

氢氧化镁的表面改性及其在硅橡胶中的阻燃性能研究

马树刚¹, 万子岸¹, 刘星池¹, 王世荣^{2,3}, 李祥高^{2,3}, 侯经纬^{1*}

(1. 中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院, 北京 102206; 2. 天津大学化工学院, 天津 300372; 3. 天津化学化工协同创新中心, 天津 300372)

摘要: 分别采用乙烯基三乙氧基硅烷(VTES)、乙基三乙氧基硅烷(ETES)以及 3-(氨基丙基)三乙氧基硅烷(APTES)对氢氧化镁(MH)进行表面改性,研究了改性工艺对改性 MH 粒子表面特性的影响。结果表明,确定的最佳改性条件为:改性剂为 VTES,改性剂质量分数为 8%、反应温度为 80℃、搅拌转速为 500 r/min,反应时间为 2.0 h。将改性 MH 共混入硅橡胶,当 VTES-MH 质量分数为 50%时,与未添加 MH 的硅橡胶相比,VTES-MH/硅橡胶复合材料的拉伸强度和断裂伸长率分别降低了 5%和 11%,具有良好的力学性能;极限氧指数为 40.2%,具有优良的阻燃性能。

关键词: 氢氧化镁;阻燃剂;改性;硅橡胶

中图分类号:TQ325.12

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)04-0146-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.04.028

Surface modification of magnesium hydroxide and its flame-retardant performance for silicone rubber

MA Shu-gang¹, WAN Zi-an¹, LIU Xing-chi¹, WANG Shi-rong^{2,3}, LI Xiang-gao^{2,3}, HOU Jing-wei^{1*}

(1. PetroChina Petrochemical Research Institute, Beijing 102206, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300372, China;

3. Collaborative Innovation Center of Chemical Science and Engineering (Tianjin), Tianjin 300372, China)

Abstract: The surface of magnesium hydroxide (MH) is modified by using vinyltriethoxysilane (VTES), ethyltriethoxysilane (ETES), and (3-aminopropyl) triethoxysilane (APTES), respectively. The influence of the modification process on the surface properties of the modified MH particles is investigated. The optimal modification conditions are determined through the experimental study as follows: VTES is used as the modifier with a mass fraction of 8%, the reaction temperature is 80°C, the stirring speed is 500 r·min⁻¹, and the reaction has performed for 2.0 hours. The modified MH is blended into silicone rubber. Compared to silicone rubber without MH, the tensile strength and elongation at break of the silicone rubber containing 50% of VTES-MH decrease by 5% and 11%, respectively. The VTES-MH/silicone rubber composite material with such a composition exhibits good mechanical properties, delivers a limiting oxygen index of 40.2% and shows excellent flame retardant performance.

Key words: magnesium hydroxide; flame retardant; modification; silicone rubber

硅橡胶是以硅氧键为主链的高分子材料,具有良好的耐候性、耐热性、低毒性以及介电性,广泛应用于电子电气、航空航天、防污涂料、生物医药和交通运输等领域^[1-5]。然而,具体到电缆附件与航空航天密封件^[6-7],其所处的长期自发热或摩擦受热的应用场景对硅橡胶的阻燃性能提出更高的要求,而硅橡胶自身的阻燃性能并不令人满意^[8],因此往往需要对硅橡胶进行阻燃改性,提高其对上述恶劣环境下的适用性。

氢氧化镁(Magnesium Hydroxide, MH)作为一种经济易得、绿色环保的无机添加型阻燃剂^[9-12],其被

填充到高分子基底材料中具有绿色环保、高的热稳定性、抑烟等显著的优势^[13-14]。

笔者以工业级 MH 为原料、不同的硅烷偶联剂为改性剂,采用湿法工艺制备改性 MH,系统研究了改性工艺对改性 MH 粒子表面特性的影响。将改性 MH 共混入硅橡胶,研究了硅橡胶复合材料的力学性能与阻燃性能。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

工业级氢氧化镁(MH),青海百事特镁业有限公

收稿日期:2023-07-13;修回日期:2024-01-30

基金项目:国家高技术研究发展计划(2013AA032003)

作者简介:马树刚(1987-),男,博士,高级工程师,研究方向为无机阻燃剂开发, mashugang@petrochina.com.cn;侯经纬(1974-),男,博士,高级工程师,研究方向为流程模拟和工艺包开发,通讯联系人, houjingwei@petrochina.com.cn。

