

膨胀珍珠岩及气相二氧化硅填充硅橡胶复合材料的制备与隔热性能

王 威¹, 孔 波¹, 陈淑梅^{2,3}, 吕书培^{2,3}, 苗 超^{2,3}, 柯 学^{2,3}, 王森咏^{2,3}, 王文君^{2,3}, 欧阳静^{2,3}

(1. 湖南中烟工业有限责任公司技术中心, 长沙 410007; 2. 中南大学, 湖南省矿物材料与应用重点实验室, 长沙 410083; 3. 中南大学资源加工与生物工程学院 无机材料系, 长沙 410083)

摘 要: 研究珍珠岩基新型复合保温材料是开拓矿物材料应用领域的新课题。本工作研究了 2 种不同尺寸珍珠岩以及气相二氧化硅作为复合填料, 分别以捏合工艺和直接混合工艺填充于乙烯基硅油或室温硫化硅橡胶, 制备珍珠岩填充的复合硅橡胶保温板, 通过检测不同产物的导热系数以及保温效果来评价其性能。结果表明: 以捏合工艺制备的产品会降低珍珠岩的保温效果, 主要原因是中空颗粒被捏合过程破碎; 而以气相二氧化硅为主要填料制备的保温板不易成型, 可成型产品最低导热系数为 $0.1728 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; 当以珍珠岩+气硅粉在硅橡胶中的质量比为 37.5% 时, 产品导热系数为 $0.0349 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 产物厚度为 2.5 cm、250 °C 单侧加热 4 min 后, 背面温度为 67 °C, 基本满足在新型烟具等特种保温隔热应用要求。

关键词: 膨胀珍珠岩; 气相二氧化硅; 硅橡胶复合材料; 保温材料

中图分类号: TQ171 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)04-0975-07

网络出版时间: 2023-03-09



Preparation and Performance Regulation of Perlite and Fumed Silica Composites Silicone Rubber for Thermal Insulation Materials

WANG Wei¹, KONG Bo¹, CHEN Shumei^{2,3}, LYU Shupai^{2,3}, MIAO Chao^{2,3}, KE Xue^{2,3}, WANG Senyong^{2,3},
WANG Wenjun^{2,3}, OUYANG Jing^{2,3}

(1. Technology Center, China Tobacco Hunan Industrial Co., Ltd., Changsha 410007, China; 2. Hunan Key Lab of Mineral Materials and Application, Central South University, Changsha 410083, China; 3. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Developing some thermal insulating composite materials based on perlite is a subject to expand the application of mineral materials. In this paper, the vinyl silicone oil or room-temperature vulcanized silicone rubber was mixed with two kinds of perlite with different sizes and fumed silica as fillers through a kneading process and a direct mixing process, respectively. Some composite silicone rubber insulation boards were prepared and evaluated by the thermal conductivity and insulation performance. The results show that the product prepared by the kneading process has resulted in a reduced heat preservation ability of perlite, probably due to the broken hollow particles. The insulation board prepared with fumed silica as a main filler is difficult to form their shape, and the minimum thermal conductivity is $0.1728 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ for the formed sample. When a mass ratio of perlite and fumed silica in silicone rubber is 37.5% and the product thickness is 2.5 cm, the minimum thermal conductivity is $0.0349 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, and the back-side temperature is 67 °C after heating at 250 °C for 4 min, which basically meets the application requirements of thermal insulation materials for tobacco facility.

Keywords: perlite; fumed silica; silicone rubber composites; thermal insulating material

保温材料在工业节能、民用建筑保温、高温防护等领域具有重要的应用市场。随着工业生产的发展, 对隔热保温材料的性能要求越来越高。在烟草

行业, 最近开发了一种低温不燃烧的烟具, 这种烟具在 250 °C 加热烟草后, 在 4 min 左右的时间保持这一温度, 从烟叶中挥发的烟气供烟民抽吸。这就

收稿日期: 2022-07-30。 修订日期: 2022-09-14。

基金项目: 湖南中烟工业技术有限责任公司开放课题(KY2021KF0011);
湖南省大学生创新训练计划项目(S2022105330329)。

第一作者: 王 威(1991—), 男, 硕士, 工程师。

通信作者: 欧阳静(1980—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-07-30. Revised date: 2022-09-14.

First author: WANG Wei (1991—), male, Master, Engineer.

