

不同发泡助剂发泡加成型液体硅胶的性能研究

张杰，张弘，常师闻

(沈阳宝顺安安全设备有限公司，辽宁 沈阳 110000)

摘要：分别以物理发泡助剂、发泡助剂碳酸氢钠和空心玻璃微珠发泡加成型液体硅胶制得发泡硅胶。本文研究了三种发泡助剂及不同用量对发泡效果的影响，对制备成功的发泡硅胶进行了结构和性能的表征和测试。研究结果表明：使用物理发泡剂制得的发泡硅胶发泡效果更好，可制得中发泡泡沫材料；拉伸强度和伸长率随着发泡硅胶密度的增加而提升；成型时的压力对发泡效果影响较大，压力减小，发泡倍率增加。

关键词：加成型液体硅胶；发泡助剂；发泡硅胶；发泡倍率；拉伸强度

中图分类号：TQ330.387

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2025)12-0048-05

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.12.010

发泡硅胶是以硅胶材料为基体，基体内部具有大量气泡的多孔材料。具有质轻、隔声、隔热、能吸收冲击载荷、密封、减震等性能，广泛用于国防、航空航天、交通运输、电子工业、农业及日用品领域^[1]。

目前，硅胶发泡材料的成型技术主要有溶剂成型、化学发泡成型、混合发泡成型及物理发泡成型四种。硅胶发泡材料的基体可选用高摩尔质量的固体硅胶，也可以选用液体硅胶。目前液体法制备有机硅发泡材料主要有室温硫化硅胶发泡材料，气体来源主要来自内发泡剂，如 Si—OH 或 R—OH 与 Si—H 反应产生 H₂ 促使体系内发泡。谭宇等人^[2]综述了近年来室温硫化硅胶发泡材料的研究进展，其中的室温硫化硅胶发泡材料通常采用缩合脱氢反应。苏俊杰等人^[3]采用去离子水与含氢硅油在铂催化条件下反应生成气体，用乙烯基硅油制备发泡硅胶。关于液体硅胶加发泡助剂进行发泡的相关报道较少。

本文以加成型液体硅胶为基体，选用不同发泡助剂，使用模压成型工艺，获得发泡硅胶。通过测定发泡效果、力学性能和形貌等来确定合适的发泡剂。

1 实验部分

1.1 实验原料

加成型液体硅胶为双组分形式，主剂和交联剂等分成 A、B 组分，A、B 组分以 1:1 混合供料，且两个组分具有基本相同的黏度和密度，催化剂为铂系催

化剂。所选的加成型液体硅胶的性能指标见表 1。

表 1 加成型液体硅胶的性能

黏度 / (Pa·s)	相对密度 (25 °C) / (g·cm ⁻³)	硬度 / (ShoreA)	拉伸强度 / MPa
3 500	1.09	50	10.0

含有 N、P、S 的有机化合物能使铂催化剂中毒，导致硫化不良，抑制反应发生。故发泡助剂选择无上述元素的发泡剂，现选用三种发泡助剂，具体如下：

(1) 一种物理发泡剂：为核壳结构，外壳为热塑性丙烯酸树脂类聚合物，内核为烷烃类气体组成的球状塑料颗粒。直径约为 25~45 μm，加热后体积迅速膨胀增大到自身的几十倍，从而达到发泡的效果。微球发泡耐温达 180°。填加量一般为 1%~5%。

(2) 碳酸氢钠：选用经过表面处理的碳酸氢钠，可改善发泡效果。

(3) 空心玻璃微珠：空心玻璃微珠是一种微米级的表面光滑的中空玻璃微球，主要化学成分为碱石灰硼硅酸盐玻璃，显微镜下观察为空心透明圆球体。空心玻璃微珠具有低密度、高强度、低导热、电绝缘、耐高温、耐酸碱等多种性能，具有良好的流动性和化学稳定性。此款空心玻璃微珠的性能指标见表 2，填加量一般为 5%~8%。

