

引用格式: 史国华, 蒲胜利, 王振北. 玻璃微珠填充硅树脂可磨耗层的制备工艺及其在航空发动机静子组合件上的应用[J]. 航空材料学报, 2024, 44(3): 118-123.
SHI Guohua, PU Shengli, WANG Zhenbei. Preparation technology of glass microspheres reinforced silicone resin and its application as abrasible coating for stator component in aero-engine[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(3): 118-123.

玻璃微珠填充硅树脂可磨耗层的制备工艺及其在航空发动机静子组合件上的应用

史国华, 蒲胜利*, 王振北

(中国航发动力股份有限公司, 西安 710021)

摘要: 树脂基可磨耗层是航空发动机静子组合件的重要组成部分, 利用其可磨耗性可保护转动件与静子组合件, 并通过减小转动件与静子组合件之间的间隙优化航空发动机性能。采用加成型硅树脂为基体, 研究不同粒径与堆积密度的实心/空心玻璃微珠对复合磨耗层加工性能的影响规律; 采用专用磨耗试验机模拟高速叶片磨耗工况, 研究不同种类与含量玻璃微珠对硅树脂复合材料磨耗性能的影响规律。结果表明: H 型(粒径分布 20~80 μm)空心玻璃微珠填充硅树脂复合材料具有优异的表面质量、流淌性与综合性能。通过玻璃微珠填充料优选与含量调控, 结合工装设计以及灌注工艺参数调控, 形成玻璃微珠填充硅树脂可磨耗层的可控制备工艺, 并在航空发动机静子组合件上得到应用与验证。

关键词: 玻璃微珠; 硅树脂; 可磨耗层; 工艺调控

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2023.000057

中图分类号: V258; TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2024)03-0118-06

Preparation technology of glass microspheres reinforced silicone resin and its application as abrasible coating for stator component in aero-engine

SHI Guohua, PU Shengli*, WANG Zhenbei

(AECC Aviation Power Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: The abrasible coating is one of the significant stator components in aero-engine, which protects the rotating blade and casing by abrading itself and improves the engine performance by reducing the gap between the rotor and stator. In this study, taking the addition-type silicone resin as the matrix, the effect of diameter and stacking density of glass hollow/solid microspheres on the processability of abrasible coating was investigated. Moreover, the effect of glass microsphere type and content was illustrated using a self-designed wear tester simulating the working conditions of stator in aero-engine. The results show that the silicone resin reinforced by H-type (size distribution 20–820 μm) hollow glass microspheres exhibits excellent surface quality, flowability and comprehensive performance. The suitable preparation technology of abrasible coatings was developed by glass microsphere selection, content controlling, tool design and infusion parameters optimizing. The as-prepared glass microsphere/silicone abrasible composite is successfully applied and verified in aero-engine stator component.

Key words: glass microspheres; silicone resin; abrasible coating; process control

大推重比、高效率、低油耗是航空发动机设计与制造一直追求的总体目标, 通过新型可磨耗层材料研制与应用减小转动件与静子组合件之间间隙

是优化航空发动机性能的重要途径^[1-2]。传统磨耗层一般采用金属热喷涂方法制造以保障强度, 但研究发现金属磨耗层在高速剪切下容易发生塑性

变形与黏合,增大转动件磨损,降低转动件的使用寿命^[3-4]。

加成型硅树脂是一种特种工程材料,由含乙烯基的硅氧烷与多 Si—H 键硅氧烷通过氢硅化加成反应制成,具有交联的网络结构。硅树脂固化后具有良好弹性、耐热性、高强度等优异的力学性能及尺寸稳定性,被广泛应用于航空航天、汽车制造等领域。纯硅树脂固化后仅表现出橡胶的特性,只能用于空气系统密封材料,严重限制了材料应用范围。引入功能填料(如玻璃微珠等)可实现对硅树脂的改性,既可以保留固化后硅树脂良好的性能,又能使其具备良好的可磨耗性^[5-6]。玻璃微珠具有轻质、可磨、耐高温、抗腐蚀等特点,是性能优良的填充材料,由于玻璃微珠表面呈现惰性,作为填料使用前,必须经偶联剂进行表面改性才能与树脂形成良好的粘接强度^[6-8]。目前,将不同尺寸、不同结构的玻璃微珠在聚氯乙烯、聚丙烯、聚酯及丁腈橡胶等的改性研究已有报道,然而玻璃微珠在硅树脂中的改性研究尚未得到充分开展^[9-12]。