E-mail: wangw0219@hngytobacco.com

Correspondent author: OUYANG Jing (1980—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: Jingouyang@csu.edu.cn

要求烟具在加热的时间内,器具外层的温度不能过高,以免发生烫伤事故。因此对烟具外层的保温隔热材料提出了较高的要求。目前公开的技术中,有利用真空隔热技术^[1],也有以玻璃纤维/气凝胶毡为隔热层的保温材料^[2-4]。但真空保温容易发生真空度降低问题,气凝胶毡的方法则有容易掉粉、隔热性能逐渐下降以及成本较高的问题。因此,亟需开发一种新的性能稳定可靠的保温隔热材料,满足新型烟具应用过程中的隔热与防护等性能要求。

目前常用的保温材料包括无机、有机、金属及其夹层保温材料。无机保温材料因为具有高化学稳定性、不燃烧、耐高温、价格低廉、经久耐用等特点,可以有效避免有机材料容易燃烧并释放大量有毒气体的这些缺点,在大量的中高温保温材料领域得到了应用,其主要成分包括天然矿物、人造多孔材料等^[5-12]。无机隔热材料也为新型烟具有开发提供了一定的可选的隔热材料。但现有的资料中,由于新型烟具属于新兴的卷烟产品,可供选择利用的隔热材料资料极为有限。

珍珠岩是保温材料家族的重要成员,因其具有典型的珍珠裂隙结构而得名。其孔形态主要为开孔、闭孔和中空孔的类多孔性质,具有化学稳定性好、不易燃、导热系数低、质轻等优良性能,是有机保温原材料最重要的替代品之一^[13-16]。Wang 等^[17]提出了一种在膨胀珍珠岩的孔隙内合成气凝胶生产新型建筑保温材料的方法,产品导热系数明显降低,有望获得性能更突出的隔热保温材料。

气相二氧化硅是一种蓬松的、白色无定形结构超细粉末,具有高孔隙率、纳米孔径、低密度等特点。其三维网状结构可以延长固体导热的传递路径,极大地抑制了气体分子之间的传热,从而降低固体导热系数,具有优良的保温性能^[18-20]。因此,一些研究致力于制备气相二氧化硅保温材料,研究最多的是由气相二氧化硅制备的隔热板^[21-22],但存在高温易碎、易收缩等缺点。提高该类材料强度的方法有 2 种:提高纤维强度,或在保温材料中引入适量的增强相,如硅橡胶、矿物纤维等^[23]。

硅橡胶是一种以甲基或乙烯基硅油单体为基体,填充适当填料后,引发单体聚合形成的软质高分子复合材料,是一种应用广泛的聚合物材料,具有优良的电气、热和化学性能^[24]。其中的填料主要包括气相二氧化硅、氧化铝粉体等,主要作用是增加硅橡胶复合材料产品的强度、提高耐压性能以及耐热性能^[25-26]。姜水军等^[27]用行星式球磨机将珍珠

岩超细粉碎至微纳米级粉体,并将粉体用捏合机进行改性处理。结果表明,随着粉体粒度不断变细,密度没有明显的波动,达到了低密度橡胶助剂的要求,提供了进一步研究膨胀珍珠岩粉体作为橡胶填料可能性。陈晓松等^[28]用硅烷偶联剂对膨胀珍珠岩粉进行表面改性,并用模压法制备了丁苯橡胶/膨胀珍珠岩复合材料,结果表明,改性膨胀珍珠岩粉适量填充丁苯橡胶能明显提高复合材料的力学性能和热性能。

因硅橡胶的结构稳定、网络空间发达,产品具有明显的弹性,在较高的温度(约 250 °C 以内)不发生分解,但当环境温度达到 250 °C 以上时,将发生变质、永久变形。因此,以硅橡胶为基体,内部填充珍珠岩、气相二氧化硅等,有望形成能够耐受 250 °C 温度的耐热保温材料,在中低温管道保温、隔热等领域具有一定的应用潜力,对新型烟具的使用环境中也有明显的适应能力,有望开发出满足新型烟具要求的保温和隔热材料。在目前的文献中,尚没有尝试以珍珠岩和气相 SiO₂ 共同填充硅橡胶制备隔热材料的文献资料。本工作探索以珍珠岩和气相二氧化硅为复合填料,制备硅橡胶为基体的中低温隔热复合材料,并探究其在 250 °C 以内的隔热和保温性能,并分析影响隔热性能的原因和机理,讨论用于新型烟具的适应性的可行性。

1 实验

1.1 试剂与材料

所用珍珠岩微球由河南信阳华城珍珠岩科技有限公司生产,以不同粒径来区分样品的编号,小尺寸和大尺寸的样品分别标记为 1#珍珠岩、2#珍珠岩;气相二氧化硅粉由山东万化天合新材料有限公司生产,比表面积为 220.0 m²/g;以上 2 种珍珠岩和气相 SiO₂ 的基本物理性能如表 1 所示;乙烯基硅油由佛山市盈智有机硅材料有限公司生产;α,ω-二羟基聚硅氧烷(107 硅胶),山东盛亿隆化工有限公司生产;过氧化苯甲酰(双 24 硫化剂),济南恒达化学助剂有限公司生产;正硅酸乙酯(TEOS),张家港新亚化工有限公司生产;无水乙醇为市售产品。

1.2 试验方法及步骤

实验中分别以捏合法和室温硫化法制备硅橡胶为基体的隔热材料。实验的配方设计是在以尽量多使用无机填料的原则下,逐步增加作为黏结剂的硅橡胶用量,以“能否成型”为判断依据,即时调整实验方案,并测试相关使用性能。

表 1 2 种珍珠岩和气相二氧化硅原料的基本物理化学参数

Table 1 Typical physico-chemical parameters of two kinds of perlite samples and fumed silica resources