作者简介：张杰 (1980-)，女，高级工程师，本科，主要从事材料方面研究工作。

表 2 空心玻璃微珠的性能指标

序号	检测内容	单位	控制指标	检测结果
1	外观颜色	—	白色	白色
2	潮湿度	%	≤ 0.50	0.2
3	漂浮率	%	≥ 95	98
4	堆积密度	g/cm^3	$0.19\sim 0.22$	0.2
5	粒径	μm	$D_{90} \leq 65$	63.86
6	真实密度	g/cm^3	$0.37\sim 0.39$	0.386 5
7	抗压强度(破碎率)	%	5 500psi	合格

1.2 试样制备

将物理发泡助剂按照表 3 之填加比例加入到加成型液体硅胶中混合均匀。用平板硫化机压片得到发泡材料，工艺参数见表 3。成型后的试片用裁刀裁切成标准试样。

表 3 使用物理发泡助剂的实验配方和工艺参数

编号	填加比例	工艺温度 / °C	固化时间 / min	成型压力 / MPa
W ₁	1%	120	10	15
W ₂	1%	120	10	无
W ₃	2%	120	10	15
W ₄	2%	120	10	无
W ₅	4%	120	10	15
W ₆	4%	120	10	无

将表面处理过的发泡助剂碳酸氢钠按照表 4 之填加比例加入到加成型液体硅胶中混合均匀。用平板硫化机压片得到发泡材料，工艺参数见表 4，固化时不加压。成型后的试片用裁刀裁切成标准试样。

表 4 使用发泡助剂碳酸氢钠的实验配方和工艺参数

编号	填加比例	工艺温度 / °C	固化时间 / min
T ₁	0.5%	130	10
T ₂	2%	130	10
T ₃	3%	130	10

将空心玻璃微珠按照表 5 之填加比例加入到加成型液体硅胶中混合均匀。用平板硫化机压片得到发泡材料，工艺参数见表 5，固化时不加压。成型后的试片用裁刀裁切成标准试样。

表 5 使用空心玻璃微珠的实验配方和工艺参数

编号	填加比例	工艺温度 / °C	固化时间 / min
B1	5%	130	10
B2	6%	130	10
B3	8%	130	10

1.3 测试与表征

(1) 发泡材料密度和发泡倍率测试：将发泡好的硅胶裁成长方体，称量其质量，测量边长，计算体积，得到密度。再与未发泡的硅胶参数进行对比从而得到发泡倍率，发泡倍率按式 1 或式 2 计算。

$$\text{发泡倍率} = \text{发泡后体积} / \text{原始体积} \quad (1)$$

$$N = \rho_1 / \rho_2 \quad (2)$$

式中， N 为发泡倍率， ρ_1 为硅胶初始表观密度，

ρ_2 为发泡硅胶表观密度。

(2) 力学性能测试：将发泡硅胶裁切成标准哑铃状的拉伸样条，拉伸强度采用哑铃状试样^[4]，测试速度 100 mm/min，标距 25 mm，测试环境温度 23±2 °C，湿度为 50±5%。用拉力机测试样片的拉伸性能，拉力机符合 ISO5893 的规定，具有 2 级测力精度，试验机中使用的拉伸计的精度 I 型、2 型和 IA 型哑铃状试样和 A 型环形试样为 D 级；3 型和 4 型哑铃状试样和 B 型试样为 E 级。试验机至少能在 100 mm/min±10 mm/min, 200 mm/min±20 mm/min 和 500 mm/min±50 mm/min 移动速度下进行操作。

(3) 用电子显微镜观测发泡硅胶形貌：将发泡好的固体硅胶取截面，在显微镜下进行观测。

2 结果和讨论

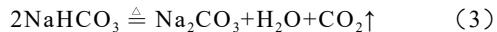
2.1 发泡材料密度和发泡倍率

2.1.1 填加物理发泡助剂的发泡硅胶的密度和发泡倍率

通过计算，得到加压和不加压状态下填加不同比例物理发泡助剂时制备的发泡硅胶的密度和发泡倍率。如图 1 所示。随着物理发泡助剂含量的增加，发泡硅胶的密度逐渐减小，发泡倍率逐渐增大。在不加压情况下物理发泡助剂的质量分数达到 2% 时发泡硅胶的密度为 0.4 g/cm³，发泡倍率为 2.73 倍；当质量分数达到 4% 时，发泡硅胶的密度为 0.27 g/cm³，发泡倍率为 4.04 倍，成为中发泡泡沫材料。发泡过程中压力对发泡密度和发泡倍率影响较大。不加压制得的发泡硅胶密度小于加压制得的发泡硅胶密度，不加压制得的发泡硅胶的发泡倍率大于加压制得的发泡硅胶的发泡倍率，即减小压力能够得到更好的发泡材料。