随着新型航空发动机静子组合件发展,需要一

种既具备良好耐热性、高粘接强度,又具备可磨耗性的磨耗层^[13-17]。本工作以加成型硅树脂为基体,研究不同粒径、堆积密度的实心/空心玻璃微珠对复合磨耗层加工性能的影响规律;采用专用磨耗试验机模拟高速叶片磨耗工况,研究不同种类、不同含量玻璃微珠对硅树脂复合材料磨耗性能的影响规律;在此基础上,通过对玻璃微珠优选、工装设计以及灌注工艺等方面研究,实现了玻璃微珠填充硅树脂可磨耗层的可控制备,并在航空发动机静子组合件上取得应用。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实心玻璃微珠选用 0[#]、2[#]、4[#]三个牌号,空心微珠选用 K、B、H 三个牌号,表面均经硅烷偶联剂改性,其粒径分布与堆积密度如表 1 所示。将质量份数为 100 份的硅树脂 A 组分、10 份的 B 组分与 10~30 份的玻璃微珠混合,并通过灌注成型后制备复合材料。

表 1 玻璃微珠粒径分布与堆积密度
Table 1 Size distribution and stacking density of glass microspheres

Property	Solid glass microsphere			Hollow glass microsphere		
	0 [#]	2 [#]	4 [#]	K	B	H
Size distribution/ μm	10-50	65-90	105-120	30-120	10-100	20-80
Stacking density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.7	1.7	1.55	0.125	0.19	0.39

1.2 灌注成型

为实现玻璃微珠填充硅树脂可磨耗层的可控灌注成型,设计了一套抽真空辅助非标设备,该设备主要由硅树脂罐、搅拌电机、真空泵、操作控制及静态混合管等部件组成,设备的先进性在于设计真空灌注工艺及设备利用抽真空产生负压,使得双组分树脂充分填充模腔,待树脂固化后拆除辅助工装后即得所需制品。通过该设备,使硅树脂的 A 组分(含玻璃微珠)和 B 组分经静态混合管控制配制比例,并使混合、抽真空、灌注等步骤连续操作。设计了配套工装以实现静子组合件内环定位和玻璃微珠填充硅树脂可磨耗层的灌注。

1.3 性能分析

采用专用磨耗试验机评价玻璃微珠填充硅树脂复合材料的耐磨耗性能。实验装置由轮盘、模拟叶片、试件工装、测力元件和进给系统组成,标称最高转速 27000 r/min(即 450 r/s),叶片直径 80 mm。

将实心/空心玻璃微珠填充硅树脂可磨耗层试样称重并计算材料密度,然后固定在试验台上,启动磨耗试验机使其慢慢接触到试样,再将叶片尖线速度控制在 100 m/s,从叶片接触到试样开始计时,10 s 后离开试样,计算磨耗质量与磨耗体积,并观察磨耗外观。

2 结果与讨论

2.1 可加工性

优异的加工性是玻璃微珠填充硅树脂复合可磨耗层应用的前提与关键。因此,首先采用金刚石刀片,在车床转速 200 r/min,单边进刀量 0.2 mm 条件下分别对实心与空心玻璃微珠填充硅树脂可磨耗层试样进行机械加工,规格为圆柱试样约 $\phi 50$ mm。实心玻璃微珠填充硅树脂可磨耗层加工后试样表面形貌如图 1 所示。