Sample	Average diameter $D_{50}/\mu\text{m}$	Cumulative density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Rate of spherical shape/%	SiO_2 content/%	Al_2O_3 content/%	$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ content/%	Whiteness/ %	Thermal conductivity/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
1# perlite	30	85	80~90	64.6	12.2	15.3	90	≤ 0.048
2# perlite	812	102	60~70	53.7	10.9	19.2	92	≤ 0.079
Fused SiO_2	0.02	50		≥ 99.8			98	≤ 0.020

在捏合成型的工艺中,将乙烯基硅油和不同比例(具体配比见表 2)的珍珠岩颗粒、气相二氧化硅粉加入捏合机(江苏井上机械 NHZ-50 型)后,挤压捏合 30 min 至物料完全混合均匀,记为基材;切取 300 g 基材,加入 1.5% (质量分数)比例的双 24 硫化剂,在开炼机(广州飞力 XK-150×500 型)上混合均匀后,置于平板硫化机(东莞弘宝 HB-7014A)在 170 °C 下保温并在 2 MPa 压力下保压 1 min 硫化,用凉水冷却后制得厚度约为 6 mm 的珍珠岩/硅橡胶复合保温材料,样品编号为 1~6 号。

在液相黏结成型的工艺中,以室温硫化硅橡胶(107 硅胶)为黏结剂,以小颗粒的 1#珍珠岩和气硅粉为原料,以无水乙醇为搅拌过程中的分散介质以及溶剂,使用正硅酸乙脂(TEOS)为表面改性剂以增强填料与橡胶的结合力,并尽量使得产物能够成型。以浆叶搅拌的方式将原料在液相中混合均匀,加入 1.5% 比例的双 24 硫化剂搅拌均匀后,混合料取出后在 2 MPa 下压制成约 2.5 cm 厚的板材,在 105 °C 烘干即获得成品,该组样品的编号为 7~15 号。

1.3 测试与表征

样品的结晶形态以丹东浩元的 D8 型 X-射线衍射仪分析,使用铜 K_α 射线源,扫描步长 0.02°;以 Malvern Panalytical 型 X-射线荧光光谱仪分析珍珠岩原料的主要化学成分;样品和断口的形貌和颗粒尺寸使用型号为 MIRA3 的扫描电子显微镜(SEM)来观察;使用西安夏溪的 XIATECH-TC3100 设备测定样品的导热系数。测试时,需要将 2 块相同成分的样品放入测试箱内,夹住测试探头,用 500 g 砝码压住,再在室温下采集数据。保温性能采用实验室搭建平台测试,具体包括 Agilent 34970A 和 34972A 数据采集/开关单元、搭载 Agilent BenchLink Data Logger 3 软件的笔记本电脑、DX100 10 通道炉温测试仪、黏贴式 Pt 100 铂电阻贴片、2 800 mA·h 3.7 V 电源适配器等设备。利用 Agilent 34970A 和 34972A 数据采集/开关单元采集电阻贴片或电热偶所测得的温度信号,使用 Agilent BenchLink Data Logger 3 软件记录每一点的温度并将实际温度的

变化通过曲线形式体现出来,精确的体现出最高、最低、平均温度及标准偏差。保温效果测试时,样品在平铺在设定温度为 250 °C 的平板加热器上加热,保温 4 min 后,测试另一侧的温度,评价其保温效果。

2 结果与讨论

2.1 原料性质与形貌

图 1 为 2 种原料的形貌图,从图 1 可以看出,1#珍珠岩中,大部分为 20 μm 左右的球形颗粒,个别微球的尺寸达 50 μm ,也有少量片状产物和更细小的碎屑,推测为珍珠岩加工、运输过程中被压碎的玻璃质碎片。2#珍珠岩的尺寸大部分为 50~80 μm ,可见到部分微球表面破裂后内部的中空内腔,证明膨胀过程中将结晶水快速加热时产生的压力将珍珠岩结构破坏并形成的球形中空腔体,该特性对保温隔热效果具有明显的优势;该样品中同样存在一定的片状碎屑。2 种珍珠岩均表面光滑,但是小颗粒珍珠岩的形貌更为完整,原因在于大颗粒样品单颗强度稍低,更容易被压裂。

所使用的气相 SiO_2 原料初始粒子为粒径小于 40 nm 的球形纳米颗粒(图 1h),因其较大的比表面积(220.0 m^2/g)而自发团聚,形成尺寸达 10~30 μm 的类球形集合体(图 1g)。在适合比例的分散的气相 SiO_2 和珍珠岩的颗粒,将可形成一定的粒径级配,形成 2 种原料间的类紧密堆积,在空隙位置填入黏结剂后,将有利于与硅橡胶基体的结合,形成强化的隔热效果。

