

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.04.023

聚氨酯 / 无机填料复合材料制备及性能

曹翔宇, 田娜娜, 雷晓鹏, 周元元, 王德辉, 胡雅楠, 韩珏, 刘海燕

(山西海诺科技股份有限公司, 山西高平 048400)

摘要:以空心玻璃微珠、氢氧化铝为无机填料,采用物理共混-浇注工艺制备了聚氨酯/无机填料复合材料。分别研究了空心玻璃微珠和氢氧化铝对浆料黏度、复合材料的力学性能、密度、成本的影响。结果表明,相对于氢氧化铝,添加改性空心玻璃微珠的异氰酸酯或组合聚醚的黏度更低,对流动性的影响更小。添加改性空心玻璃微珠,复合材料的力学性能有所降低,当改性空心玻璃微珠含量为 40 g 时,复合材料的弯曲强度和压缩强度分别降低 53.4%, 55.3%; 添加氢氧化铝的复合材料的力学性能明显提高,当氢氧化铝含量为 140 g 时,复合材料的弯曲强度和压缩强度提升 36.0%, 22.1%。添加 40 g 的改性空心玻璃微珠,复合材料的密度降低到 0.73 g/cm³, 密度降低 43.8%, 具有明显的减重效果; 添加 140 g 氢氧化铝时,复合材料的密度增大到 1.30 g/cm³, 密度提高 28.7%。改性空心玻璃微珠具有更明显的降成本效果。

关键词:物理共混-浇注; 空心玻璃微珠; 氢氧化铝; 黏度; 力学性能; 密度; 成本

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)04-0134-05

Preparation and Properties of Polyurethane / Inorganic Filler Composites

Cao Xiangyu, Tian Nana, Lei Xiaopeng, Zhou Yuanyuan, Wang Dehui, Hu Yanan, Han Jue, Liu Haiyan

(Shanxi Hainuo Technology Co., Ltd., Gaoping, 048400, China)

Abstract: Hollow glass microsphere and aluminum hydroxide were used as inorganic fillers, the polyurethane / inorganic filler composites were prepared by physical blending-casting method. The effects of hollow glass microsphere and aluminum hydroxide on the slurry viscosity, mechanical properties, density and cost of composites were studied respectively. The results show that the addition of modified hollow glass microsphere to isocyanate or combination polyether has a lower viscosity than the addition of aluminum hydroxide, and has a smaller effect on fluidity. The mechanical properties of the composite are reduced when adding the modified hollow glass microsphere, the bending strength and compressive strength are reduced by 53.4% and 55.3% respectively with adding 40 g modified hollow glass microsphere. The mechanical properties of the composite are significantly improved when adding the aluminum hydroxide, the bending strength and compressive strength of the composite are increased by 36.0% and 22.1% respectively with adding 140 g aluminum hydroxide. When the content of modified hollow glass microsphere is 40 g, the density of the composite is reduced to 0.73 g/cm³ and the density is reduced by 43.8%, which has a significant weight loss effect. When the content of aluminum hydroxide is 140 g, the density of the composite increases to 1.30 g/cm³, the density increases by 28.7%. From a cost perspective, the modified hollow glass microsphere has a more significant cost reduction effect.

Keywords: physical blending-casting method; hollow glass microsphere; aluminum hydroxide; viscosity; mechanical property; density; cost

聚氨酯是综合性能优异的合成树脂之一,由于其合成单体品种多、反应条件温和、可控、配方调整余地大及其高分子材料的微观结构特点等,可广泛应用于泡沫塑料、合成纤维以及弹性体等。已经成

为人们衣、食、住、行以及高新技术领域必不可少的材料之一^[1-2]。

空心玻璃微珠(HGM)是一种微米级新型轻质材料,其主要成分是硼硅酸盐,一般粒度为 10 ~

通讯作者: 田娜娜, 硕士, 主要从事复合材料的研究 E-mail: tnn0518@163.com

收稿日期: 2020-01-13

引用格式: 曹翔宇, 田娜娜, 雷晓鹏, 等. 聚氨酯 / 无机填料复合材料制备及性能 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(4): 134-138.

Cao Xiangyu, Tian Nana, Lei Xiaopeng, et al. Preparation and properties of polyurethane / inorganic filler composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(4): 134-138.