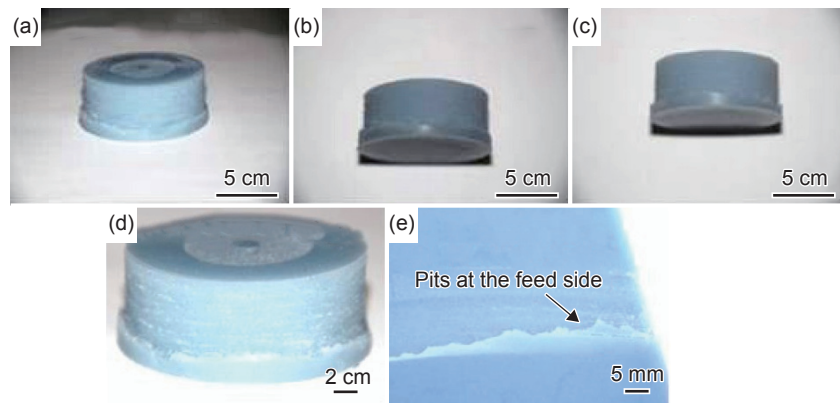


图1 不同牌号实心玻璃微珠改性硅树脂机械加工表面形貌
(a) 0[#], 10 份; (b) 2[#], 10 份; (c) 4[#], 10 份; (d) 0[#], 20 份; (e) 0[#], 30 份

Fig. 1 Surface morphology of silicone resin reinforced by solid glass microspheres with different types
(a) 0[#], 10 phr; (b) 2[#], 10 phr; (c) 4[#], 10 phr; (d) 0[#], 20 phr; (e) 0[#], 30 phr

从机械加工效果来看,对于实心玻璃微珠填充改性的硅树脂而言,在 $1.55 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ 堆积密度范围内、由不同牌号玻璃微珠填充硅树脂的加工表面均较为粗糙,机械加工性能较差。将实心玻璃微珠含量由 10 份增加至 30 份后,试样加工后表面仍粗糙,进刀处可见明显凹坑,说明提高实心玻璃微珠含量也无助于提升复合材料的可加工性。

分别制备了质量为 10 份、11 份和 13 份 H 型空心玻璃微珠填充硅树脂试样,进行加工性能实验,结果见表 2。

表 2 空心玻璃微珠/硅树脂机械加工表面质量
Table 2 Surface quality of silicone resin reinforced by hollow glass microspheres with different addition contents

Hollow glass microsphere content /phr	Surface quality
10	Rough
11	Relatively smooth
13	Smooth

从实验结果看,添加 11~13 份 H 型玻璃微珠的硅树脂均可实现表面光滑、无缺陷的加工要求,其加工表面质量明显优于实心玻璃微珠填充硅树脂。究其原因在于所用空心玻璃微珠堆积密度为 $0.125 \sim 0.39 \text{ g/cm}^3$,仅为实心玻璃微珠的 25%,加入硅树脂后具有较好的流动性,使混合料黏度下降;此外,空心玻璃微珠导热系数低,分散性、流动性与自润滑性均较为优异,从而可以有效避免去边、切割和打磨时的粘刀现象,减小机加工刀具的磨损,综合提升复合材料的机械加工性能。

在确保表面质量的基础上,进一步研究空心玻璃微珠填充硅树脂的真空加工性与灌注产品的流

淌性。将 10 份 K、B 和 H 三种类型空心玻璃微珠分别与硅树脂混合、抽真空,其工艺性难易程度如表 3 所示。可以看出,空心玻璃微珠 B、H 与 K 相比,容易实现与硅树脂的均匀混合,混合料也易于实现较高真空度,具有更为优异的加工性。

表 3 不同空心玻璃微珠加工性能
Table 3 Processability of different types of hollow glass microspheres.