2.1.2 填加发泡助剂碳酸氢钠的发泡硅胶的密度和发泡倍率

碳酸氢钠为吸热型发泡剂，吸热分解，分解温度为 60~150 °C，产生气体为 CO₂ 和 H₂O，受热分解化学方程式见式 3。



发泡助剂碳酸氢钠的质量分数对发泡硅胶密度及发泡倍率的影响见图 2，由图 2 可见，随着发泡助剂碳酸氢钠的填加比例的增加，发泡硅胶的密度减小，发泡倍率提高。填加 2% 的碳酸氢钠时发泡硅胶的密度为 0.67 g/cm³，填加 3% 的碳酸氢钠时发泡硅胶的密度为 0.66 g/cm³。填加 3% 和 2% 的碳酸氢钠发泡

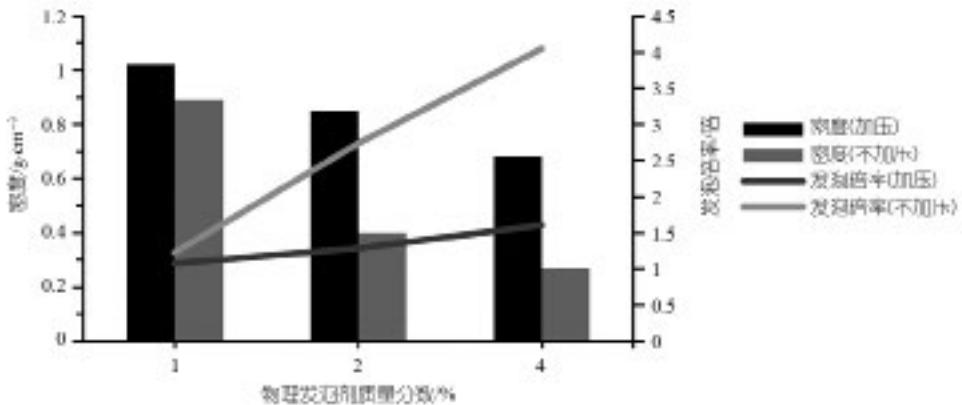


图 1 不同成型压力时物理发泡剂质量分数对发泡硅胶密度和发泡倍率的影响

效果差别不大，发泡效果有限。

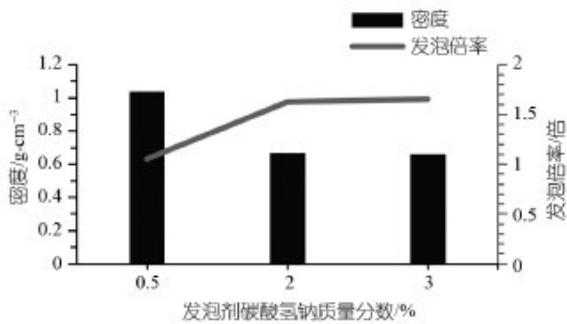


图 2 发泡剂碳酸氢钠质量分数对发泡硅胶密度及发泡倍率的影响

2.1.3 填加空心玻璃微珠的发泡硅胶的密度和发泡倍率

空心玻璃微珠的质量分数对发泡硅胶密度及发泡倍率的影响见图 3，由图 3 可见，随着空心玻璃微珠填加比例的增加，发泡硅胶的密度减小。当空心玻璃微珠的质量分数为 8% 时，发泡硅胶的密度为 0.83 g/cm^3 ，发泡倍率为 1.31 倍。空心玻璃微珠为空心透明圆球体，在发泡硅胶中主要起到填充作用。