250 μm ,壁厚为 1~2 μm ,该产品具有质轻、强度高、导热系数和热收缩系数小等特点,经过特殊处理具有亲油、憎水性能,非常容易分散于树脂等有机材料中^[3]。可直接填充于绝大部分热固性、热塑性树脂产品中,起到减轻产品质量、降低成本的效果,同时可消除产品内应力,确保尺寸稳定性,赋予材料隔音、隔热、绝缘等性能^[4-5]。

氢氧化铝是用量最大和应用最广的复合材料填料,在化学上惰性、无毒,在聚氨酯制品中添加氢氧化铝可提高聚氨酯制品的力学性能,起到增强的作用^[6]。

笔者在聚氨酯黑白料中,添加不同的无机填料,真空除泡、浇注、高温固化得到聚氨酯/无机填料复合材料,对其力学性能、密度及成本进行了分析研究。制备的聚氨酯/无机填料复合材料可达到低密度、高强度,并可以明显降低原材料的体积成本。

1 实验部分

1.1 主要原材料

组合聚醚:CH-1,密度为 1.2 g/cm^3 ,烟台才华聚氨酯科技有限公司;

异氰酸酯:PM200,密度为 1.2 g/cm^3 ,烟台万华聚氨酯股份有限公司;

分子筛:4A 级,45 μm (325 目),密度为 2 g/cm^3 ,江西鑫陶科技股份有限公司;

空心玻璃微珠:HN20,密度为 0.2 g/cm^3 ,山西海诺科技股份有限公司;

氢氧化铝:H-WF-25,38 μm (400 目),密度为 2.4 g/cm^3 ,中铝山东有限公司;

滑石粉:SD-400,38 μm (400 目),密度为 2.7 g/cm^3 ,灵寿县鸿鹏矿产品加工厂;

消泡剂:A530,广东力胜聚合物技术有限公司;

铝酸酯偶联剂:DL-411,南京飞腾化工有限公司。

1.2 主要设备及仪器

高速分散器:YPM-05 型,广州市亚拓机械有限公司;

真空干燥箱:DZF-2AS 型,北京科伟仪器有限公司;

鼓风干燥箱:101-1A 型,北京科伟仪器有限公司;

玻璃反应釜:S212-5L 型,上海勃冉仪器有限公司;

不锈钢模具:定制;

万能材料试验机:CREE-8003A 型,东莞市科锐仪器科技有限公司;

硬度计:LX-D-2 型,温州韦度电子有限公司;

真密度仪:XF-ZMD01 型,广州晓分仪器有限公司;

黏度计:NDJ-8S 型,上海方瑞仪器有限公司。

1.3 聚氨酯/无机填料复合材料的制备

聚氨酯/无机填料复合材料配方列于表 1。

表 1 聚氨酯/无机填料复合材料配方 g

材料	编号								
	A	B-0	B	C	D	E	B-1	B-2	B-3
异氰酸酯	100	100	100	100	100	100	100	100	100
组合聚醚	100	100	100	100	100	100	100	100	100
分子筛	10	10	10	10	10	10	10	10	10
改性空心玻璃微珠	0	10	10	20	30	40	10	10	10
氢氧化铝	20	0	20	20	20	20	60	100	140
滑石粉	10	10	10	10	10	10	10	10	10
消泡剂	1	1	1	1	1	1	1	1	1

聚氨酯/无机填料复合材料制备步骤如下:

(1)空心玻璃微珠表面预处理。

①将铝酸酯偶联剂溶于乙酸乙酯溶剂中形成铝酸酯偶联剂溶液,将空心玻璃微珠加入混合器中,启动搅拌,采用滴加法均匀加入偶联剂溶液,加完后继续搅拌 15 min,其中铝酸酯偶联剂的用量为空心玻璃微珠质量的 1%^[7];

②将表面改性的空心玻璃微珠置于 100℃真空烘箱中干燥 8 h,备用。

(2)聚氨酯/无机填料复合材料的制备。

①将空心玻璃微珠、氢氧化铝、滑石粉等粉料于 120℃真空烘箱中干燥 8 h,备用;

②喷涂脱模剂,于 120℃加热模具 1 h,使溶剂蒸发,之后将模具置于 60℃鼓风干燥箱中预热,备用;

