

正交试验法优化硅橡胶抗拉强度与挤出性

罗炜盈¹, 陈炳耀^{1,2,3}, 曹志运¹, 陈亮¹, 何晓军¹, 刘育斌¹

(1. 广东三和控股有限公司, 广东 中山 528429;

2. 三和精化(广东)科技有限公司, 广东 中山 528441;

3. 广东顺德三和化工科技有限公司, 广东 佛山 528325)

摘要: 采用正交实验的方法, 研究了 107 胶、纳米碳酸钙、硅油进行三因素对抗拉强度与挤出性的影响。实验结果表明, 对于抗拉强度和挤出性, 优配方为 107 胶含量 40%, 纳米碳酸钙含量为 60%, 硅油含量为 3%。此时抗拉强度可达到 2.63 MPa, 挤出性可达 68.2 mL/min。通过分析可知, 在这三个因素中, 硅油的含量对抗拉强度的影响程度最大, 达到了 40.16%; 107 胶的含量对挤出性影响程度最大, 达到了 64.29%。该实验结果对硅橡胶的工业性生产具有一定的指导意义。

关键词: 正交实验; 硅橡胶; 拉伸强度; 挤出性

中图分类号: TQ330.7

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2026)03-0034-04

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2026.03.007

0 引言

正交实验法是一种基于正交表来科学安排多因素多水平实验的高效方法。它的核心优点在于能够以极具代表性的少量实验组合, 替代全面实验中庞大繁杂的测试量, 从而高效地揭示出不同影响因素的主次顺序以及最佳的产品配方或工艺参数组合^[1]。在硅酮胶的研发和生产领域, 正交实验法的应用是极为广泛和深入的, 硅酮胶的配方是一个典型的多因素系统, 其最终性能由基础聚合物(如 107 胶)、填料(如气相二氧化硅)、交联剂、催化剂、增塑剂(如硅油)、偶联剂等多种原料的种类、用量以及混合工艺参数共同决定^[2]。

硅橡胶因其耐高低温、电气绝缘、耐候、无毒及生理惰性优异特性, 被广泛应用于电子电器行业的按键与密封件、汽车领域的垫片与软管、医疗领域的导管与植入物、食品加工用具、建筑密封胶、航空航天密封材料、家用厨具以及新能源电池模组与光伏组件的封装与保护等^[3]。

不同领域使用硅橡胶的性能侧重点有所不同, 其中硅橡胶的抗拉强度和挤出性是实现工业化应用的核心性能指标。抗拉强度是衡量硅橡胶制品抵抗拉伸破坏能力的关键指标, 它直接决定了产品的耐用性、可靠性和使用寿命。一个具有优异抗拉强度的硅橡胶密封圈或垫片, 能够在承受机械应力、热胀冷缩或外部

冲击时保持结构完整, 不会轻易发生撕裂或永久变形, 从而确保其密封效果或结构支撑功能长期有效。与此同时, 挤出性则直接影响生产效率和最终产品的外观质量。良好的挤出性意味着胶料柔软适中, 出胶顺畅均匀, 不会出现断流、吐出不稳或表面粗糙等问题, 这使得无论是手工作业还是大规模自动化生产都能高效进行。本文通过调整其基料中的 107 胶含量、纳米钙粉填充量以及硅油的添加量改善硅橡胶的挤出性和拉伸强度^[4]。

传统的单因素实验需做大量的实验测试, 且难以平衡挤出性和抗拉强度的关系^[5]。本文针对硅橡胶的抗拉强度和挤出性的协同优化难题, 设计了 L₉(3³) 的正交实验。其中设置 107 胶、纳米钙粉填充量、硅油添加量为三因素, 每个因素设置了三个水平, 一共 9 组实验。通过极差法分析每个因素对抗拉强度和挤出性的影响程度^[6]。最终实现满足工业化应用的抗拉强度与其他因素的多重要求的最优配方。

1 实验部分

1.1 实验所用器材与试剂

1.1.1 实验试剂

本实验主要用到的试剂和供应商为: 20 000

作者简介: 罗炜盈(2003—), 女, 本科, 现主要从事有机硅产品研究和开发方面的工作。

mPa·s 107 胶, 湖北实兴化工有限公司; 纳米碳酸钙 (平均粒径 50~100 nm), 广西华纳新材料股份有限公司; 甲基三甲氧基硅烷, 湖北新蓝天新材料有限公司; 乙氧基三甲氧基硅烷, 湖北新蓝天新材料有限公司; KH550, 杭州硅宝新材料有限公司; 二月桂酸二丁基锡, 杭州硅宝新材料有限公司; 硅油 (350 mPa·s), 湖北隆胜四海新材料股份有限公司。

1.1.2 实验设备

本研究使用的实验设备型号和供应商为: 实验型动力混合机 (QF-5L), 佛山市金银河智能装备有限公司; 电子万能力学试验机 (LK-103B), 东莞市力控仪器科技有限公司; 电子分析天平 (PY-E62), 深圳市普云电子有限公司; 万能拉力机 (WDW-1), 上海松顿机械设备有限公司; 挤出性试验机, 自制。

