

# 斜方硅钙石对陶瓷化硅橡胶成瓷性能的影响

李鹏虎<sup>1</sup>, 唐红川<sup>2</sup>, 刘怀东<sup>1</sup>, 李成磊<sup>3</sup>, 金海云<sup>1</sup>, 高乃奎<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123; 3. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**以斜方硅钙石为成瓷填料,低熔点玻璃粉为助熔剂,纳米二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )为补强剂,制备了陶瓷化硅橡胶复合材料,研究了斜方硅钙石的含量和粒径对复合材料拉伸性能的影响。将复合材料在1 000℃烧结得到陶瓷试样,并观察陶瓷试样断面的显微结构,通过XRD分析了烧结后陶瓷试样的晶相变化,测量了陶瓷试样的线性收缩率和弯曲强度。结果表明:同一粒径的斜方硅钙石含量的增加会降低复合材料的拉伸强度同时提高断裂伸长率,同一含量下小粒径的斜方硅钙石有利于提高复合材料的拉伸强度。斜方硅钙石的含量过多或过少都会降低烧结后陶瓷试样的弯曲强度和致密度,而减小斜方硅钙石的粒径有利于提高陶瓷试样的弯曲强度,但同时也会增大线性收缩率。通过调整斜方硅钙石的含量和粒径,陶瓷试样的弯曲强度最高可达58.57 MPa。

**关键词:**陶瓷化硅橡胶;耐火材料;斜方硅钙石;成瓷性能;显微形貌

中图分类号:TM215 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)12-0022-06

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.12.004

## Effect of Kilchoanite on Ceramization Properties of Ceramizable Silicone Rubber

LI Penghu<sup>1</sup>, TANG Hongchuan<sup>2</sup>, LIU Huaidong<sup>1</sup>, LI Chenglei<sup>3</sup>, JIN Haiyun<sup>1</sup>, GAO Naikui<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China; 3. Maintenance Branch Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Ceramizable silicone rubber composites were prepared by using kilchoanite as ceramic filler, glass frit as flux, and nano silica as reinforcing agent. The effect of the content and size of kilchoanite on the tensile properties of the composites was studied. The ceramic specimens were obtained by sintering the composites at 1 000℃, and then the microstructure of its fracture surface was observed. The phase change of ceramic specimens was analyzed by X-ray diffraction, and its linear contraction and flexural strength were measured. The results show that the increase of the kilchoanite with the same particle size can reduce the tensile strength of the composites, while increase the elongation at break. Under the same content, the kilchoanite with a smaller size can improve the tensile strength of the composites. When the content of kilchoanite is too high or too low, the flexural strength and density of the ceramic specimens decrease. With the decrease of the size of kilchoanite, the flexural strength of the ceramic specimens increases, while the linear contraction also increases. The maximum flexural strength of the ceramic specimens can reach to 58.57 MPa by changing the content and size of kilchoanite.

**Key words:** ceramizable silicone rubber; refractory; kilchoanite; ceramization properties; microstructure

收稿日期:2021-01-02 修回日期:2021-02-20

**作者简介:**李鹏虎(1993-),男(汉族),陕西咸阳人,博士生,主要从事绝缘材料的性能以及陶瓷化硅橡胶的相关研究;通信作者:金海云(1971-),男(汉族),陕西西安人,教授,主要从事绝缘结构、电气材料、陶瓷材料和超疏水材料方面的研究。

## 0 引言

随着经济发展与用电量的持续上升,电线电缆的耐火阻燃问题变得愈加重要。目前常用的阻燃材料主要是通过添加阻燃剂实现阻燃功能,但这类

材料在长时间的高温环境中可能面临分解失效的问题,给火灾中电力设备的正常运行带来隐患。而陶瓷化硅橡胶作为近年来的研究热点,有助于解决这一问题<sup>[1-2]</sup>。陶瓷化硅橡胶是一种可陶瓷化的硅橡胶基复合材料,由硅橡胶、成瓷填料、助熔剂、补强剂等成分组成。这种复合材料在常温下具有硅橡胶的优良性能,如绝缘性能、力学性能和热稳定性,易于加工成型;在遇到火焰或高温时会转变为具有一定机械强度的陶瓷材料<sup>[3-6]</sup>。这类材料被广泛应用于防火电缆中,材料在常温下柔软且具有弹性,而发生火灾时在高温下转变为陶瓷体,可以在阻止火焰蔓延的同时维持电缆的正常运行<sup>[7-10]</sup>。