③将消泡剂分别添加于异氰酸酯和组合聚醚中,其中消泡剂的用量为异氰酸酯或组合聚醚质量的 0.5%;

④称量提前干燥好的粉料填料,分别添加于异氰酸酯或组合聚醚中形成异氰酸酯混合物或聚醚混合物,异氰酸酯和组合聚醚中填料的质量比为 1:1;

⑤在玻璃反应釜中,于真空状态下分别搅拌两种混合物,真空度为 -0.90 MPa,混合至均匀且无气泡为止;

⑥异氰酸酯混合物和聚醚混合物按质量比 1:1 混合,转速为 100 r/min,搅拌 10 min,混合

均匀;

⑦将混合均匀的浆料浇注于预热好的模具中,3 h后置于80℃鼓风干燥箱中干燥12 h,做后熟化处理,待冷却后取出样品,备用。

1.4 性能测试

硬度按 GB/T 2411-2008 测试。

弯曲性能按 GB/T 9341-2008 测试。

压缩性能按 GB/T 1041-2008 测试。

黏度按 GB/T 12008.7-2010 测试。

密度测试:称取一定质量的样品,置于全恒温真密度仪样品仓中,密闭测试系统,通入氮气。压力传感器通过检测已知体积基准仓中的气体向样品池注入时的压力变化,测定未被样品所占的体积,由此测得样品的真实体积,根据公式 $\rho = m/V$ (ρ , m , V 分别为样品的密度、质量、体积)计算出样品的真实密度。

2 结果与讨论

2.1 不同填料对浆料黏度的影响

在100 g 异氰酸酯或100 g 组合聚醚中添加不含量的改性或未改性空心玻璃微珠,对浆料的黏度进行测试,并观察其流动性,结果列于表2。

表2 空心玻璃微珠含量对浆料黏度的影响

项目		空心玻璃微珠含量/g				
		0	5	10	15	20
添加未改性空心玻璃微珠的异氰酸酯	黏度/(mPa·s)	204.9	375.6	895.9	1884.3	4837.5
	流动性	好	好	好	好	较好
添加改性空心玻璃微珠的异氰酸酯	黏度/(mPa·s)	204.9	331.7	759.3	1524.9	3981.7
	流动性	好	好	好	好	较好
添加未改性空心玻璃微珠的组合聚醚	黏度/(mPa·s)	238.1	517.7	1205.7	3500.1	13729.1
	流动性	好	好	好	好	较好
添加改性空心玻璃微珠的组合聚醚	黏度/(mPa·s)	238.1	468.2	1018.4	2937.5	11028.3
	流动性	好	好	好	好	好

由表2可以看出,随着空心玻璃微珠含量的增加,浆料的黏度逐渐增大,其流动性变差。与添加未改性空心玻璃微珠的浆料相比,添加铝酸酯偶联剂处理过的空心玻璃微珠的浆料的黏度增加相对缓慢,其流动性也有所改善,说明铝酸酯偶联剂可改善空心玻璃微珠与异氰酸酯和组合聚醚的相容性^[8-9]。

在100 g 异氰酸酯或100 g 组合聚醚中添加不同含量的氢氧化铝,对其进行黏度测试,并观察其流动性,结果列于表3。

由表3可以看出,随着氢氧化铝含量的增加,

表3 氢氧化铝含量对浆料黏度的影响

项目		氢氧化铝含量/g				
		0	20	60	100	140
添加氢氧化铝的异氰酸酯	黏度/(mPa·s)	204.9	340.5	649.1	1619.2	8231.6
	流动性	好	好	较好	差	极差
添加氢氧化铝的组合聚醚	黏度/(mPa·s)	238.1	293.2	533.6	1105.8	2974.5
	流动性	好	好	好	好	较好