珍珠岩和气相 SiO_2 原料的 XRD 结果显示,几种原料均没有明显的晶相,只有在 28°附近的明显衍射峰包,证明它们基本为无定形结构的产物,与无定形 SiO_2 的峰类似。在 1#珍珠岩样品的 XRD 谱 $2\theta=8.9^\circ$ 位置($d=9.9 \text{ \AA}$)出现了 1 个明显的散射峰,该峰位置与层状硅酸盐(如云母、高岭石等)的(001)面位置相对应,但又不存在其它明显的衍射位置,说明该样品在受热膨胀过程中存在有一定未完全撑开的层状硅酸盐结构,说明小颗粒的 1#样品有一定的

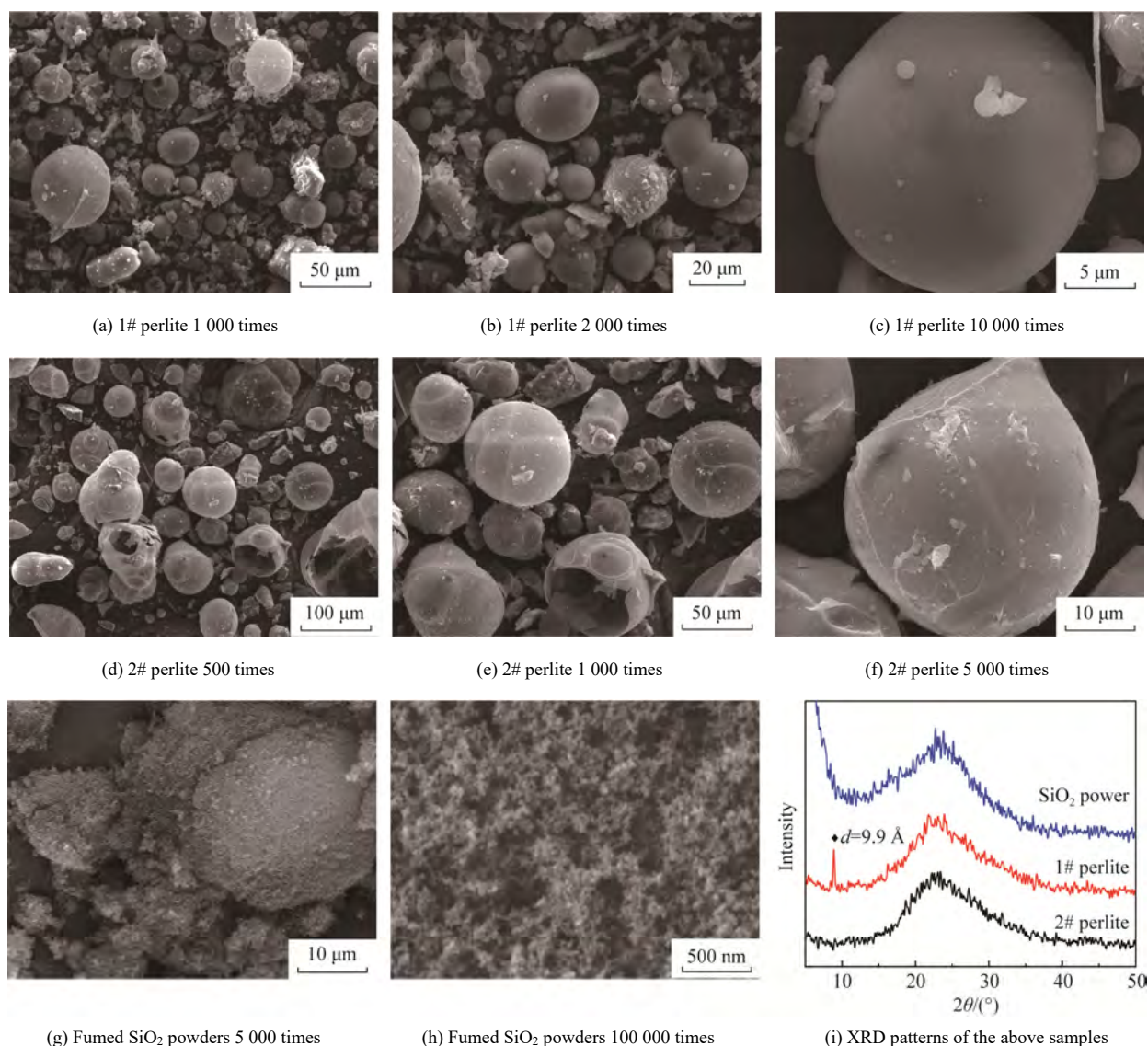


图1 (a~c) 1#珍珠岩; (d~f) 2#珍珠岩; (g~h) 气相 SiO₂ 粉体的 SEM 照片; (i) 以上样品的 XRD 谱
Fig. 1 SEM images of (a~c) 1# perlite; (d~f) 2# perlite; (g~h) Fumed SiO₂ powders; (i) XRD patterns of the above samples