目前已有学者对陶瓷化硅橡胶的成瓷过程与成瓷机理进行了相关研究。成瓷填料本身的熔点在1 000℃以上,较低温度下无法熔融产生液相发生反应,因此低熔点玻璃粉是降低成瓷温度的关键。玻璃粉可以在较低温度下熔融产生液相,与填料发生反应形成玻璃相和陶瓷相连接的结构,降低了陶瓷化反应所需的温度<sup>[3-6]</sup>。近年来学者对更低温度的陶瓷化过程进行了研究,完善了成瓷机理,并且使陶瓷试样的弯曲强度得到了提高<sup>[11-13]</sup>。此外,关于陶瓷化硅橡胶配方与工艺的研究也获得了大量成果<sup>[14-23]</sup>。但是上述研究均存在材料烧结后的弯曲强度较低的问题,即使在1 000℃烧结,弯曲强度一般也不超过20 MPa。

陶瓷化硅橡胶作为电缆的耐火材料,不仅要求烧结前的复合材料具有一定的机械强度,也需要在烧结后保持较高的机械强度。本文采用斜方硅钙石作为成瓷填料制备陶瓷化硅橡胶,研究斜方硅钙石的含量和粒径对复合材料拉伸性能的影响,重点讨论斜方硅钙石对陶瓷化硅橡胶成瓷性能的影响,通过调整斜方硅钙石的含量与粒径,大幅提高陶瓷化硅橡胶烧结后的弯曲强度。

## 1 实验

### 1.1 试样制备

采用甲基乙烯基硅橡胶作为高聚物基体,斜方硅钙石(kilchoanite,  $\text{Ca}_{24}\text{Si}_{16}\text{O}_{56}$ )作为成瓷填料,低熔点玻璃粉作为助熔剂,纳米二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )作为补强剂,制备陶瓷化硅橡胶。低熔点玻璃粉使用市售的玻璃粉,熔点为450℃,主要成分为 $\text{ZnO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ ,其中 $\text{ZnO}$ 质量分数为43.58%, $\text{SiO}_2$ 质量分数为27.64%,其他成分质量分数合计为

28.78%。纳米 $\text{SiO}_2$ 不仅可以增强陶瓷化硅橡胶的拉伸强度,还可以参与烧结反应提高陶瓷试样的强度。但是纳米 $\text{SiO}_2$ 的“结构化”作用会使胶料变硬导致难以加工,因此还需要加入适量的羟基硅油作为结构控制剂。硅橡胶的硫化剂采用2,4-二氯过氧苯甲酰(DCBP)。各种原料的配比如表1所示,数值仅代表质量比例。其中斜方硅钙石的含量 $x$ 分别为30、40、50、60 g,首先研究含量对性能的影响,确定最佳含量后再研究粒径对性能的影响;粒径有3种,分别为38、18、12  $\mu\text{m}$ ,在含量研究中粒径为18  $\mu\text{m}$ 。

表1 陶瓷化硅橡胶的配方

Tab.1 Formulation of the ceramizable silicone rubber

组分	含量/g
硅橡胶	100
羟基硅油	3
纳米 $\text{SiO}_2$	30
斜方硅钙石	$x$
玻璃粉	30
DCBP	1.5

按照表1的顺序将原料依次加入转矩流变仪中进行混炼,温度为50℃,适当加热有利于原料混炼均匀。然后使用平板硫化机对混炼均匀的胶料进行模压与硫化,模具尺寸为100 mm×100 mm×2 mm,温度为120℃,时间为10 min。最后将得到的片状试样悬挂于电热鼓风烘箱中进行二次硫化,温度为150℃,时间为4 h。