司生产;乙烯基三乙氧基硅烷(Vinyltriethoxysilane, VTES,分析纯)、3-(氨基丙基)三乙氧基硅烷[(3-Aminopropyl)triethoxysilane, APTES,分析纯],北京伊诺凯化工有限公司生产;乙基三乙氧基硅烷(Ethyltriethoxysilane, ETES,分析纯),上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产;无水乙醇(分析纯),利安隆博华医药化学有限公司生产;二甲基硅油(98%),南京三舒生物科技有限公司生产;甲基乙烯基硅橡胶硅橡胶(工业级),江苏天辰硅材料有限公司生产;2,4-二氯过氧化苯甲酰(分析纯),江苏培星化工有限公司生产;蒸馏水,自制。

电子天平,上海浦春计量仪器有限公司生产;数显智能恒温油浴锅,巩义予华仪器有限责任公司生产;球磨机,北京中际远华科贸有限公司生产;离心机,北京白洋医疗器械有限公司生产;电热鼓风干燥箱,北京永光明医疗仪器厂生产;压片机,阳泉仪表厂生产;接触角测试仪,武汉金诺电子有限公司生产;扫描电子显微镜,日本日立公司生产;高功率数控超声波清洗器,上海科导超声仪器有限公司生产;双辊筒炼塑机,上海橡胶机械厂生产;平板硫化机,湖州宏侨橡胶机械有限公司生产;万能试验机,英斯特朗集团生产;氧指数测定仪,江宁县分析仪器厂生产。

1.2 实验方法

1.2.1 改性MH的制备

称取一定量工业级MH粉末分散于蒸馏水中,置于球磨机内研磨8h,配制成固含量为20%的悬浮液,取出100mL悬浮液装入三口烧瓶中。将一定量硅烷偶联剂溶解在无水乙醇中,配制成质量分数为10%的溶液,用恒压滴液漏斗将硅烷偶联剂溶液滴入MH悬浮液中,设定反应温度、反应时间和搅拌转速,反应完毕后通过离心机将混合液用蒸馏水和无水乙醇各过滤、洗涤3次,在80℃下干燥10h后得到改性MH粉末。

1.2.2 MH/硅橡胶复合材料的制备

称取100g硅橡胶,将其放入双辊筒炼塑机中,在温度为60℃时进行加热混炼,分别加入占硅橡胶质量20%、30%、40%、50%、60%的改性MH粉末,加入2%的硫化剂2,4-二氯过氧化苯甲酰,在炼塑机中加热混合均匀,随后放入平板硫化机中进行硫化,最后制得MH/硅橡胶复合材料。

1.3 测试方法

1.3.1 接触角的测量

称取MH粉末0.15g,用压片机制得直径为

1cm的MH圆形薄片,置于载玻片上,调节注射器使溶剂液滴缓慢流出,以高速摄像机记录液滴滴下过程,通过软件计算出接触角。

1.3.2 扫描电镜(SEM)测试

称取MH粉末0.15g,置于20mL无水乙醇中超声分散30min,将分散好的液体滴加到导电玻璃上,待干燥后表面喷金,用扫描电镜观察MH粉末的团聚行为。

1.3.3 力学及阻燃性能测试

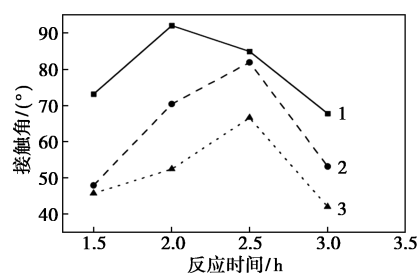
MH/硅橡胶复合材料的拉伸性能依据标准GB/T 1040.2—2022中所述的方法在Instron 5965型万能试验机上对其拉伸强度和断裂伸长率进行测试,阻燃性能依据标准GB/T 2406.2—2009并通过氧指数测定仪进行测试。