1.2.3 实验设计

本实验通过正交实验设计研究 3 个因素对硅橡胶的拉伸强度的影响, 分别是 107 胶用量、纳米钙粉用量、350 mPa·s 硅油用量。为每个因素设计了三个水平 (表 1), $L_9(3^3)$ 正交实验^[6]。

表 1 正交实验因素水平设计

水平	107 胶 (A)/%	混合纳米钙 (B)/%	硅油 (C)/%
1	30	55	3
2	35	60	5
3	40	65	7

根据正交表设计 9 组正交实验, 如表 2。

表 2 正交实验设计表

实验编号	107 胶 (A)	混合纳米钙 (B)	硅油 (C)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

1.3 试样制备

将一定量的 107 胶、纳米碳酸钙和硅油投入实验型动力混合机室温搅拌 10 min, 然后升起搅拌桨进行刮粉。要注意将搅拌桨和缸壁上的钙粉均刮下。完成后继续搅拌, 并抽真空, 打开加热装置。待升温到 110 °C 后开始计时, 搅拌 3.5 h。达到搅拌时间后静置降温, 待温度回到室温后得到基料^[7-8]。

在实验型动力混合机中加入一定量的上述基料和色浆搅拌 5 min 后, 加入交联剂。打开真空泵抽真空

继续搅拌 20 min, 最后加入催化剂, 抽真空搅拌 20 min 后出料。将所得的胶浆装入 300 mL 胶瓶中备用^[8]。

1.4 测试方法

1.4.1 抗拉强度及断裂伸长率

按 GB/T528-2009 进行制样与养护, 采用双伺服万能材料试验机对试样进行逐一拉伸检测, 记录其拉伸过程所需力值和断裂伸长率^[9]。

1.4.2 挤出性

样品试验温度为 (23±3 °C), 基础孔直径为 4 mm, 压力设定为 0.3 MPa, 测量 10 s 挤出硅橡胶的体积, 测试 3 次求平均值^[11]。

1.4.3 表干时间

参照 GB/T13477.5—2017 标准, 在 (25±2) °C、(55±5)%RH 施胶环境下把胶液挤到干净锡箔纸上并计时, 用手指端部轻轻触碰胶条表面, 记录胶面不粘所用时间^[11]。

1.4.4 固化深度

采用硫化深度板在 (23±2) °C、相对湿度 (50±5)% 条件下测试样品 24 h 后硫化的最大深度^[11]。

2 实验结果和分析

2.1 测试结果分析

正交实验的测试结果如表 3 所示。

表 3 正交实验测试结果

实验编号	拉伸强度 /MPa	挤出性 / (mL·min ⁻¹)
1	2.65	25.4
2	2.50	35.2
3	2.30	52.6
4	2.62	61.2
5	2.51	66.4
6	2.62	56.8
7	2.60	78.6
8	2.63	68.2
9	2.59	61.4

表 4 是通过极差值计算每个因素对胶样的抗拉强度和稠度的影响权重。计算公式为^[10]：

$$\omega_i = \frac{R_i}{\sum_{j=1}^n R_j} \quad (1)$$

R_j — 是第 i 个指标的极差值。

抗拉强度较优且挤出性较好的要求下, 硅酮胶的最优配方是 A3B2C1。对抗拉强度来说, 与其他两个因素相比硅油的极差值 (R) 最大, 即硅油的添加量对抗拉强度的影响程度最大, 影响权重达到了 40.16%。根据表中的极差值可知, 对抗拉强度来说三个因素的影响程度排序为: 硅油 > 107 胶 > 混合纳米钙。同样

表4 正交实验数据分析

	107胶 (A)	混合纳米钙 (B)	硅油 (C)
		抗拉强度	
k1	2.48	2.62	2.63
k2	2.58	2.55	2.57
k3	2.61	2.50	2.47
r	0.12	0.12	0.16
		挤出性	
k1	37.73	55.07	50.14
k2	61.46	56.59	52.60
k3	69.40	56.94	65.85
r	31.67	1.87	15.72
		ω_i	
抗拉强度	30.33%	29.51%	40.16%
挤出性	64.29%	3.80%	31.91%

的根据挤出性的极差值分析可知,三个因素的影响程度为107胶>硅油>混合纳米钙,其中107胶的影响权重最大,达到了64.29%。

根据以上的实验数据以及分析可知,硅油的含量对硅橡胶的拉伸强度有显著且负面的影响。其原因在于硅油作为体系中不参加反应的小分子物质,它会填充到高分子网络链的空隙中。硅油的存在一定程度上稀释了有效的分子聚合物,单位体积内的有效聚合分子链数量级减少,导致交联密度下降,分子网络进一步地变松散,抗拉强度也就变弱^[12]。但硅油分子本身是惰性的,它不参与形成氢键,也不会去竞争性地与二氧化硅表面的硅羟基结合。它的存在,在一定程度上增大了聚合物链之间的平均距离,轻微地削弱了分子间作用力(主要是范德华力),并对氢键网络的密度有微乎其微的稀释效应^[13]。这种稀释和润滑作用,确实会使得体系的整体黏度有所下降,表现为稠度的微量降低。但由于它没有触及决定稠度的根本——二氧化硅填气的氢键网络结构,因此这种降低效应是有限的、温和的^[13]。