### 1.2 性能表征

#### 1.2.1 复合材料的拉伸性能

将陶瓷化硅橡胶复合材料按照标准裁成哑铃型,进行拉伸性能测试,测试设备为CMT4503型电子万能试验机,中国美特斯公司,测试标准为GB/T 528—2009。

#### 1.2.2 陶瓷试样的烧结

将陶瓷化硅橡胶裁成80 mm×10 mm×2 mm的条状试样,放置于刚玉坩埚中,使用马弗炉进行烧结。烧结温度为1 000℃,温度精度为1℃,升温速率为1℃/min,保温时间为1 h。为了保证陶瓷试样足够平整以满足弯曲强度的测试标准,使用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉埋烧,可以在提供压力的同时使试样受热均匀。

### 1.2.3 成瓷性能的测试

测量陶瓷试样的长度,并根据式(1)计算陶瓷试样的烧结线性收缩率。

$$l = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: $l$ 为陶瓷试样的烧结线性收缩率,%; $l_0$ 和 $l_1$ 分别为烧结前和烧结后的试样长度,mm。

测试陶瓷试样的弯曲强度,测试设备为CMT4503型电子万能试验机,测试方法参考GB/T 1449—2005和GB/T 6569—2006,采用三点弯曲实验,载荷速度为2 mm/min。弯曲强度根据式(2)进行计算。

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (2)$$

式(2)中: $\sigma$ 为陶瓷试样的弯曲强度,MPa; $P$ 为破坏时的最大载荷,N; $L$ 为实验跨距,mm; $b$ 为陶瓷试样宽度,mm; $h$ 为陶瓷试样厚度,mm。

### 1.2.4 陶瓷试样的显微形貌观察

对测试过弯曲强度的陶瓷试样,观察陶瓷试样自然断面的显微形貌。使用设备为VE-9800S型扫描电子显微镜(SEM),日本KEYENCE公司。断面仅进行喷金处理,不进行任何打磨抛光等二次加工。

### 1.2.5 陶瓷试样的晶相分析

原料中只有斜方硅钙石为晶体,因此将其作为对照组,与烧结后的陶瓷试样一起进行X射线衍射(XRD)测试,分析陶瓷试样烧结后的晶相变化以及成瓷原理。使用设备为D8 ADVANCE A25型X射线衍射仪,德国BRUKER公司。

## 2 结果与讨论

### 2.1 斜方硅钙石含量对性能的影响

对不同斜方硅钙石含量的陶瓷化硅橡胶复合材料进行拉伸性能测试,结果如图1所示。从图1可以看出,随着斜方硅钙石含量的增加,复合材料的拉伸强度逐渐减小,断裂伸长率逐渐增大。这是因为复合材料中添加的无机填料较多,已经占据了硅橡胶分子链间大量的自由体积,所以随着斜方硅钙石含量的进一步增加,很容易阻碍硅橡胶分子链间的交联,破坏硅橡胶的三维网状结构,导致拉伸强度下降。但是斜方硅钙石的片状结构使自身具有一定的润滑作用,提高了硅橡胶的韧性,从而使得断裂伸长率逐渐增大。斜方硅钙石含量不超过50 g时,拉伸强度可以保持在5.0 MPa以上,含量为