短程有序的结构单元, 相比于 2#珍珠岩中没有任何明显衍射峰位的样品有明显差异。

2.2 珍珠岩和气相二氧化硅填充硅橡胶保温材料的配方试验

为了探究制备工艺对保温板性能的影响, 按表 2 中的配比压制了多种比例和基体类型的硅橡胶制品, 所获得产品的照片如图 2 所示。该组样品设计的是在逐步提高填料用量、相对减少硅橡胶用量时, 测试样品的使用性能。对于只添加了少量细粒珍珠岩和气硅粉的样品(1#), 因硅橡胶占大多数, 样品呈半透明状, 导热系数为 $0.2142 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 在 250°C 加热 4 min 之后, 背面温度高达 147°C ; 增加珍珠岩质量分数至 50%~60%时, 样品的隔热效果开始增强。对于样品 3, 珍珠岩用量达 60% (分别由粗颗粒 15%、

细颗粒珍珠 45%)、气硅粉用量 10%时, 导热系数降至 $0.1728 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 背面平均温度下降至 132°C 。基于这一配方, 样品 5、样品 6 是增加了气硅粉用量的隔热材料, 其中样品 5 因为填充量太多, 且气硅粉用量太大, 该产品的硅橡胶已不能完全黏结无机填料, 出现开裂现象, 因此该样品的导热系数也大幅降低, 仅为 $0.1116 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 但该样品无法成型, 空隙率太大, 故导热系数虽然较低, 但不能用于隔热应用。样品 6 因大量使用大颗粒珍珠岩, 配合气硅粉的使用, 则勉强可以压制成型, 导热系数测量也上升至 $0.2924 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。以上两者的隔热应用的背面温度均高于样品 3。本组样品的背面温度均高于 130°C , 说明只有 5.5~6.0 mm 厚度的样品, 隔热性能需要进一步优化, 以提供更好保温效果。

表 2 珍珠岩填充硅橡胶制备保温板的原料配方比例与使用性能

Table 2 Compositions and properties of perlite filled silicone rubber thermal insulation boards							
Sample No.	Mass fraction/% (Extra 1.5% sulfidizing agent was added before molding)				Thickness/cm	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Back side temperature after heating at 250 °C for 4 min/°C
	1# perlite	2# perlite	Fused SiO ₂	Silicon rubber			
1	20.0	0	10.0	70.0	0.59	0.214 2	147.20
2	50.0	0	10.0	40.0	0.51	0.285 9	149.23
3	45.0	15.0	10.0	30.0	0.56	0.172 8	132.28
4	15.0	35.0	10.0	40.0	0.55	0.308 2	141.56
5	15.0	35.0	20.0	30.0	0.52	0.111 6	144.63
6	0	50.0	20.0	30.0	0.55	0.292 4	137.99



图 2 珍珠岩和气相 SiO₂ 填充硅橡胶保温材料的照片
Fig. 2 Photographs of the perlite and fumed SiO₂ filled silicone rubber thermal insulating materials

鉴于以上捏合法制备的 6 mm 厚的硅橡胶制品的保温性能还有待进一步加强，其原因是捏合机械使得大颗粒珍珠岩被大量破碎、隔热空腔被打通，造成隔热效果不理想。因此，本工作进一步采用了相对柔和的桨叶搅拌模式，尽量减少球形珍珠岩颗粒的破碎机率，并以改变配方、增加厚度的方法，以进一步降低非受热面的温度。

2.3 配料比例对材料成型与保温性能的影响

以 1#珍珠岩和气相二氧化硅为填料，以逐步递减的方法，研究 2 种填料用量对保温板的成型能力和保温性能的影响规律，结果见表 3。样品 7~样品 9 是在基本固定 107 胶用量时，考察气硅粉的用量及改性剂与否的差别。当仅使用气硅粉为填料时，需要

使用的 107 胶高达填料的 6.5 倍以上(样品 9)，才能压制成型，且此时样品导热系数为 0.074 5 W·m⁻¹·K⁻¹，在 250 °C 加热 4 min 之后背面温度为 76 °C。而单纯以 1#珍珠岩为填料时(样品 10~样品 12)，107 胶的用量仅为 1.6 倍以上时即可压制成型，导热系数略高于纯气硅粉填充的材料，为 0.083 9 W·m⁻¹·K⁻¹，但此样品的背面温度达到了 78 °C，可见单纯气硅粉或珍珠岩在以 107 胶成型后的保温效果一般。如果使用 2 种粉体的混合物为填料(样品 13~样品 15)，则在没有 TEOS 为改性剂、107 胶的用量为填料的 1.25 倍时即可以压制成型，产品的导热系数约为 0.03~0.05，相比于单一气硅粉或珍珠岩粉体填充硅橡胶的产物有大幅降低。填充量最大的样品(样品 13)的固体含量达 45%左右，此时导热系数为 0.042 7 W·m⁻¹·K⁻¹，样品有部分裂纹。导热系数最低的样品出现在填充量为 37.5%的样品(样品 14)，为 0.034 9 W·m⁻¹·K⁻¹。出现该差异是因为填充量太大时，同样出现了硅橡胶的黏结力不够，样品有粉化开裂的现象出现，导致导热系数在大量添加时反而上升的问题，同时样品也不利于实际使用。该组样品的隔热效果均相似，当厚度为 2.5 cm 左右时，测试条件下的背面温度下降至(67±1) °C，显示此组