浆料的黏度逐渐增大,其流动性变差。在异氰酸酯体系中,当氢氧化铝用量为140 g时,其黏度达到8231.6 mPa·s,并且浆液无任何流动性。

由此可见,相比于氢氧化铝,添加空心玻璃微珠对浆料黏度、流动性的影响较小。

2.2 不同填料对聚氨酯/无机填料复合材料性能的影响

(1) 不同填料对复合材料力学性能的影响。

对样品A、B、C、D、E进行力学性能检测,分析不同改性空心玻璃微珠含量对聚氨酯/无机填料复合材料力学性能的影响,结果列于表4。

表4 不同改性空心玻璃微珠含量的复合材料的力学性能

项目	A	B	C	D	E
改性空心玻璃微珠含量/g	0	10	20	30	40
硬度(邵氏D)	83	81	76	73	72
弯曲强度/MPa	53.47	47.63	38.14	29.73	24.91
压缩强度/MPa	83.26	66.24	54.37	42.84	37.15

从表4可以看出,随着改性空心玻璃微珠含量的增加,复合材料的硬度、弯曲强度、压缩强度均呈现下降趋势。当改性空心玻璃微珠含量为40 g时,复合材料的硬度、弯曲强度、压缩强度分别为72, 24.91 MPa, 37.15 MPa, 相比于未加空心玻璃微珠时的复合材料,分别降低13.3%, 53.4%, 55.3%。力学性能下降的主要原因有:(1)空心玻璃微珠的强度较小,较树脂基体更低;(2)粒径较大的空心玻璃微珠壁较薄,在混合搅拌过程中易破碎、团聚、分散不均匀,使力学性能降低^[10]。

对样品B-0, B, B-1, B-2, B-3进行力学性能检测,分析氢氧化铝含量对聚氨酯/无机填料复合材料力学性能的影响,结果列于表5。

表5 不同氢氧化铝含量的复合材料的力学性能

样品	B-0	B	B-1	B-2	B-3
氢氧化铝含量/g	0	20	60	100	140
硬度(邵氏D)	78	80	84	87	89
弯曲强度/MPa	43.19	47.63	49.91	53.16	58.73
压缩强度/MPa	63.87	66.24	69.14	73.68	77.98

从表5可以看出,随着氢氧化铝含量的增加,聚氨酯/无机填料复合材料的硬度、弯曲强度、压缩强

度均有提升。当氢氧化铝的含量为 140 g 复合材料的硬度、弯曲强度、压缩强度分别为 89,58.73 MPa, 77.98 MPa, 相比于未加氢氧化铝的复合材料, 分别提升 14.1%, 36.0%, 22.1%。

由此可见, 加入氢氧化铝可以提高复合材料的力学性能, 弥补由于添加空心玻璃微珠降低力学性能的缺陷。

(2) 不同填料对复合材料密度的影响。

不同改性空心玻璃微珠含量的聚氨酯/无机填料复合材料的密度列于表 6。

表 6 不同改性空心玻璃微珠含量的复合材料的密度

项目	A	B	C	D	E
改性空心玻璃微珠含量/g	0	10	20	30	40
密度/(g·cm ⁻³)	1.28	1.05	0.91	0.80	0.72

由表 6 可以看出, 随着改性空心玻璃微珠含量的增加, 复合材料的密度逐渐减小。当空心玻璃微珠的含量由 0 增加到 40 g 时, 复合材料的密度由 1.28 g/cm³ 降低到 0.72 g/cm³, 密度降低 43.8%, 具有明显的减重效果。这是由于空心玻璃微珠特殊的中空结构且具有一定的强度, 其破碎率很低, 可降低复合材料的密度^[11-12]。

不同氢氧化铝含量的聚氨酯/无机填料复合材料的密度列于表 7。

表 7 不同氢氧化铝含量的复合材料的密度

项目	B-0	B	B-1	B-2	B-3
氢氧化铝含量/g	0	20	60	100	140
密度/(g·cm ⁻³)	1.01	1.05	1.14	1.22	1.30

由表 7 可以看出, 在复合材料中添加氢氧化铝, 复合材料的密度增大, 当氢氧化铝的含量由 0 增加到 140 g 时, 复合材料的密度由 1.01 g/cm³ 增大到 1.30 g/cm³, 密度提高 28.7%。因为氢氧化铝自身密度较高, 在复合材料中添加氢氧化铝会提高复合材料的密度。

2.3 不同填料对聚氨酯/无机填料复合材料成本的影响

聚氨酯/无机填料复合材料主要用于模具、检具的制备, 在市场上材料的销售价格以体积计算。据市场调研, 空心玻璃微珠的售价约为 32 000 元/t, 综合计算, 不同空心玻璃微珠含量的聚氨酯/无机填料复合材料的成本列于表 8。