50 g时对应的拉伸强度为5.02 MPa。

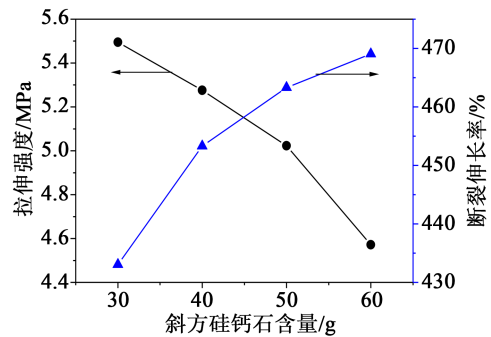


图1 斜方硅钙石含量对复合材料拉伸性能的影响

Fig.1 Effect of kilchoanite content on tensile properties of composites

将不同斜方硅钙石含量的陶瓷化硅橡胶复合材料在1 000℃下进行烧结后,使用SEM观察陶瓷试样断面的显微形貌,结果如图2所示。从图2可以看出,当斜方硅钙石含量为30 g时,由于成瓷填料不足,试样出现了很多大的气孔或气泡,这对陶瓷体的宏观性能是不利的;当斜方硅钙石含量为40 g时,大气孔变为分布紧凑的小气孔,陶瓷体的致密度有所提高;当斜方硅钙石含量为50 g时,气孔含量进一步减少,致密度进一步提高;而当斜方硅钙石含量为60 g时,由于成瓷填料过多但没有充足的玻璃粉能够填充斜方硅钙石之间的空隙并与之反应,陶瓷体变为多孔的桥接结构<sup>[22]</sup>,致密度反而又下降了。

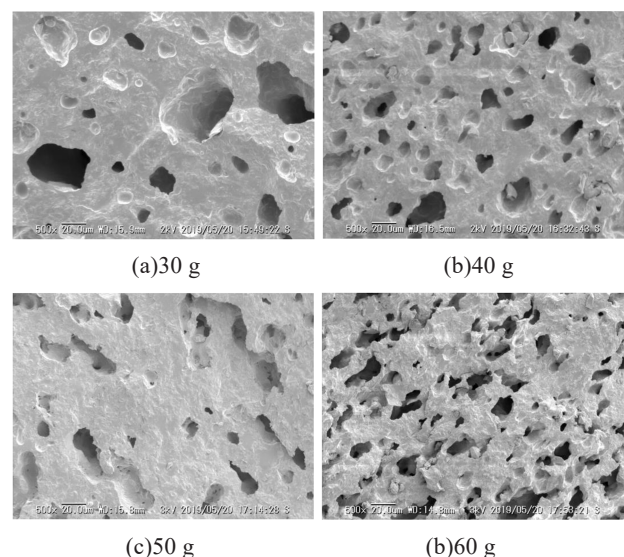


图2 不同斜方硅钙石含量的陶瓷试样的显微形貌照片

Fig.2 Microstructures of ceramic specimens with different content of kilchoanite

对不同斜方硅钙石含量的陶瓷试样进行XRD分析,以斜方硅钙石(kilchoanite)作为对照组,结果如图3所示。从图3可以看出,在所有陶瓷试样中斜方硅钙石的衍射峰均已消失,同时产生了一种新的晶体,钙锌辉石(petedunnite,  $\text{CaZnSi}_2\text{O}_6$ )。该物质是斜方硅钙石、 $\text{SiO}_2$ 和玻璃粉熔融产生的液相在高温下发生反应所生成的,并且随着斜方硅钙石含量的增加,钙锌辉石的衍射峰强度也在逐渐增加,说明有更多的晶体产生。虽然斜方硅钙石含量为60 g时可以生成更多的晶体,但是根据显微形貌可知,由于没有充足的液相填充空隙,陶瓷试样的致密度反而更低。此外,图中还出现了 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的衍射峰, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 并非材料本身含有的成分,而是陶瓷试样烧结时使用的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉有少量残留在陶瓷试样表面难以清洗所造成的。

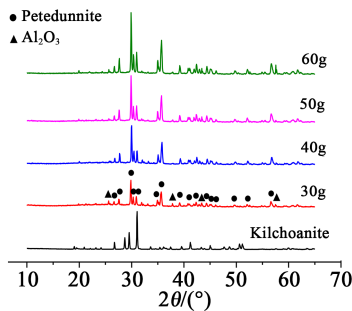
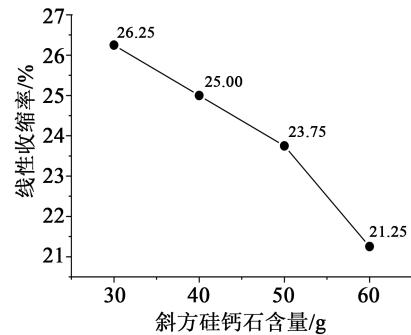