2 结果与讨论

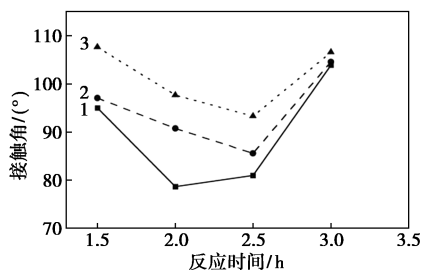
2.1 MH改性工艺研究

2.1.1 反应时间对MH改性的影响

在反应温度为70℃、改性剂质量分数为6%和搅拌转速为300r/min条件下,采用VTES、ETES、APTES 3种不同的硅烷偶联剂对MH进行表面改性,反应时间分别为1.5、2.0、2.5、3.0h,得到不同反应时间下的改性MH,分别记为VTES-MH、ETES-MH、APTES-MH。改性MH对水和二甲基硅油的接触角如图1所示。



(a) 改性MH对水的接触角



(b) 改性MH对二甲基硅油的接触角

1—VTES-MH;2—ETES-MH;3—APTES-MH

图1 不同反应时间下改性MH的表面特性

由图 1 可知,随着反应时间延长,改性 MH 对水的接触角呈现先增大后减少的趋势,而对二甲基硅油的接触角呈现先减小后增大的趋势。在当前反应条件下,VTES-MH、ETES-MH、APTES-MH 对应的最优反应时间分别为 2.0、2.5、2.5 h。这是由于在改性过程中存在一个最优反应时间,MH 在这个时间内和改性剂的相互作用比较充分,改性效果较好;当时间进一步增加后,硅烷偶联剂会从 MH 表面脱落,从而使 MH 的改性效果变差。由表 1 可知,相较于未改性 MH,改性 MH 对水的接触角明显增大,对二甲基硅油的接触角明显减小,说明通过硅烷偶联剂的表面改性,增强了 MH 粒子的疏水性,使 MH 的表面极性降低,从而使其不易团聚、分散性更好。另外,由图 1 和表 1 可知,在相同的反应时间下,VTES-MH 对水的接触角均比 ETES-MH、APTES-MH 大,对二甲基硅油的接触角均比 ETES-MH、APTES-MH 小,即 VTES-MH 的表面极性最小、改性效果最佳。

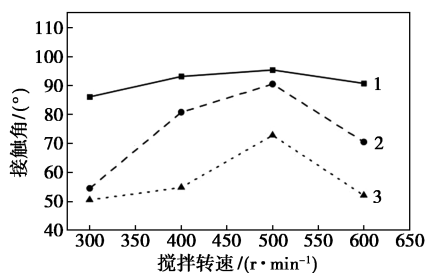
表 1 最优反应时间下 VTES-MH、ETES-MH、APTES-MH 以及未改性 MH 的接触角

样品	反应时间/h	与水的接触角/(°)	与二甲基硅油的接触角/(°)
MH	—	30.6	110.3
VTES-MH	2.0	92.1	78.7
ETES-MH	2.5	81.9	85.6
APTES-MH	2.5	66.6	93.3

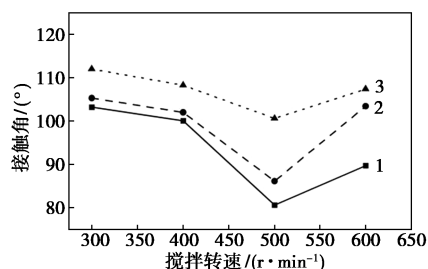
2.1.2 搅拌转速对 MH 改性的影响

在反应温度为 70℃、改性剂质量分数为 6% 的条件下,采用 VTES、ETES、APTES 3 种不同的硅烷偶联剂对 MH 进行表面改性,反应时间分别为 2.0、2.5、2.5 h,搅拌转速分别为 300、400、500、600 r/min,改性 MH 与水和二甲基硅油的接触角如图 2 所示。