Processing method	K	B	H
Mix with silicon resin	Hard	Easy	Easy
Vacuum the mixture	Hard	Easy	Easy

按 HB5243—1993《室温硫化密封剂流淌性试验方法》,用流淌仪分别测试 K、B 和 H 三种不同类型空心玻璃微珠填充硅树脂的流淌性,结果如图 2 所示。由图 2 可见, K、B 和 H 三种类型空心玻璃微珠填充硅树脂的流淌性排序为: $K < B < H$ 。原因在于,对于同一硅树脂为基体的复合材料,其流

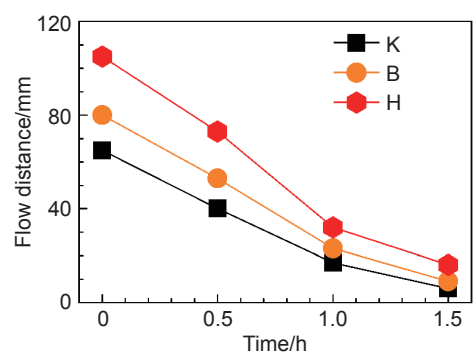


图 2 空心玻璃微珠填充硅树脂流淌性
Fig. 2 Flowability of silicone resin reinforced by hollow glass with different types

淌性主要取决于填料性质、形貌与用量。在形貌相当、用量一致的情况下,复合材料流淌性与其所用空心玻璃微珠的堆积密度大小显著相关。通常,在相同材料体系下堆积密度越低,体系黏度越小,流

淌性越好^[12]。

对 K、B 和 H 三种质量分数 13% 的空心玻璃微珠添加硅树脂可磨耗层理化性能进行了测试,结果见表 4。

表 4 空心玻璃微珠填充硅树脂复合材料综合性能
Table 4 Comprehensive performance of silicone resin reinforced by hollow glass with different types

Sample	Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Hardness/ Shore A	Tensile strength/MPa	Elongation at break /%	Tear strength/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	Bonding strength/MPa
Pristine silicon resin	1.0-1.3	60±5	≥4.5	200-300	16-21	≥1.2
Silicon resin filled by type K HGMs	0.83	63	2.9	93	7.6	4.7
Silicon resin filled by type B HGMs	1.06	60	2.7	141	9.7	3.8
Silicon resin filled by type H HGMs	1.07	61	4.6	121	11	4.0

从力学性能参数可以看出,空心玻璃微珠 H 填充硅树脂可磨耗层的拉伸强度、撕裂强度和粘接强度均较高。因为空心玻璃微珠具有显著的轻量化与可磨耗优势,然而引入硅树脂基体后在受到外力作用时往往在界面易诱发裂纹生长,导致力学性能下降^[13]。在化学性质相同,玻璃微珠与硅树脂界面结合大致相当的情况下,H 型空心玻璃微珠具有同类填料中最高的堆积密度,高的致密程度导致其在受到拉伸、撕裂与粘接剥离应力时不易成为应力集中点,从而表现出相对较高的力学性能。

2.2 磨耗性能

采用专用磨耗试验机模拟实际高速叶片磨耗工况,研究同含量/不同种类、不同含量/不同种类玻璃微珠对硅树脂复合材料磨耗性能的影响规律,结果如图 3 所示。由图 3(a)可见,当玻璃微珠含量为 13 份时,空心玻璃微珠填充硅树脂磨耗质量为 0.64~0.98 g,磨耗体积为 0.60~1.18 cm^3 ,而实心玻璃微珠填充硅树脂的对应值显著较小。即相对实心玻璃微珠,空心玻璃微珠填充硅树脂磨耗质量与体积数值更高。由图 3(b)可见,将实心玻璃微珠 4[#]含量由 10 份增加至 30 份时,磨耗体积仅增加 17%;而当空心玻璃 B 含量增加 2 份后,磨耗体积增加 22%。增加 5 份空位玻璃微珠 H 后,磨耗体积增幅达到 118%。由此可见,当空心玻璃微珠引入硅树脂基体后,在受到外力作用时往往在界面易诱发玻璃微珠裂纹生长,导致力学性能下降,结果表现为空心玻璃微珠填充可磨耗层容易被机械加工或磨耗;实心玻璃微珠致密、模量大、硬度高不易被机械加工或磨耗,因而空心玻璃微珠具有显著优于实心玻璃微珠的磨耗性能,容易通过自身磨耗降低转动件或静子组合件的磨损损伤;同时,其磨耗