图3 不同斜方硅钙石含量的陶瓷试样的XRD谱图

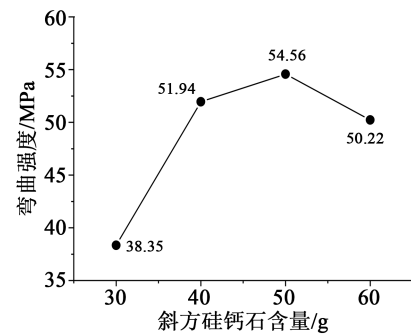
Fig.3 XRD patterns of ceramic specimens with different content of kilchoanite

测试不同斜方硅钙石含量的陶瓷试样的线性收缩率和弯曲强度,用以表征陶瓷化硅橡胶的成瓷性能,结果如图4所示。从图4可以看出,随着斜方硅钙石含量的增加,线性收缩率逐渐减小;而弯曲强度先增大后减小,在斜方硅钙石含量为50 g时达到最大值54.56 MPa。斜方硅钙石是成瓷过程中的骨架材料,其含量决定了陶瓷试样的尺寸(不是唯一因素)。当斜方硅钙石含量较低时,虽然此时玻璃粉的相对含量较高,能够更好地填充斜方硅钙石之间的缝隙,但是硅橡胶基体所占比例过高,而硅橡胶在高温分解后留下了更多的空隙,因此陶瓷体收缩严重且致密度和弯曲强度较低。当斜方硅钙石含量过高时,虽然足以支撑硅橡胶分解后的体积空隙,降低了烧结后陶瓷试样的线性收缩率,但是玻璃粉的相对含量较低,不足以填充斜方硅钙石之间的缝隙,导致陶瓷体变为多孔的桥接结构,弯曲强度下降。因此对于陶瓷试样的弯曲强度而言,斜

方硅钙石的含量有一个最合适的数值,在本研究配方中为每100 g硅橡胶添加50 g斜方硅钙石最合适。



(a)线性收缩率



(b)弯曲强度

图4 斜方硅钙石含量对陶瓷试样成瓷性能的影响

Fig.4 Effect of kilchoanite content on ceramization properties of ceramic specimens

## 2.2 斜方硅钙石粒径对性能的影响

根据上述结果,确定斜方硅钙石的最佳含量为50 g(每100 g硅橡胶),研究3种不同粒径(38、18、12  $\mu\text{m}$ )的斜方硅钙石对陶瓷化硅橡胶拉伸强度和成瓷性能的影响。复合材料拉伸强度的测试结果如图5所示。从图5可以看出,斜方硅钙石的粒径越小,则复合材料的拉伸强度越高。因为同等质量

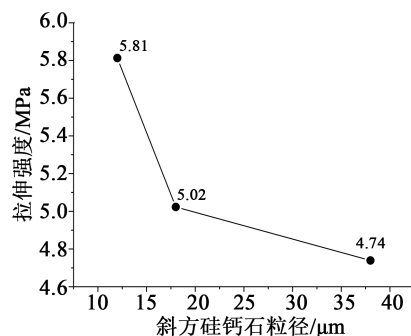


图5 斜方硅钙石粒径对复合材料拉伸强度的影响

Fig.5 Effect of kilchoanite size on tensile strength of composites

下小粒径的填料在基体中分布更加均匀,并且对基体结构的破坏作用更小。

陶瓷化硅橡胶的成瓷性能如图6所示。从图6可以看出,随着斜方硅钙石粒径的减小,陶瓷试样的线性收缩率和弯曲强度均逐渐增大,弯曲强度最高可达58.57 MPa。斜方硅钙石的粒径越小,则比表面积越大,同等质量下小粒径的填料能够更好地和玻璃粉熔融产生的液相接触,从而使烧结时的反应进行得更加充分且迅速,因此可以提高陶瓷试样的弯曲强度。但是这种烧结是液相烧结,且液相所占的比例较高,因此不可避免地造成较大的线性收缩率。粒径越小,反应越充分,收缩也越严重。实际应用中较高的弯曲强度是有利的,但是较大的线性收缩率是不利的,二者在一定程度上是矛盾的,需要根据实际情况进行选择与调整。