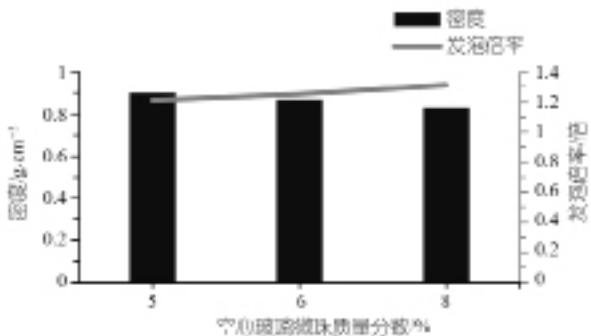


图 3 空心玻璃微珠质量分数对发泡硅胶密度及发泡倍率的影响

综上，随着发泡助剂填加量的增加，发泡硅胶的密度减小，发泡倍率增大。填加物理发泡助剂的硅胶发泡效果更好，在不加压情况下物理发泡助剂的填加比例为 2% 时发泡硅胶的密度为 0.4 g/cm^3 ，添加比例达到 4% 时发泡硅胶的密度为 0.27 g/cm^3 ；发泡助剂碳酸氢钠填加比例为 2% 和 3% 时，发泡硅胶的密度变化不大；使用空心玻璃微珠，填加比例由 5% 增加到 8% 时，密度和发泡倍率变化缓慢。

2.2 力学性能

2.2.1 拉伸强度

在不加压条件下，使用物理发泡助剂、发泡助剂碳酸氢钠和空心玻璃微珠得到的发泡硅胶的拉伸强度如图 4 所示。随着发泡助剂填加量的增加，拉伸强度减小；随着发泡硅胶密度的增加，拉伸强度增大。使用物理发泡助剂不加压固化成型时，填加量为 2% 时，发泡硅胶的拉伸强度为 0.7 MPa ，此时密度为 0.4 g/cm^3 。邵水源等人^[5]以甲基乙烯基硅胶为基体，加入表面改性后的气相法白炭黑及其他助剂制得的发泡硅胶拉伸强度为 0.697 MPa ，表观密度为 0.553 g/cm^3 ，两者相比，填加 2% 物理发泡助剂的发泡硅胶拉伸强度更大，密度更小。使用碳酸氢钠发泡硅胶时，填加 3% 和填加 2% 碳酸氢钠的发泡硅胶的拉伸强度和伸长率变化不大。使用空心玻璃微珠时，发泡硅胶的拉伸强度和伸长率随着填加量的增加而减小，变化缓慢。此三种发泡助剂，要得到相同拉伸强度的发泡硅胶，物理发泡助剂的用量更小。