由图 2 可知,随着搅拌转速的增大,改性 MH 对水的接触角呈现先增大后减少的趋势,而对二甲基硅油的接触角呈现出先减小后增大的趋势。在当前



(a) 改性 MH 对水的接触角



(b) 改性 MH 对二甲基硅油的接触角

1—VTES-MH;2—ETES-MH;3—APTES-MH

图 2 不同搅拌转速下改性 MH 的表面特性

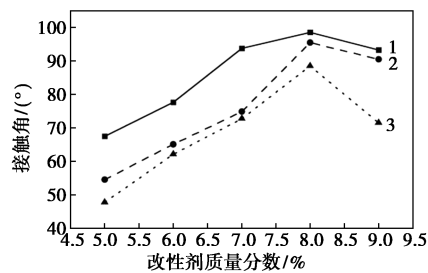
反应条件下,VTES-MH、ETES-MH、APTES-MH 对应的最优搅拌转速均为 500 r/min。这是由于在适当的搅拌转速下,MH 可以和改性剂达到最优的混合效果,从而增强改性剂对 MH 的改性效果;当搅拌转速继续增大时,易造成原本吸附在 MH 表面的改性剂脱落,最终导致改性效果下降。由表 2 可知,VTES-MH 和 ETES-MH 对水的接触角分别为 95.4°和 90.6°,对二甲基硅油的接触角分别为 80.6°和 86.1°,即相较于未改性 MH 亲水疏油的表面特性,该条件下 VTES-MH 和 ETES-MH 的表面特性均已转变为了亲油疏水。

表 2 最优搅拌转速下 VTES-MH、ETES-MH、APTES-MH 以及未改性 MH 的接触角

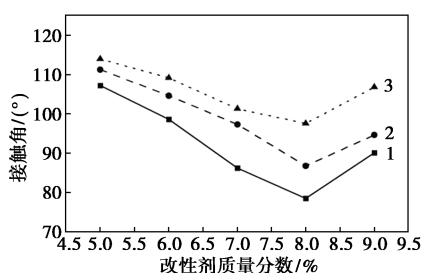
样品	搅拌转速/(r·min⁻¹)	与水的接触角/(°)	与二甲基硅油的接触角/(°)
MH	—	30.6	110.3
VTES-MH	500	95.4	80.6
ETES-MH	500	90.6	86.1
APTES-MH	500	72.9	100.6

2.1.3 改性剂质量分数对 MH 改性的影响

在反应温度为 70℃、搅拌转速为 500 r/min 的条件下,采用 VTES、ETES、APTES 3 种不同的硅烷偶联剂对原料 MH 进行表面改性,反应时间分别为 2.0、2.5、2.5 h,分别在改性剂质量分数为 5%、6%、7%、8%、9% 下对 MH 进行改性,改性 MH 与水和二甲基硅油的接触角如图 3 所示。



(a) 改性 MH 对水的接触角



(b) 改性 MH 对二甲基硅油的接触角

1—VTES-MH; 2—ETES-MH; 3—APTES-MH

图 3 不同改性剂质量分数下改性 MH 的表面特性

由图 3 可知,随着改性剂质量分数的增加,改性 MH 对水的接触角呈现先增大后减少的趋势,而对二甲基硅油的接触角呈现先减小后增大的趋势。在当前反应条件下,VTES-MH、ETES-MH、APTES-MH 对应的最优改性剂质量分数为 8%。当改性剂质量分数较小时,改性剂不能对 MH 表面实现完全包覆,故起初改性 MH 的极性仍随着改性剂质量分数的增大而逐渐降低,随着改性剂质量分数的增大,更多的改性剂和 MH 进行反应,直到实现 MH 表面最大程度地包覆,这时 MH 的改性效果达到最佳,而当改性剂质量分数进一步增加时,基于 Arkle^[15] 提出的硅烷偶联剂的改性机理可知,过多的改性剂之间会通过硅醇脱水发生缩聚反应,反而影响改性剂对 MH 表面的包覆,从而造成改性 MH 的极性增大。由表 3 可知,VTES-MH 和 ETES-MH 对水的接触角分别为 98.6°和 95.5°,对二甲基硅油的接触角分别为 78.5°和 86.8°,即相较于未改性 MH 亲水疏油的表面特性,该条件下 VTES-MH 和 ETES-MH 的表面特性均已转变为了亲油疏水。

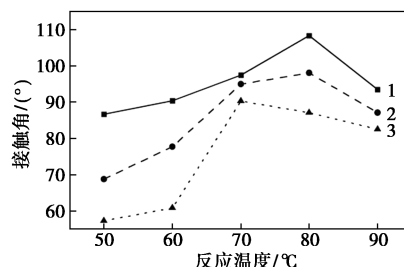
表 3 最优改性剂质量分数下 VTES-MH、ETES-MH、APTES-MH 以及未改性 MH 的接触角

样品	改性剂质量分数/%	与水的接触角/(°)	与二甲基硅油的接触角/(°)
MH	—	30.6	110.3
VTES-MH	8	98.6	78.5
ETES-MH	8	95.5	86.8
APTES-MH	8	88.5	97.6