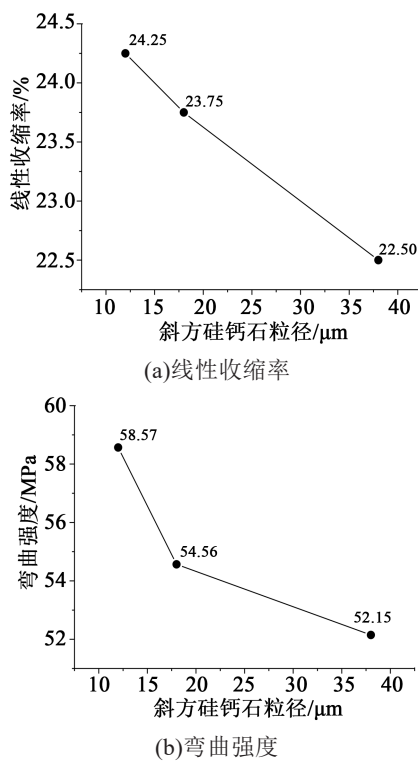


图6 斜方硅钙石粒径对陶瓷试样成瓷性能的影响

Fig.6 Effect of kilchoanite size on ceramization properties of ceramic specimens

本研究中,综合考虑陶瓷试样的弯曲强度和线性收缩率,最终确定斜方硅钙石的含量为50 g,粒径为18 μm,由此制备的陶瓷化硅橡胶在不同温度下进行烧结后,陶瓷试样的性能如表2所示。从表2可以看出,在800~1 000℃烧结后,陶瓷试样具有很高的弯曲强度;在700℃烧结后,陶瓷试样也具有较

高的弯曲强度<sup>[24]</sup>。

表2 不同烧结温度下陶瓷试样的性能

Tab.2 Properties of ceramic specimens sintered at different temperatures

烧结温度/℃	线性收缩率/%	弯曲强度/MPa
600	8.75	4.06
700	15.00	24.84
800	21.25	46.76
900	22.50	50.55
1 000	23.75	54.56

### 3 结论

(1)随着斜方硅钙石含量的增加,复合材料的拉伸强度逐渐减小,断裂伸长率逐渐增大,同时烧结后陶瓷试样的线性收缩率也逐渐减小。但是斜方硅钙石的含量过多或过少都会降低烧结后陶瓷试样的弯曲强度和致密度,最佳含量为50 g(每100 g硅橡胶)。

(2)随着斜方硅钙石粒径的减小,复合材料的拉伸强度逐渐增大,烧结后陶瓷试样的弯曲强度也逐渐增大,这些是有利的。但是烧结后陶瓷试样的线性收缩率也随粒径减小而逐渐增大,这点是不利的。斜方硅钙石的粒径可以根据实际要求进行选择。

(3)制备的陶瓷化硅橡胶在700℃以上的温度烧结后,所得到的陶瓷试样均具有较高的弯曲强度,可达54.56 MPa。减小斜方硅钙石的粒径可以将弯曲强度进一步提高到58.57 MPa,此时复合材料的拉伸强度也提升到5.81 MPa。

### 参考文献:

- [1] 柯瑞林,邹雄,王金合,等.陶瓷化高分子复合材料研究进展[J].绝缘材料,2018,51(12):1-5,10.
- [2] 唐红川,李鹏虎,匡国文,等.陶瓷化硅橡胶研究进展[J].绝缘材料,2019,52(7):1-9.
- [3] HANU L G, SIMON G P, MANSOURI J, et al. Development of polymer-ceramic composites for improved fire resistance[J]. Journal of Materials Processing Technology,2004,153-154:401-407.
- [4] MANSOURI J, BURFORD R P, CHENG Y B, et al. Formation of strong ceramified ash from silicone-based compositions[J]. Journal of Materials Science,2005,40(21):5741-5749.
- [5] MANSOURI J, BURFORD R P, CHENG Y B. Pyrolysis behaviour of silicone-based ceramifying composites[J]. Materials Sci-