从表 8 可以看出, 随着改性空心玻璃微珠含量的增加, 虽然复合材料的单位质量成本增加, 但是其单位体积成本明显降低, 当改性空心玻璃微珠含量由 0 增加到 40 g 时, 复合材料的单位质量成本由

表 8 不同空心玻璃微珠含量的复合材料的成本

项目	A	B	C	D	E
改性空心玻璃微珠含量/g	0	10	20	30	40
单位质量成本/(元·t ⁻¹)	M	1.04 M	1.07 M	1.11 M	1.14 M
单位体积成本/(元·m ⁻³)	T	0.86 T	0.78 T	0.72 T	0.67 T

注: 由于商业保密原因, 以 A 产品的成本为单位, 其中 M 代表单位质量成本, T 代表单位体积成本。

M 元/t 增加到 1.14 M 元/t, 增加了 14%, 而单位体积成本由 T 元/m³ 降低到 0.67 T 元/m³, 降低了 33%。

由此可见, 空心玻璃微珠由于其低密度、高强度的特性, 可降低单位体积成本, 提高经济效益。

根据市场情况, 氢氧化铝的售价为 4 000 元/t, 综合计算, 不同氢氧化铝含量的聚氨酯/无机填料复合材料的成本列于表 9。

表 9 不同氢氧化铝含量的复合材料的成本

样品	B-0	B	B-1	B-2	B-3
氢氧化铝含量/g	0	20	60	100	140
单位质量成本/(元·t ⁻¹)	M'	0.93 M'	0.84 M'	0.77 M'	0.71 M'
单位体积成本/(元·m ⁻³)	T'	0.98 T'	0.96 T'	0.93 T'	0.91 T'

注: 由于商业保密原因, 以 B-0 产品的成本为单位, 其中 " M' " 代表单位质量成本, " T' " 代表单位体积成本。

从表 9 可以看出, 随着氢氧化铝含量的增加, 复合材料的单位质量成本和单位体积成本都有所降低, 当氢氧化铝的含量由 0 增加到 140 g 时, 单位质量成本由 M' 元/t 降低到 0.71 M' 元/t, 降低了 29%, 单位体积成本由 T' 元/m³ 降低到 0.91 T' 元/m³, 降低了 9%。降成本效果较空心玻璃微珠不明显。

3 结论

研究了不同填料对聚氨酯/无机填料复合材料的性能影响, 得到以下结论:

(1) 在浆料中添加空心玻璃微珠和氢氧化铝, 空心玻璃微珠对浆料的黏度、流动性的影响较小, 氢氧化铝对浆料的黏度、流动性的影响较大。

(2) 添加空心玻璃微珠在一定程度上降低了聚氨酯/无机填料复合材料的力学性能, 当改性空心玻璃微珠含量由 0 增加到 40 g 时, 复合材料的弯曲强度和压缩强度分别降低 53.4%, 55.3%。添加氢氧化铝可提高聚氨酯/无机填料复合材料的力学性能。当氢氧化铝含量由 0 增加到 140 g 时, 其弯曲强度和压缩强度提升 36.0%, 22.1%。

(3) 添加空心玻璃微珠可明显降低聚氨酯/无机填料复合材料的密度, 当改性空心玻璃微珠的含量由 0 增加 40 g 时, 复合材料的密度由 1.28 g/

cm^3 降低到 0.72 g/cm^3 , 密度降低 43.8%, 可满足轻量化的需求; 添加氢氧化铝提高了聚氨酯/无机填料复合材料的密度, 当氢氧化铝含量由 0 增加到 140 g 时, 密度由 1.01 g/cm^3 增大到 1.30 g/cm^3 , 密度提高 28.7%。