表 3 珍珠岩和气相二氧化硅复合填料对于高温硫化硅橡胶保温板的性能

Table 3 Properties of Thermal Insulation Board Prepared by Perlite Composite Fumed Silica										
Sample No.	Purpose of experimental design	Mass of 1# perlite/g	Fused SiO ₂ /g	107 silicon rubber/mL	TEOS/mL	Ethanal/mL	Shaping or not	Thickness/cm	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Back side temperature after heating at 250 °C for 4 min /°C
7	Contrasting contents of fused SiO ₂	0	4.0	20	0	0	No	2.56	0.074 5	76
8		0	3.5	19	36	24	No	2.53		
9		0	3.0	20	12	0	Yes	2.15		
10	Contrasting contents of perlite	4.0	0	5	0	4	No	2.51	0.083 9	78
11		3.5	0	5	4	4	No	2.56		
12		3.0	0	5	4	4	Yes	2.54		
13	Contrasting contents of silicon rubber	2.0	2.0	5	0	4	Yes	2.55	0.042 7	67
14		1.5	1.5	5	0	4	Yes	2.54		
15		1.0	1.0	10	0	4	Yes	2.57		

TEOS is ethyl orthosilicate.

样品的保温效果比单一的填料均有明显改善,说明珍珠岩和气相二氧化硅由于粒径不同形成的相互填充间隙的作用,产生了对热量传递的阻隔作用,有效降低了产品的导热系数,对保温效果形成了关键影响。

2.4 气相二氧化硅质量分数对保温性能的影响

对于以上 2 种保温材料均出现不能成型的问题,因此,本工作观察了加工断裂样品的断口形貌,以分析物料的赋存状态以及结合方式。当硅橡胶用量低于 30% 时,珍珠岩/气硅粉填充的样品均较难成型(如图 2 中样品 5 出现断裂现象),此样品的断口形貌可观察到,在机械的强力捏合作用下,将会使得球形珍珠岩填料全部或部分被挤碎(见图 3),断口

处只能看到碎裂的片状颗粒,以及起黏结作用的硅橡胶。因为球形颗粒的破碎,保温过程中的传热通道被打开,因此 5 号样品的保温效果并没有体现出珍珠岩的优势。

而以搅拌法制备的 13 号样品,是以气硅粉和珍珠岩复合而制备的填料。由于没有捏合剪切力的作用,样品中没有出现大量的碎裂颗粒,较大直径的球形颗粒仍然保留在复合材料中,且该样品的颗粒排布密集程度更高、填料的含量更大,说明以 107 胶为黏结剂的搅拌、压制法合成的样品,产物的外侧温度也较低。因此,该制备方法具有一定的生产技术优势以及产品隔热性能优势。