2.2.2 伸长率

使用物理发泡助剂、发泡助剂碳酸氢钠和空心玻璃微珠得到的发泡硅胶的伸长率如图 5 所示。随着填

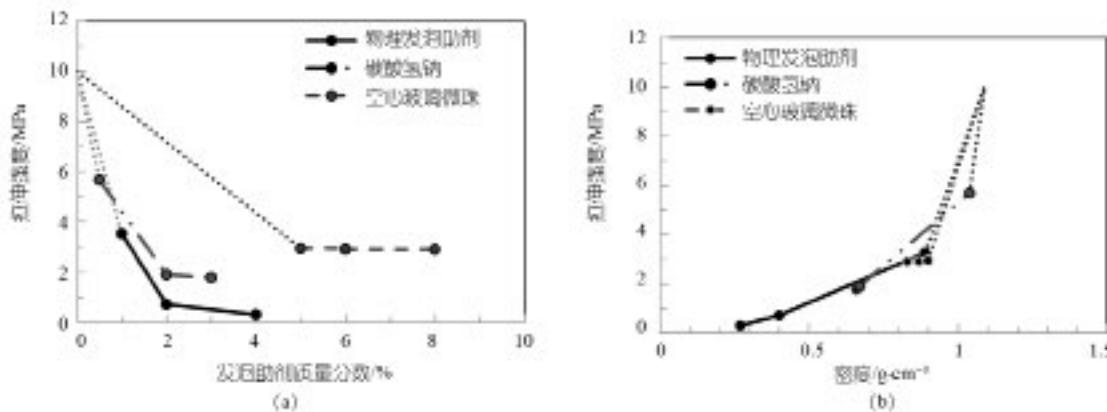


图 4 填加不同发泡助剂的发泡硅胶的拉伸强度与发泡助剂质量分数 (a) 和密度 (b) 的关系

加量的增加,伸长率减小;随着发泡硅胶密度的增加,伸长率增大。填加物理发泡剂时随着填加比例的变

化伸长率变化更明显,伸长率变化趋势与密度变化趋势相同。

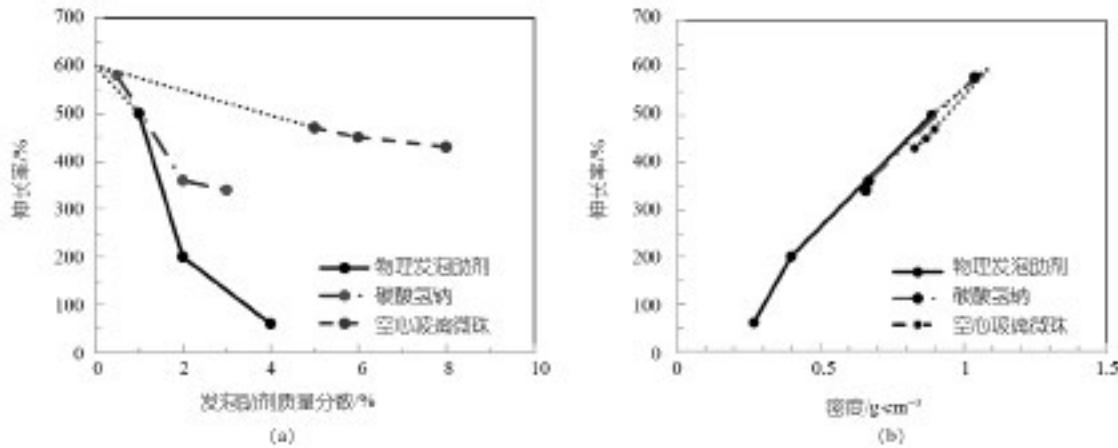


图 5 填加不同发泡助剂的发泡硅胶的伸长率与发泡助剂质量分数 (a) 和密度 (b) 的关系

2.3 发泡硅胶的形貌

结合三种发泡助剂用量与发泡效果的关系,三种发泡助剂分别选取物理发泡剂填加比例为 4% (编号为 W_6),发泡助剂碳酸氢钠填加比例为 3% (编号为 T_3)和空心玻璃微珠填加比例为 8% (编号为 B_3)的发泡硅胶试样,通过电子显微镜观察泡孔结构,如图 6 所示。填加物理发泡剂的发泡硅胶孔径较为均匀,平均孔径为 100 μm 左右。填加碳酸氢钠发泡助剂的发泡硅胶孔径均匀性较差,部分孔径高达 1.6 mm,气孔间距大,发泡助剂碳酸氢钠在聚合物中分散性差;填加空心玻璃微珠的发泡硅胶,泡孔最小,孔径在 40~65 μm 之间。

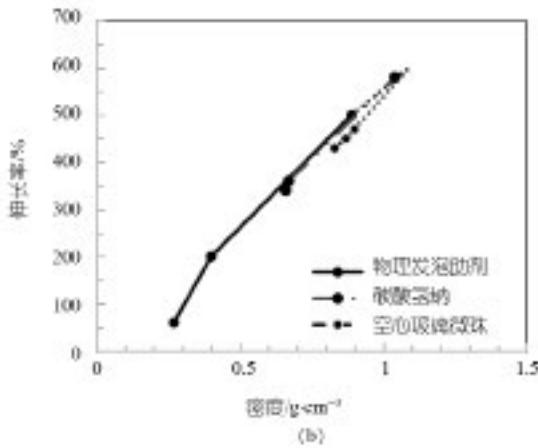


图 6 W_6 试样、 T_3 试样和 B_3 试样的电子显微镜照片

心玻璃微珠的发泡效果。使用发泡助剂碳酸氢钠和空心玻璃微珠只能制备低发泡泡沫材料,使用物理发泡助剂可制得中发泡泡沫材料。

(2) 在发泡成型过程中,压力会影响发泡效果。压力越小,发泡效果越好,发泡倍率越大。

(3) 使用上述三种发泡助剂发泡液体硅胶时,发泡硅胶的拉伸强度和伸长率变化趋势相同,且它们的变化趋势与密度的变化趋势相同,即发泡硅胶的密度越小,拉伸强度和伸长率越小。