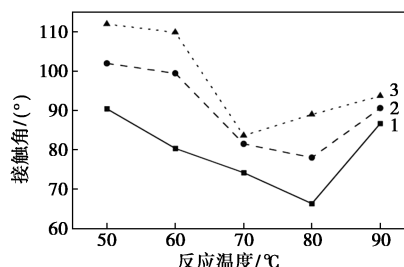
2.1.4 反应温度对 MH 改性的影响

在搅拌转速为 500 r/min、改性剂质量分数为 8%的条件下,采用 VTES、ETES、APTES 3 种不同的

硅烷偶联剂对 MH 进行表面改性,反应时间分别为 2.0、2.5、2.5 h,分别在 50、60、70、80、90℃ 的反应温度下对 MH 进行改性,改性 MH 与水和二甲基硅油的接触角如图 4 所示。



(a) 改性 MH 对水的接触角



(b) 改性 MH 对二甲基硅油的接触角

1—VTES-MH; 2—ETES-MH; 3—APTES-MH

图 4 不同反应温度下改性 MH 的表面特性

由图 4 可知,随着反应温度的增大,改性 MH 对水的接触角呈现先增大后减少的趋势,而对二甲基硅油的接触角呈现先减小后增大的趋势。在当前反应条件下,VTES-MH、ETES-MH、APTES-MH 对应的最优反应温度分别为 80、80、70℃。当反应温度较低时,改性剂与 MH 间的反应速率较低,反应不完全,改性效果较差;当反应温度增大后,改性剂和 MH 间的反应速率随之提高,MH 表面得到充分包覆,所以起初改性 MH 的表面极性随着反应温度的增大而降低,而随着反应温度的进一步增大,改性剂之间通过硅醇脱水发生缩聚反应速率随之增大,影响改性剂对 MH 表面的包覆,从而造成改性 MH 的极性增大。由表 4 可知,VTES-MH、ETES-MH、

表 4 最优反应温度下 VTES-MH、ETES-MH、APTES-MH 以及未改性 MH 的接触角

样品	反应温度/°C	与水的接触角/(°)	与二甲基硅油的接触角/(°)
MH	—	30.6	110.3
VTES-MH	80	108.4	66.3
ETES-MH	80	98.1	78.0
APTES-MH	70	90.3	83.6

APTES-MH 对水的接触角分别为 108.4、98.1° 和 90.3°, 对二甲基硅油的接触角分别为 66.3、78.0° 和 83.6°, 即该条件下 VTES-MH、ETES-MH、APTES-MH 的表面特性均已转变为了亲油疏水。

2.1.5 改性 MH 形貌分析

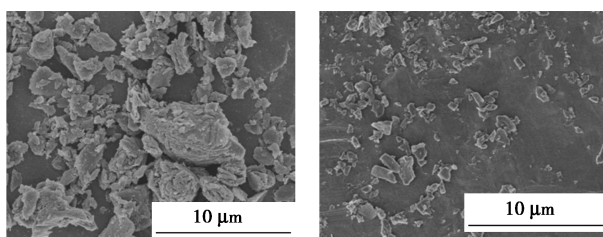
VTES、ETES、APTES 3 种硅烷偶联剂类改性剂的最优工艺条件如表 5 所示。

表 5 最优反应条件下 VTES-MH、ETES-MH、APTES-MH 以及未改性 MH 的接触角

样品	反应时间/h	搅拌转速/(r·min ⁻¹)	改性剂质量分数/%	反应温度/℃	与水的接触角/(°)	与二甲基硅油的接触角/(°)
MH	—	—	—	—	30.6	110.3
VTES-MH	2.0	500	8	80	108.4	66.3
ETES-MH	2.5	500	8	80	98.1	78.0
APTES-MH	2.5	500	8	70	90.3	83.6

由表 5 可知, 当前考察范围内的最佳改性条件为: 改性剂采用 VTES、改性剂质量分数为 8%、反应温度为 80℃、搅拌转速为 500 r/min、反应时间为 2.0 h。3 种改性剂的改性效果: VTES > ETES > APTES。