程度可以通过添加玻璃微珠含量的精确控制实现有效调控。

添加不同种类、不同含量玻璃微珠硅树脂磨耗参数及外观列于表 5。空心玻璃微珠 H、B 与 K 填充硅树脂表面均较实心玻璃微珠更为光滑,其中以 H 改性硅树脂磨耗表面质量最高。与添加 10 份实心玻璃微珠的 4[#]试样相比,增大实心玻璃微珠份数至 30 份或用 5 份 B 型空心玻璃微珠制备的试样外观效果略有改善,但差别不明显。

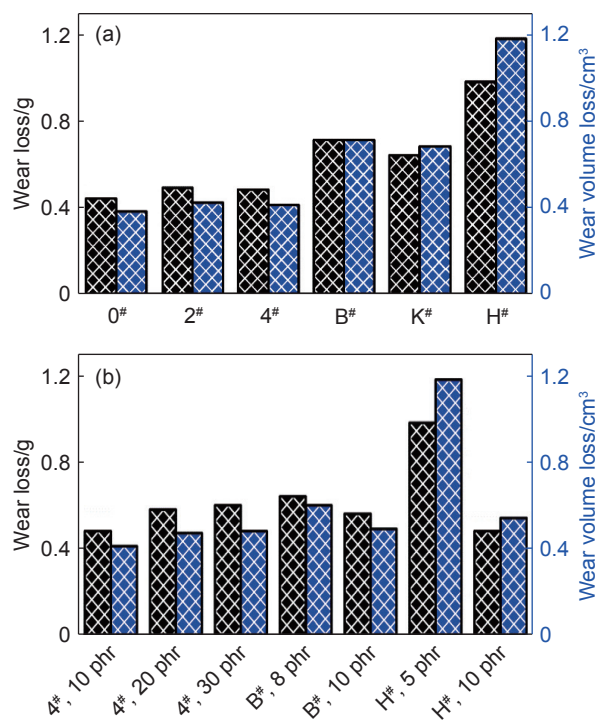


图 3 玻璃微珠填充硅树脂磨耗质量与磨耗体积
(a) 13 份不同种类玻璃微珠; (b) 不同含量不同种类玻璃微珠
Fig. 3 Abrasive mass loss and volume loss of silicone resin filled with glass microspheres (a) different types of glass microspheres with 13 phr; (b) different types of glass microspheres with varied contents

表 5 添加不同种类、不同含量玻璃微珠硅树脂磨耗参数及外观

Table 5 Abrasive results and surface quality of silicone resin reinforced by glass microspheres with different types and contents

Type	phr	Maximum tangential force/ N	Maximum normal force /N	Friction coefficient	Appearance
4 [#]	10	179.69	123.05	1.46	Rough
	30	176.76	179.2	0.99	Rough
H	10	151.37	111.33	1.36	Smooth
B	5	118.16	105.96	1.12	Relatively rough
	10	152.34	123.05	1.24	Relatively smooth
K	10	173.83	104.98	1.66	Relatively smooth

2.3 灌注工艺与零件生产

分别对 H 型质量分数 13% 的空心玻璃微珠填充硅树脂储罐进行抽真空, 抽真空用的参数分别为 100、200、300、400 Pa, 抽真空时间为 20 min, 结果见表 6。

表 6 抽真空参数及结果

Table 6 Vacuum parameters and results

Pressure /Pa	Result
100	Hardly perfused
200	Well perfused
300	Well perfused
400	Incomplete perfused

通过上述数据, 该设备采用的最佳真空参数为真空度: 200~300 Pa, 时间最少 20 min。随后将抽真空后的玻璃微珠填充硅树脂分别按 50、100、300、500、700 r/min 搅拌速度进行搅拌, 结果见表 7。从表 7 中可以看出, 最佳混合速度为 300 r/min。

将静子组合件放入内环定位-灌注工装, 通过灌注设备将 H 型空心玻璃微珠填充硅树脂可磨耗层灌入并充满工装与零件内环间隙。通过玻璃微珠优选、灌注工艺优化后研制的玻璃微珠填充硅树脂复合材料硬度、粘接强度均满足航空发动机磨耗涂层应用要求。