(4) 使用上述三种发泡助剂发泡液体硅胶时,填

3 结论

(1) 以加成型液体硅胶为基体进行发泡时,使用物理发泡助剂的发泡效果优于发泡助剂碳酸氢钠和空

加物理发泡剂的用量更小，发泡硅胶的孔径更均匀。填加 2% 物理发泡助剂在不加压条件下固化成型，可制得密度为 0.4 g/cm^3 ，拉伸强度为 0.7 MPa ，平均孔径约为 $100 \mu\text{m}$ 的发泡硅胶。

参考文献：

- [1] 赵陈超, 章基凯. 硅橡胶及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.8 : 168–170.

- [2] 谭宇, 王三孟, 黄光, 等. 室温硫化硅橡胶发泡材料研究进展 [J]. 特种橡胶制品, 2020, 41(02):64–68.
- [3] 苏俊杰, 李苗, 曾幸荣, 等. 乙烯基硅油对水作羟基供体制备发泡硅橡胶的影响机理分析 [J]. 橡胶科技, 2020, 18(11):619–622.
- [4] 任黎, 陈婷, 马亚南, 等. 材料拉伸性能测试试样形状与评判方法 [J]. 化学推进剂与高分子材料, 2013, 11(02):33–36.
- [5] 邵水源, 鲁杰, 杜珣涛. 气相法白炭黑表面改性及对发泡硅橡胶的性能影响 [J]. 化工新型材料, 2018, 46(02):238–241.

Study on the properties of liquid silicone rubber with different foaming agents during the foaming and addition molding process

Zhang Jie, Zhang Hong, Chang Shiwen

(Shenyang Baoshun'an Safety Equipment Co. LTD., Shenyang, Liaoning 110000)

Abstract: The addition-type liquid silicone rubber was foamed using physical foaming agents, sodium bicarbonate as a foaming aid, and hollow glass microspheres, respectively, to obtain foamed silicone rubber. This paper deeply investigated the effects of three foaming aids and their different dosages on the foaming effect, and conducted characterization and testing of the structure and properties of the successfully prepared foamed silicone rubber. The research results showed that the foaming effect of the foamed silicone rubber prepared using physical foaming agents was more ideal, and medium-foaming foam materials could be prepared; the tensile strength and elongation increased with the increase in the density of the foamed silicone rubber; the pressure during molding has a significant impact on the foaming effect, and the foaming ratio increased as the pressure decreased.

Key words: addition-type liquid silicone rubber; foaming agent; foamed silicone rubber; foaming ratio; tensile strength

(R-03)

米其林沈阳工厂第 1 亿条轮胎下线仪式举行，见证高质量发展新里程

The 100 millionth tire of the Michelin factory in Shenyang was rolled off the production line, marking a new milestone in high-quality development

11 月 4 日，第 1 亿条乘用车轮胎下线仪式在米其林沈阳工厂举行，标志着这座米其林在华首家工厂实现发展新跨越。此次下线的轮胎为米其林浩悦 5E 系列产品，兼具节能、安全、静音等全面优势，代表了米其林在高性能轮胎领域的持续创新。这一里程碑成果，既是沈阳工厂深耕中国制造 30 年的初心见证，也彰显了其作为米其林全球最大、最先进高端轮胎制造基地的领先实力。

自 2013 年全新沈阳工厂投产以来，工厂不断精进产品布局，主力产品从 15" 拓展至 19" 以上，逐步覆盖多元品类；客户版图从替换市场延伸至高端原配，从服务全球车企到深度赋能中国新能源汽车产业。同时，工厂柔性制造能力持续提升，产品规格数量提升 5 倍，最小订单量从 3 000 条降至 100 条，紧急订单响应时间缩短至 1 天，更高效满足市场与客户需求。

面向未来，沈阳工厂将继续以创新驱动高端制造、以客户价值引领转型、以本土深耕支撑发展，打造员工成长与价值绽放的“幸福家园”、卓越制造与客户信赖的“品质标杆”、绿色可持续与行业引领的“生态先锋”、数字化转型与科技赋能的“未来实验室”。

摘编自“中国轮胎商务网”

(R-03)