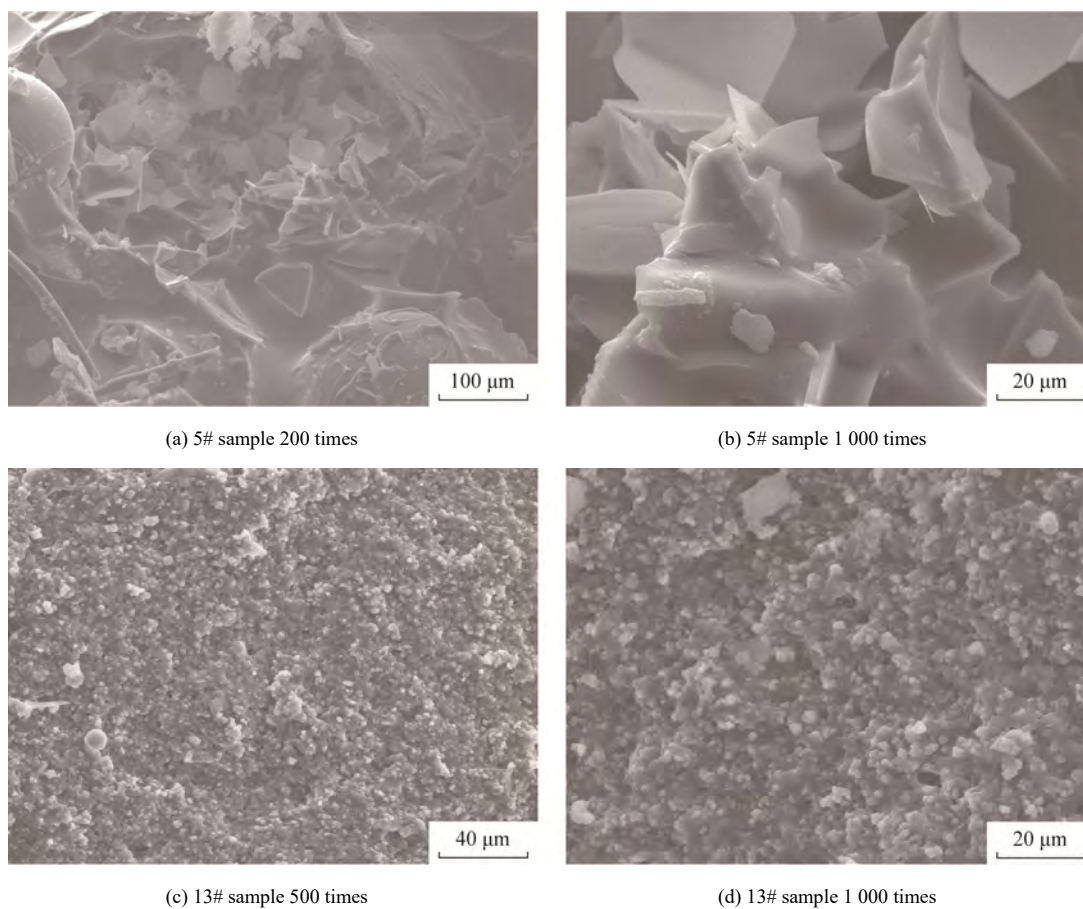


图 3 以捏合法制备的 5 号样品以及搅拌法制备的 13 号样品的断口 SEM 照片
Fig. 3 SEM images of prepared 5# sample and stirring prepared 13# sample

3 结论

1) 通过使用不同颗粒大小的珍珠岩,利用乙烯基硅橡胶等作为黏结剂,制备了厚度约 5.5 mm 的保温隔热材料,当小粒径 1#珍珠岩:大粒径 2#珍珠岩:气硅粉:硅橡胶的质量比例为 45:15:10:30 时,产品的导热系数降为 $0.1728 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,在 250 °C 加热

4 min 后,背面温度达 132 °C。表明珍珠岩质量分数、颗粒级配及气硅粉的补充作用,是影响产品的保温隔热材料效果的主要因素,机械捏合作用对球形颗粒有一定的破坏作用,将引起传热通道的连通,降低产品的隔热能力。

2) 利用 107 硅胶对珍珠岩和气硅粉的黏合作用,以搅拌混合方式制备了厚度为 2.5 cm 的珍珠

岩-气硅粉复合填充的硅橡胶基复合隔热材料, 产品中无机填料的填充质量比例为 37.5% 时, 此样品导热系数最低, 为 $0.0349 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 测试时背面温度仅为 67°C 。该方法具有较好的工业化应用前景, 形成的产品初步满足了新型烟具的保温和隔热使用要求。

参考文献:

