能显著改善钢的显微结构,并使优质钢产量增加2%~4%^[24]。

用无机纤维和黏结剂与膨胀蛭石制成的隔热板材可做成工业窑炉的隔热保温材料。膨胀蛭石砌块和板

材可用于对各种热工设施和钢、玻璃、陶瓷窑炉的保温。膨胀蛭石产品允许使用温度达1 000 ℃以上,因此可广泛用作耐火砖的耐火保温涂层,以达节能的目的^[25]。

6 结语

我国二氧化碳的排放力争在2030年前达到峰值,在2060年前实现“碳中和”。建筑行业的节能降耗对碳达峰和碳中和至关重要,这对新型无机保温材料及其制备技术的需求更加迫切。工业蛭石加工为膨胀蛭石及制品后,具有优异的轻质、保温和绝热性能,可广泛用作工业和民用设施的保温隔热材料,具有显著的节能降耗、控制能耗强度并助力碳减排碳达标的功能,对于构建绿色建筑与节能降碳工程,促进国家碳达峰、碳中和重大战略决策的实施具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 臧鑫宇,王娟,李含嫣. “双碳”目标下的生态城市发展战略与实施路径[J]. 科技导报,2022,40(6):30-37.
ZANG X Y, WANG Q, LI H Y. Eco-city development strategy and implementation under the target of carbon peaking and carbon neutrality? [J]. Science & Technology Review, 2022, 40(6): 30-37.
- [2] 彭同江,孙红娟,罗利明,等. 工业蛭石的矿物学属性及在“双碳”战略中的作用[J]. 矿产保护与利用,2021,41(6):1-8.
PENG T J, SUN H J, LUO L M. The mineralogical properties of industrial vermiculite and its role in the strategy of saving energy and reducing CO₂ emission[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021,41(6):1-8.
- [3] A. G, A. Y, S. D, et al. Effect of expanded vermiculite and expanded perlite as pore forming additives on the physical properties and thermal conductivity of porous clay bricks[J]. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 2018, 53(2).
- [4] 潘兆橹. 结晶学及矿物学[M]. 北京:地质出版社,1993.
PAN Z L. Crystallography and Mineralogy [M]. Beijing: Geological Press, 1993.
- [5] SONG W, WANG M, LIU S, et al. Preparation and properties of rigid polyurethane/expanded vermiculite composite thermal insulation material [J]. Engineering Plastics Application, 2019.
- [6] NIGMATULLINA A I, GALIMZYANOVA R Y, YU N K, et al. Sound-absorbing polymer composite materials for construction purposes[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2020, 753: 52027.
- [7] 方小林. 膨胀蛭石复合阻燃保温材料的制备与性能研究[D]. 天津:天津工业大学,2016.
FANG X L. Preparation and properties of expanded vermiculite composite flame retardant thermal insulation materials[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2016.
- [8] 薛韩玲,郭佩奇,彭俊杰,等. 高地温掘进巷水玻璃膨胀蛭石隔热围岩传热与降温特性[J]. 西安科技大学学报,2021,41(6):997-1005.
XUE H L, GUO P Q, PENG J J, et al. Characteristics of airflow temperature decline and heat transfer from surrounding rock of digging tunnel insulated by waterglass/expanded vermiculite in high temperature mine [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(6): 997-1005.
- [9] 刘文,陈朝阳,闫世友. 耐水性膨胀蛭石板材的研制[J]. 应用化工, 2011,40(6):993-996.
LIU W, CHEN Z Y, YAN S Y. Development of water-resistance expanded vermiculite board [J]. Applied Chemical Industry, 2011, 40(6): 993-996.
- [10] 方小林,宋俊,郑云波,等. 膨胀蛭石/酚醛阻燃保温复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报,2016,33(11):2426-2435.
FANG X L, SONG J, ZHEN Y B, et al. Preparation and performance of expanded vermiculite/phenolic flame retardant and insulation composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(11): 2426-2435.
- [11] 余剑英,魏连启,曹献坤,等. 有机蛭石/酚醛树脂熔插层纳米复合材料的研究[J]. 材料工程,2004(4):20-23.
YU J Y, WEI L Q, CAO X K, et al. Organized vermiculite/phenolic resin nanocomposites prepared by melt intercalation[J]. Journal of Materials Engineering, 2004(4): 20-23.
- [12] 江甜甜. 聚酰亚胺泡沫的制备及其改性研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2020.
JIANG T T. Preparation and modification of polyimide foam[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.
- [13] 高欢. 珍珠岩基多孔地质聚合物保温材料制备及其传热机理[D]. 北京:中国地质大学,2021.
GAO H. Preparation and heat transfer mechanism of perlite-based porous geopolymer thermal insulation materials[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.
- [14] 王正洲,杨婷. 膨胀蛭石包覆聚苯乙烯发泡颗粒/水泥复合泡沫材料的制备及性能[J]. 高等学校化学学报,2018,39(5):1098-1104.
WANG Z Z, YANG T. Preparation and properties of expanded vermiculite coated expanded polystyrene/cement composite foams[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2018, 39(5): 1098-1104.
- [15] 罗斌,黄炜,马相,等. 采用发泡聚苯乙烯保温砂浆芯材的夹芯叠合板受弯性能[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(11):2185-2196.
LUO B, HUANG W, MA X, et al. Flexural behavior of sandwich composite panels with core material of expanded polystyrene thermal insulation mortar[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2019, 53(11): 2185-2196.
- [16] 刘卓,赵志曼,吴磊,等. 膨胀蛭石对石膏制品性能影响研究[J]. 非金属矿,2020,43(1):52-54.
LIU Z, ZHAO Z M, WU L, et al. Study on the effect of expanded vermiculite on the properties of gypsum products [J]. Non-Metallic Mines, 2020, 43(1): 52-54.