表 7 混合速度参数及结果

Table 7 Mixing parameters and results

Mixing rate with silicon resin /(r · min ⁻¹)	Result
50	Very bad
100	Relatively bad
300	Well mixed
500	Partially cured
700	Partially cured

对空心玻璃微珠填充硅树脂表面进行扫描电镜分析(图 4)发现空心玻璃微珠在硅树脂中分布较为均匀, 未见团聚现象。

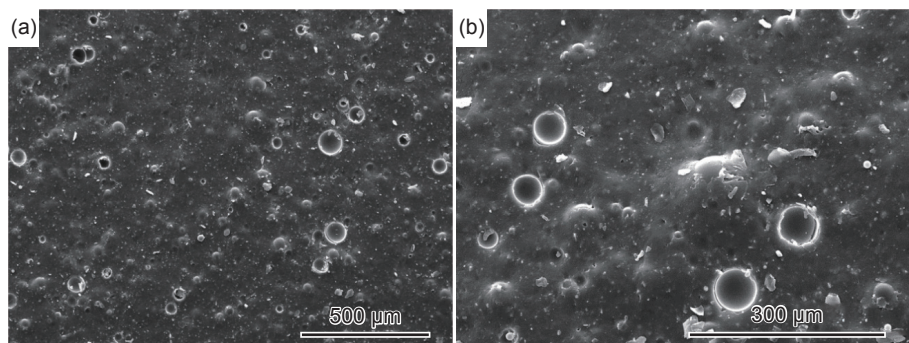


图 4 不同倍数空心玻璃微珠在硅树脂基体中的分散状态

Fig. 4 Different multiples dispersion state of hollow glass microspheres in silicone resin matrix

3 结论

(1) 实心玻璃微珠填充硅树脂可磨耗层难以获得光滑、平整的加工表面, 空心玻璃微珠填充硅树

脂可磨耗层则满足加工要求。

(2) 添加质量份数 11~13 份的 H 型空心玻璃微珠硅树脂可获得最佳的灌注工艺性及材料性能。

(3) 与实心玻璃微珠相比, 添加同质量空心玻

璃微珠的硅树脂可磨耗层更易磨;且与实心玻璃微珠同比例增大空心玻璃微珠含量,空心玻璃微珠填充硅树脂可磨耗层磨耗体积增加更大。

参考文献:

- [1] 李军,刘燕峰,倪洪江,等.航空发动机用树脂基复合材料应用进展与发展趋势[J].材料工程,2022,50(6):49-60.
LIU J, LIU Y F, NI H J, et al. Application progress and development trend of resin matrix composites for aero engine[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(6): 49-60.
- [2] 张俊红,鲁鑫,何振鹏,等.航空发动机可磨耗封严涂层技术研究及性能评价[J].材料工程,2016,44(4):94-109.
ZHANG J H, LU X, HE Z P, et al. Technique application and performance evaluation for abradable coating in aeroengine[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(4): 94-109.
- [3] MA S, XU K, HE J. Parametric effects of residual stress in pulsed d. c. plasma enhanced CVD TiN coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 142/143/144: 1023-1027.
- [4] 马绪强,苏正涛.民用航空发动机树脂基复合材料应用进展[J].材料工程,2020,48(10):48-59.
MA X Q, SU Z T. Application progress of polymer matrix composites in civil turbofan aeroengine[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(10): 48-59.
- [5] 王婧,王祥,梁利强,等.易磨耗硅橡胶的老化性能[J].合成橡胶工业,2018,41(2):111-114.
WANG J, WANG X, LIANG L Q, et al. Aging properties of abradable silicone rubber[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2018, 41(2): 111-114.
- [6] 韩云利,米康营,罗永明.基于硅树脂的封严涂层的制备及其性能研究[J].材料保护,2021,54(2):40-43.
HAN Y L, MI L Y, LUO Y M. Study on the preparation and properties of seal coatings based on the silicone resin[J]. Materials Protection, 2021, 54(2): 40-43.
- [7] 蓝敏杰,文庆珍,潘越,等.含氟树脂接枝玻璃微珠(HGB)的制备与表征[J].表面技术,2021,50(6):193-198.
LAN M J, WEN Q Z, PAN Y, et al. Preparation and characterization of fluorine resin grafted glass beads (HGB) [J]. Surface Technology, 2021, 50(6): 193-198.
- [8] 邹欣伟,张凤岷,姜凯,等.空心玻璃微珠造孔制备多孔莫来石陶瓷及其性能[J].材料工程,2023,51(3):123-130.
ZOU W X, ZHANG F D, JIANG K, et al. Porous mullite ceramics prepared by hollow glass microspheres and its properties[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(3): 123-130.
- [9] 王恒芝,张鹏,刘梅,等.空心玻璃微珠填充硅橡胶材料的性能研究[J].粘接,2013,34(7):44-46.
WANG H Z, ZHANG P, LIU M, et al. Study on the properties of hollow glass beads filled silicone rubber materials[J]. Adhesion, 2013, 34(7): 44-46.
- [10] 杨文才,岳英龙,郑乃涛.空心玻璃微珠对PVC复合材料保温性能的影响[J].塑料科技,2022,50(4):28-31.
YANG W C, YUE Y L, ZHENG N T. Effect of hollow glass beads on the thermal insulation properties of PVC composites[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(4): 28-31.
- [11] 赵雅超,高达利,茹越,等.玻璃微珠对取向加工PP复合材料结构与性能的影响[J].塑料工业,2021,49(4):81-86.
ZHAO Y C, GAO D L, RU Y, et al. The influence of hollow glass beads on the structure and properties of oriented PP composites[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(4): 81-86.
- [12] 王帮进.空心玻璃微珠增强聚丙烯材料的性能研究[J].合成材料老化与应用,2021,50(4):31-32.
WANG B J. Study on the properties of polypropylene materials reinforced with hollow glass beads[J]. Journal Synthetic Materials Aging and Application, 2021, 50(4): 31-32.
- [13] 柳雷,王冰星,彭丽芬,等.PBT/空心玻璃微珠复合材料的性能研究[J].现代塑料加工应用,2021,33(1):23-25.
LIU L, WANG B X, PENG L F, et al. Study on the properties of PBT/hollow glass beads composites[J]. Modern Plastic Processing Applications, 2021, 33(1): 23-25.
- [14] 田华安,肖玉龙.丁腈橡胶/空心玻璃微珠耐油隔热复合材料研制[J].橡塑资源利用,2019,2:7-11.
TIAN H A, XIAO Y L. Development of oil-resistant and heat-insulating composites of nitrile rubber/hollow glass beads[J]. Rubber & Plastics Resources Utilization, 2019, 2: 7-11.
- [15] 李瑶,陆瑜翀,蔡耀武,等.空心玻璃微珠在有机硅密封胶中的应用研究[J].有机硅材料,2023,37(1):30-37.
LI Y, LU Y C, CAI Y W, et al. Research on the application of hollow glass beads in silicone sealants[J]. Silicone Material, 2023, 37(1): 30-37.
- [16] 杨智勇,侯鹏,蒋文革,等.航空发动机复合材料声衬声学模型构建及吸声性能仿真[J].航空材料学报,2023,43(5):84-96.
YANG Z Y, JIANG P, JIANG W G, et al. Construction of acoustic model and simulation of sound absorption of aero-engine composite acoustic liner[J]. Journal of Aeronautical Material, 2023, 43(5): 84-96.
- [17] 倪洪江,邢宇,戴霄翔,等.航空发动机用聚酰亚胺树脂基复合材料固化工艺及热稳定性能[J].材料工程,2022,50(7):102-109.
NI H J, XING Y, DAI X X, et al. Curing process and thermal stability of polyimide matrix composite for aero-engines[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(7): 102-109.

收稿日期:2023-04-24;修订日期:2024-03-29

通讯作者:蒲胜利(1981—),男,正高级工程师,研究方向为非金属材料研究及工程应用,联系地址:陕西省西安市未央区中国航发动力股份有限公司(710021),E-mail:1113493245@qq.com

(责任编辑:高磊)