- [1] 金治国. 一种真空隔热保温的加热不燃烧香烟全方位加热装置及其套件[P]. CN Patent, 201920602369.8, 2020-01-07.
JIN Zhiguo. An omnidirectional heating device and its kit with vacuum heat insulation materials for heating non burning cigarette (in Chinese). CN Patent, 201920602369.8, 2020-01-07.
- [2] 韩敬美, 郑绪东, 汤建国, 等. 一种微型加热保温及散热装置[P]. CN Patent, 201920835316.0, 2020-04-24.
HAN Jingmei, ZHENG Xudong, TANG Jianguo, et al. A miniature heating, heat preservation and heat dissipation device (in Chinese). CN Patent, 201920835316.0, 2020-04-24.
- [3] 雷萍, 汤建国, 陈永宽, 等. 一种炭加热不燃烧卷烟用复合隔热材料[P]. CN Patent, 201821780293.X, 2019-10-29.
LEI Ping, TANG Jianguo, CHEN Yongkuan, et al. A composite thermal insulation material for carbon heating non burning cigarettes (in Chinese). CN Patent, 201821780293.X, 2019-10-29.
- [4] 周瑾, 廖桂民, 宁琦, 等. 一种用于加热不燃烧烟草加热器的隔热件[P]. CN Patent, 201911391958.7, 2020-04-10.
ZHOU Jing, LIAO Guiming, NING Qi, et al. A thermal insulation element for heating non burning tobacco heater (in Chinese). CN Patent, 201911391958.7, 2020-04-10.
- [5] 孙志坚, 孙玮, 傅加林, 等. 国内绝热保温材料现状及发展趋势[J]. 能源工程, 2001(4): 26-28.
SUN Zhijian, SUN Wei, FU Jialin, et al. Energy Engin (in Chinese), 2001(4): 26-28.
- [6] 曾珍, 张雄. 建筑保温材料的发展[J]. 上海建材, 2005, 4(4): 28-30.
ZENG Zhen, ZHANG Xiong. Shanghai Building Mater (in Chinese), 2005, 4(4): 28-30.
- [7] 倪德良. 保温隔热材料(上)[J]. 节能与环保, 1989(3): 13-19.
NI Deliang. Jieneng yu Huanbao (in Chinese), 1989(3): 13-19.
- [8] 瑚佩, 姜勇刚, 张忠明, 等. 耐高温、高强度隔热复合材料研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(7): 86-94.
HU Pei, JIANG Yonggang, ZHANG Zhongming, et al. Mater Rep (in Chinese), 2020, 34(7): 86-94.
- [9] 江峰, 江伟辉, 冯果, 等. SiO_2 气凝胶添加量对 YSZ 多孔隔热材料制备与性能的影响[J]. 中国陶瓷, 2020, 56(2): 14-19.
JIANG Feng, JIANG Weifeng, FENG Guo, et al. China Ceram (in Chinese), 2020, 56(2): 14-19.
- [10] 史振宇. ZrO_2 气凝胶材料的微观结构调控及其隔热性能研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2018.
SHI Zhengyu. Microstructure Control and Thermal Insulation Properties of ZrO_2 Aerogel (in Chinese, dissertation). Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [11] MIAO C, LIANG L X, ZHANG F, et al. Review of the fabrication and application of porous materials from silicon-rich industrial solid waste[J]. Intern J Min Met Mater, 2022, 29(3): 424-438.
- [12] GAO H, LIU H, LIAO L, et al. Improvement of performance of foam perlite thermal insulation material by the design of a triple-hierarchical porous structure[J]. Energy Buildings, 2019, 200: 21-30.
- [13] 张富新, 谢海泉. 珍珠岩尾砂资源化利用的技术条件分析[J]. 矿产综合利用, 2004(3): 31-34.
ZHANG Fuxin, XIE Haiquan. Multip Utiliz Min Res (in Chinese), 2004(3): 31-34.
- [14] DAVRAZ M, KORU M, A, AKDAG E, et al. Investigating the use of raw perlite to produce monolithic thermal insulation material[J]. Constr Build Mater, 2020, 263(14): 1-7.
- [15] 严育通, 贾宝剑, 周红升, 等. 珍珠岩矿床地质背景研究进展[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2016, 29(4): 645-649.
YAN Yutong, JIA Baojian, ZHOU Hongsheng, et al. J Xinyang Norm Univ: Nat Sci Ed (in Chinese), 2016, 29(4): 645-649.
- [16] 张宪圆, 林克辉, 谢红波. 国内外珍珠岩概述及其在建筑领域的应用分析[J]. 广东建材, 2012, 28(2): 19-21.
ZHANG Xianyuan, LIN Kehui, XIE Hongbo. Guangdong Jiancai (in Chinese), 2012, 28(2): 19-21.
- [17] WANG Z S, TU H C, GAO J X, et al. A novel building thermal insulation material: Expanded perlite modified by aerogel[J]. Adv Mater Res, 2011, 250-253: 507-512.
- [18] BENANE B, BAEZA G P, ZHAL B, et al. Multiscale structure of super insulation nano-fumed silicas studied by SAXS, tomography and porosimetry[J]. Acta Mater, 2019, 168: 401-410.
- [19] SHAFI S, TIAN J, NAVIK R, et al. Fume silica improves the insulating and mechanical performance of silica aerogel/glass fiber composite[J]. J Supercrit Fluids, 2019, 148: 9-15.
- [20] LIAN Tseng-Wen, KONDO Akira, KOZAWA Takahiro, et al. Effect of fumed silica properties on the thermal insulation performance of fibrous compact[J]. Ceram Inter, 2015, 41(8): 9966-9971.
- [21] TANG X Y, YU Y X. Preparation of fumed silica compacts for thermal insulation using wet processing method[J]. Int J Appl Ceram Tech, 2018, 15(1): 232-236.
- [22] ZOU W, WANG X, YU W, et al. Opacifier embedded and fiber reinforced alumina-based aerogel composites for ultra-high temperature thermal insulation[J]. Ceram Inter, 2018, 45(1): 644-650.
- [23] RYU J S, OH K S, LEE B W. High performance of fumed silica insulation board for green building[J]. Adv Mater Research, 2013, 689: 403-406.
- [24] PAREDES M, ANGAMMANA C J, JAYARAM S H. In Experimental study of dielectric properties of fumed silica/silicone composites, 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2016: 683-686.
- [25] 郭月, 田晶, 李晓雷, 等. 气相法二氧化硅在硅橡胶中的应用[J]. 辽宁化工, 2010, 39(3): 242-244.
GUO Yue, TIAN Jing, LI Xiaolei, et al. Liaoning Chem Ind (in Chinese), 2010, 39(3): 242-244.
- [26] ALQUDSI A Y, GHUNEM R A, DAVID E. A novel framework to study the role of ground and fumed silica fillers in suppressing DC erosion of silicone rubber outdoor insulation[J]. Energies, 2021, 14: 1-15.
- [27] 姜水军, 任瑞晨, 张文军. 珍珠岩超细粉体橡胶助剂的初步研究[J]. 有色矿冶, 2004, 20: 117-120.
JIANG Shuijun, REN Ruichen, ZHANG Wenjun. Non-Ferrous Min Met (in Chinese), 2004, 20: 117-120.
- [28] 陈晓松, 熊煦, 刘日鑫, 等. 丁苯橡胶/膨胀珍珠岩复合材料的制备[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(5): 1583-1587.
CHEN Xiaosong, XIONG Xu, LIU rixin, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2016, 35(5): 1583-1587.