(4) 从成本角度考虑, 添加空心玻璃微珠和氢氧化铝均可降低复合材料的成本, 提高经济效益, 其中添加空心玻璃微珠降成本效果更明显。

参考文献

- [1] 蒋婧, 蔡源, 汤立新. 聚氨酯/硅酸盐复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料工业, 2018(5):107-111.
Jiang Jing, Cai Yuan, Tang Lixin. Study on the preparation and properties of polyurethane/silicate composites[J]. China Plastics Industry, 2018(5):107-111.
- [2] 林云, 梁晓烽, 李松原, 等. 活性炭/聚氨酯海绵的制备工艺与吸附性能[J]. 现代化工, 2018(7):162-166.
Lin Yun, Liang Xiaoyi, Li Songyuan, et al. Preparation of activated carbon/polyurethane sponge and its adsorption property[J]. Modern Chemical Industry, 2018(7):162-166.
- [3] 梁小杰, 梁宁宁, 梁忠旭, 等. 树脂/空心玻璃微珠复合泡沫塑料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(2):121-124.
Liang Xiaojie, Liang Ningning, Liang Zhongxu, et al. Development of resin/hollow glass microsphere syntactic foams[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(2):121-124.
- [4] 彭寿, 王芸, 彭程, 等. 空心玻璃微珠制备方法及应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(6):1508-1513.
Peng Shou, Wang Yun, Peng Cheng, et al. The research progress on preparation method and application of hollow glass microsphere[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(6):1508-1513.
- [5] 张响, 张春祥, 黄泽慧, 等. 空心玻璃微珠/环氧树脂基复合泡沫材料研究进展[J]. 广东化工, 2016, 43(1):87-88.
Zhang Xiang, Zhang Chunxiang, Huang Zehui, et al. Research on progress of hollow glass bead filled epoxy composites[J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(1):87-88.
- [6] 邹志华. 氢氧化铝颗粒填充不饱和聚酯树脂复合材料力学性能研究[J]. 功能材料, 2015, 46(S2):189-191, 196.
Wu Zhihua. Study on mechanical properties of unsaturated polyester resin composites filled with aluminum hydroxide particles[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46 (S2):189-191, 196.
- [7] 李想, 李仙会, 马颖琦, 等. 环氧树脂/空心玻璃微珠泡沫材料性能研究[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(4):31-34, 43.
Li Xiang, Li Xianhui, Ma Yingqi, et al. Research on properties of epoxy resin/hollow glass microspheres foam materials[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(4):31-34, 43.
- [8] 王鹏. 空心玻璃微珠表面改性对固体浮力材料性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
Wang Peng. The influence of HGM surface modification on solid buoyancy material[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [9] 刘晓文, 孙秀丽, 秦贤玉, 等. 空心玻璃微珠对 MDI 体系聚氨酯弹性体性能的影响[J]. 塑料科技, 2018, 46(8):48-51.
Liu Xiaowen, Sun Xiuli, Qin Xianyu, et al. Effect of hollow glass beads on properties of polyurethane elastomers of MDI system[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(8):48-51.
- [10] 陈伟红, 杨迎, 郭子东, 等. 空心玻璃微珠对聚氨酯泡沫燃烧和力学性能的影响[J]. 化学研究, 2011(6):68-72.
Chen Weihong, Yang Ying, Guo Zidong, et al. Effect of hollow glass microsphere on combustion behavior and mechanical properties of polyurethane foam[J]. Chemical Research, 2011(6):68-72.
- [11] 叶艳, 鄢捷年. 高强度空心玻璃微珠低密度水基钻井液室内研究及应用[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(3):41-44.
Ye Yan, Yan Jienian. Lab tests and applications of the HGS low-density water-based drilling fluid[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(3):41-44.
- [12] 刘文栋. 空心玻璃微珠的浮选及其在固体浮力材料中复合应用技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Liu Wendong. The flotation selection of hollow glass microspheres and its application in solid buoyancy materials[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [13] (上接第 133 页)
application[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2019, 42(6):577-582.
- [15] 刘建利, 肖啸, 曹继平, 等. 六(4-醛基苯氧基)环三磷腈对三元乙丙包覆层性能的影响[J]. 现代化工, 2019, 39(S1):115-119.
Liu Jianli, Xiao Xiao, Cao Jiping, et al. Influence of hexa(4-aldehydephenoxy) cyclotriphosphazene on EPDM inhibitor for solid rocket propellant[J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(S1):115-119.
- [16] 王建中, 王志锋, 曹继平. 芳氧基聚磷腈绝热包覆材料的性能表征[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(2):278-280.
Wang Jianzhong, Wang Zhifeng, Cao Jiping. Performance characterization of polyaryloxyphosphazene insulation coating material[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(2):278-280.