未改性 MH 以及在最佳改性条件下获得的 VTES-MH 的 SEM 图如图 5 所示。



(a) 未改性 MH

(b) VTES-MH

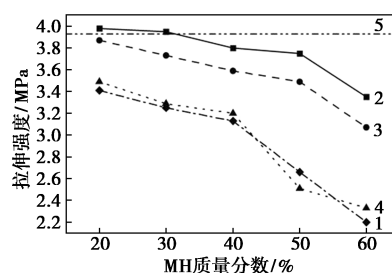
图 5 未改性 MH 与 VTES-MH 的 SEM 图

由图 5(a) 可知, 未改性 MH 颗粒间由于较大的表面极性而相互吸附, 更倾向于聚集成团簇状。而由图 5(b) 可知, 经过 VTES 的表面改性, 由于表面极性降低, VTES-MH 颗粒间聚集趋势明显减弱, 分散性较好。

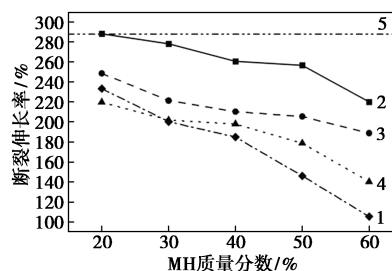
2.2 硅橡胶复合材料力学、阻燃性能分析

2.2.1 硅橡胶复合材料力学性能测试

分别对硅橡胶以及不同 MH 质量分数的硅橡胶复合材料的力学性能进行测试, 结果如图 6 所示。



(a) 硅橡胶复合材料的拉伸强度



(b) 硅橡胶复合材料的断裂伸长率

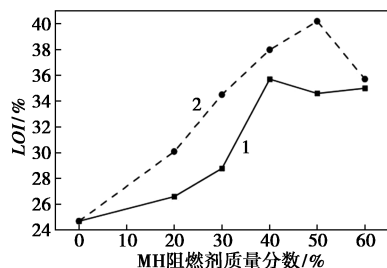
1—MH/硅橡胶; 2—VTES-MH/硅橡胶; 3—ETES-MH/硅橡胶; 4—APTES-MH/硅橡胶; 5—硅橡胶

图 6 不同 MH 质量分数下硅橡胶复合材料的力学性能

由图 6 可知, 当共混入未改性 MH 时, MH/硅橡胶的拉伸强度和断裂伸长率相较于未添加 MH 的硅橡胶均呈现出明显的降低, 且随着未改性 MH 质量分数增加, MH/硅橡胶的力学性能呈持续降低趋势, 当未改性 MH 的质量分数为 60%, 与未添加 MH 的硅橡胶相比, 拉伸强度和断裂伸长率分别降低了 44% 和 63%。相较于 MH/硅橡胶, 通过硅烷偶联剂表面改性的 VTES-MH/硅橡胶、ETES-MH/硅橡胶、APTES-MH/硅橡胶的力学性能相比未添加 MH 的硅橡胶降低的比较缓慢, 并且 VTES-MH/硅橡胶力学性能降低的趋势最慢。当 VTES-MH 的质量分数为 50% 时, 与未添加 MH 的硅橡胶相比, 拉伸强度和断裂伸长率仅分别降低了 5% 和 11%。基于 HM 表面改性规律的研究可知, 与 ETES-MH 和 APTES-MH 相比, VTES-MH 的表面极性最低, 即 VTES-MH 颗粒与非极性硅橡胶间具有良好的相容性, VTES-MH 颗粒本身也不易团聚成簇, 故能更好地分散在硅橡胶基体内部, 同时, 改性剂内部的支链结构也可与硅橡胶的分子链间发生物理缠绕或发生化学反应从而形成网络结构, 使得 VTES-MH 颗粒和硅橡胶间可以更好地共混融合, 硅橡胶的硫化网络结构更加坚固, 从而改善复合材料的力学性能, 减缓力学性能下降的趋势。

2.2.2 硅橡胶复合材料阻燃性能测试

不同 MH 质量分数下 MH/硅橡胶以及 VTES-MH/硅橡胶的氧指数如图 7 所示。



1—MH/硅橡胶的极限氧指数;