- [17] 习永广,彭同江. 膨胀蛭石/石膏复合保温材料的制备与表征[J]. 复合材料学报,2011,28(5):156-161.
XI Y G, PENG T J. Preparation and characterization of expanded vermiculite/gypsum thermal insulation composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(5): 156-161.
- [18] XI Y G, PENG T J, LIU H F, et al. Preparation and properties of expanded vermiculite/gypsum thermal insulation boards [J]. Advanced Materials Research, 2010, 178: 220-225.
- [19] 管柏伦. 新型轻质低导热地聚合物材料高温性能研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2021.
GUAN B L. Research on high temperature performance of new lightweight and low thermal conductivity geopolymer materials [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [20] 管亚斐. 储热混凝土制备及热性能研究[D]. 南京:东南大学,2020.
GUAN Y F. Preparation and thermal properties of heat storage concrete [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [21] 廖仕雄,赵志曼,张晖,等. 储能磷建筑石膏基的制备与性能研究[J]. 非金属矿,2021,44(4):53-57.
LIAO S X, ZHAO Z M, ZHANG H, et al. Study on preparation and properties of phosphorus building gypsum base for energy storage [J]. Non - Metallic Mines, 2021, 44(4): 53-57.
- [22] RASHAD, ALAA M. Vermiculite as a construction material - a short guide for civil engineer[J]. Construction & Building Materials, 2016, 125: 53-62.
- [23] 周国富,杨新生. 膨胀蛭石防火板的性能及用途[J]. 新型建筑材料,2009,36(12):3.
ZHOU G F, YANG X S. Properties and application of vermiculite fire-proof board[J]. New Building Materials, 2009, 36(12): 3.
- [24] 张焜,程胜高. 膨胀蛭石的性质及其应用前景[J]. 矿物岩石地球化学通报,2007(z1):584-585.
ZHANG K, CHENG S G. Properties and application prospects of expanded vermiculite[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2007(z1): 584-585.
- [25] 刘福生,彭同江,张宝述. 膨胀蛭石的利用及其新进展[J]. 非金属矿,2001(4):2-4.
LIU F S, PENG T J, ZHANG B S. Utilization of expanded vermiculite and its new progression[J]. Non - metallic Mines, 2001(4): 2-4.