- ence and Engineering A,2006,425(1-2):7-14.
- [6] MANSOURI J, WOOD C A, ROBERT K, et al. Investigation of the ceramifying process of modified silicone silicate compositions [J]. *Journal of Materials Science*,2007,42(15):6046-6055.
- [7] HANU L G, SIMON G P, CHENG Y B. Thermal stability and flammability of silicone polymer composites[J]. *Polymer Degradation and Stability*,2006,91(6):1373-1379.
- [8] HAMDANI S, LONGUET C, PERRIN D, et al. Flame retardancy of silicone-based materials[J]. *Polymer Degradation and Stability*,2009,94(4):465-495.
- [9] PĒDZICH Z, BIELIŃSKI D M, ANYSZKA R, et al. Ceramizable composites for fire resistant applications[J]. *Key Engineering Materials*, 2014,602-603:290-295.
- [10] YU L, ZHOU S T, ZOU H W, et al. Thermal stability and ablation properties study of aluminum silicate ceramic fiber and acicular wollastonite filled silicone rubber composite[J]. *Journal of Applied Polymer Science*,2014,131(1):39700.
- [11] GUO J H, ZHANG Y, LI H J, et al. Effect of the sintering temperature on the microstructure, properties and formation mechanism of ceramic materials obtained from polysiloxane elastomer-based ceramizable composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*,2016,678:499-505.
- [12] HU S, CHEN F, LI J G, et al. The ceramifying process and mechanical properties of silicone rubber/ammonium polyphosphate/aluminium hydroxide/mica composites[J]. *Polymer Degradation and Stability*,2016,126:196-203.
- [13] LOU F P, YAN W, GUO W H, et al. Preparation and properties of ceramifiable flame-retarded silicone rubber composites[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, 130(2): 813-821.
- [14] PĒDZICH Z, BUKAŃSKA A, BIELIŃSKI D M, et al. Microstructure evolution of silicone rubber-based composites during ceramization in different conditions[J]. *Composites Theory and Practice*,2012,12(4):251-255.
- [15] BIELIŃSKI D M, ANYSZKA R, PĒDZICH Z, et al. Ceramizable silicone rubber composites. Influence of type of mineral filler on ceramization[J]. *Composites Theory and Practice*,2012,12(4):256-261.
- [16] ANYSZKA R, BIELIŃSKI D M, PĒDZICH Z, et al. Influence of surface-modified montmorillonites on properties of silicone rubber-based ceramizable composites[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*,2015,119(1):111-121.
- [17] WANG J H, JI C T, YAN Y T, et al. Mechanical and ceramifiable properties of silicone rubber filled with different inorganic fillers[J]. *Polymer Degradation and Stability*,2015,121:149-156.
- [18] IMIELA M, ANYSZKA R, BIELIŃSKI D M, et al. Effect of carbon fibers on thermal properties and mechanical strength of ceramizable composites based on silicone rubber[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*,2016,124(1):197-203.
- [19] GUO J H, GAO W, WANG Y, et al. Effect of glass frit with low softening temperature on the properties, microstructure and formation mechanism of polysiloxane elastomer-based ceramizable composites[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2017, 136: 71-79.
- [20] LOU F P, CHENG L H, LI Q Y, et al. The combination of glass dust and glass fiber as fluxing agents for ceramifiable silicone rubber composites[J]. *RSC Advances*,2017,7(62):38805-38811.
- [21] ANYSZKA R, BIELIŃSKI D M, PĒDZICH Z, et al. Effect of mineral filler additives on flammability, processing and use of silicone-based ceramifiable composites[J]. *Polymer Bulletin*, 2018,75(4):1731-1751.
- [22] 唐红川,李鹏虎,匡国文,等.玻璃粉含量对陶瓷化硅橡胶性能的影响[J].*硅酸盐学报*,2020,38(6):870-876.
- [23] 李函坚,郭建华,高伟,等.白炭黑对陶瓷化硅橡胶瓷化性能的影响[J].*有机硅材料*,2015(5):360-365.
- [24] LI P H, JIN H Y, WEI S C, et al. Ceramization mechanism of ceramizable silicone rubber composites with nano silica at low temperature[J]. *Materials*,2020,13(17):3708.