2—VTES-MH/硅橡胶的极限氧指数

图 7 不同 MH 添加量下硅橡胶复合材料的极限氧指数

由图 7 可知,随着 MH 质量分数的增加,MH/硅橡胶以及 VTES-MH/硅橡胶的极限氧指数(LOI)均呈现先增大后减小的趋势。相同质量分数下,VTES-MH/硅橡胶的 LOI 始终大于 MH/硅橡胶,当 VTES-MH 的质量分数为 50% 时,VTES-MH/硅橡胶复合材料的 LOI 为 40.2%,具有良好的阻燃性能。因此,综合力学性能分析结果可知,当 VTES-MH 的质量分数为 50% 时,VTES-MH/硅橡胶复合材料既能保持较优的力学性能,同时还具备良好的阻燃性能。

3 结论

(1)随着反应时间的延长、搅拌转速的增大、改性剂质量分数的增大以及反应温度的提高,VTES-MH、ETES-MH、APTES-MH 的表面极性均呈现先减小后增大的趋势。通过实验确定的最佳改性条件为:改性剂为 VTES、改性剂质量分数为 8%、反应温度为 80℃、搅拌转速为 500 r/min、反应时间为 2.0 h。该条件下 VTES-MH 与水的接触角为 108.4°,均大于 ETES-MH 和 APTES-MH;与二甲基硅油的接触角为 66.3°,均小于 ETES-MH 和 APTES-MH,即具有更低的表面极性。

(2)将改性 MH 共混入硅橡胶,当 VTES-MH 质量分数为 50% 时,与未添加 MH 的硅橡胶相比,拉伸强度和断裂伸长率仅分别降低了 5% 和 11%,VTES-MH/硅橡胶复合材料具有良好的力学性能,同时该复合材料的 LOI 为 40.2%,表现出了优异的阻燃性能。

参考文献

- [1] Meng J, Zhang P, Wang S. Recent progress of abrasion-resistant materials: Learning from nature [J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, 45(2): 237-251.
- [2] Januszewski R, Dutkiewicz M, Maciejewski H, et al. Synthesis and characterization of phosphorus-containing, silicone rubber based flame retardant coatings [J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2018, 123: 1-9.
- [3] Zhang C, Chen Z. Probing molecular structures of poly(dimethylsiloxane) at buried interfaces in situ [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2013, 117: 3903-3914.
- [4] 张宇轩, 郝冬冬, 丁永红, 等. 硅橡胶表面亲水改性及其性质研究 [J]. *橡胶工业*, 2023, 70(2): 105-110.
- [5] 李婉玉, 李瑞波, 夏涛, 等. 纳米云母/硅橡胶复合材料的制备与性能研究 [J]. *化工新型材料*, 2022, 50(12): 188-192.
- [6] Zhu X Q, Zhou L M, Zhang Y X, et al. Improved electrical treeing properties of silicone rubber at high temperatures by grafting aromatic hydrocarbon voltage stabilizer [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, 207: 110230.
- [7] Wei Z, He Q, Zhang F Y, et al. Preparation and analysis of conductive and superhydrophobic silicone rubber [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 350: 114123.
- [8] Li Z, Liang W, Shan Y, et al. Study of flame-retarded silicone rubber with ceramifiable property [J]. *Fire and Materials*, 2020, 44: 487-496.
- [9] Hanlon J M, Bravo Diaz L, Balducci G, et al. Rapid surfactant-free synthesis of Mg(OH)₂ nanoplates and pseudomorphic dehydration to MgO [J]. *CrystEngComm*, 2015, 17: 5672-5679.
- [10] Balducci G, Bravo Diaz L, Gregory D. Recent progress in the synthesis of nanostructured magnesium hydroxide [J]. *CrystEngComm*, 2017, 19: 6067-6084.
- [11] Al-Hazmi F, Umar A, Dar G N, et al. Microwave assisted rapid growth of Mg(OH)₂ nanosheet networks for ethanol chemical sensor application [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 519: 4-8.
- [12] 庞洪昌, 王智煜, 田朋, 等. “一锅法”合成双组分镁基阻燃剂及性能研究 [J]. *无机盐工业*, 2022, 54(8): 54-58.
- [13] Guo X, Zhao L, Zhang L, et al. Surface modification of magnesium aluminum hydroxide nanoparticles with poly(methyl methacrylate) via one-pot in situ polymerization [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(7): 2404-2409.
- [14] Sain M, Park S H, Suhara F, et al. Flame retardant and mechanical properties of natural fiber-PP composites containing magnesium hydroxide [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2004, 83(2): 363-267.
- [15] Arkles B. Tailoring surfaces with silanes [J]. *Chem Tech*, 1977, 7(12): 766-778. ■