107胶的含量对硅橡胶的挤出性有显著且正面的影响,在107胶的从30%上升到35%时,挤出性有明显的突跃。其原因可能是引入额外的107胶时,这些新加入的、两端带有活性硅羟基的长链分子,会竞争性地吸附到二氧化硅填料颗粒表面的活性位点上^[14]。这一行为相当于将原本由较少聚合物链紧密桥接的、强度较高的网络节点,稀释成了由更多聚合物链共享连接的、强度较弱的节点。整个填料-聚合物网络的整体连接强度和密度因此被显著削弱。从流变学的角度看,这个被稀释后的网络结构在受到剪切力(如挤压通过胶嘴)时,会更容易、更彻底地发生崩塌,从而导致胶料的表现黏度急剧下降,挤出因此变得省

力且顺畅^[15]。

2.2 市售对比

在实际施工过程中,硅橡胶不仅要考虑其拉伸强度和挤出性,其表干时间和24h固化深度也在应用过程中影响着施工进度^[15]。因此,为了验证本文配方的可行性,我们选取了市面上的两款硅酮密封胶 X_1 , X_2 进行测试,测试结果见表5。

表5 优配方与市售硅酮密封胶性能对比

	拉伸强度 /MPa	挤出性 / $(\text{mL}\cdot\text{min}^{-1})$	表干时间 /min	24h固化深度 /mm
X_1	2.00	31.46	15	3.2
X_2	2.52	56.90	20	3.0
优配方	2.63	68.20	10	3.5

从表5中的测试结果可以看出,与市售配方对比,本文的优配方性能优于市售配方,能更好地满足客户的要求。

3 实验结论

通过正交实验,确定了制备硅酮胶较优的配方为:107胶为40%,混合纳米钙为60%,硅油为3%。此时抗拉强度达到了2.63MPa,挤出性为68.2mL/min。此时的配方的抗拉强度,挤出性,表干时间,24h固化深度与市售的硅酮胶相比性能较优。

参考文献:

- [1] 高新来,胡亚飞,段亚冰,等.硅酮结构密封胶许用应力的发展演进与展望[C].2024科源奖学术论文集,2024:187-199.
- [2] 张创,安文杰,杨邴涵,等.基于正交优化的P(MMA-LMA-TMA)黏度指数改进剂的研制与性能评价[J].弹性体,2025,35(05):14-20.
- [3] 杨育其,陈炳耀,彭小琴,等.填料对硅酮胶性能的影响[J].化学与黏合,2021,43(06):488-490.
- [4] 张仕桦,刘京红,杨鸿骏,等.硅酮结构胶拉伸黏结强度的温度影响研究[J].中国建筑防水,2025,(09):15-20.
- [5] 王燕婷,李云峰,马德龙,等.端羟基聚二甲基硅氧烷黏度对

- 硅酮胶性能的影响研究 [J]. 粘接, 2025,52(08):43-46.
- [6] 肖建斌, 王伟, 杨庆华, 等. 用正交试验法研究硅橡胶的导电性能 [J]. 青岛化工学院学报 (自然科学版), 2002,(01):56-58.
- [7] 庞文武, 陈炳耀, 姚荣茂, 等. 单组分脱醇型硅橡胶的制备及其性能研究 [J]. 化学与黏合, 2022,44(04):359-361.
- [8] 陈炳耀, 吴健涛, 全文高, 等. 脱醇型 RTV-1 密封胶的制备及其粘接性能的研究 [J]. 化学与黏合, 2023,45(05):446-448+479.
- [9] 赵莉华, 李彦妹, 邱九皓, 等. 硅脂环境下硅橡胶的吸收特性及其关键电气性能研究 [J]. 电力工程技术, 2021,40(05):41-46.
- [10] 江巧良. 浅谈运用正交试验法解决环氧树脂注塑成形不佳的问题 [J]. 科技信息, 2010,(26):119+121.
- [11] 刘育斌, 陈炳耀, 陈复林, 等. 填料对硅橡胶抗撕裂性能的影响 [J]. 有机硅材料, 2025,39(1):79-82.
- [12] 张红岩, 詹学贵, 胡盛, 等. 高撕裂强度硅橡胶的研究进展 [J]. 有机硅材料, 2021,35(5):69-75.
- [13] 孙传东, 陈勇前, 徐小博, 等. 气相法二氧化硅对硅橡胶力学性能的影响 [J]. 有机硅材料, 2022,36(05):12-16+29.
- [14] 王燕婷, 李云峰, 马德龙, 等. 端羟基聚二甲基硅氧烷黏度对硅酮胶性能的影响研究 [J]. 粘接, 2025,52(08):43-46.
- [15] 潘聪, 陈炳耀, 彭小琴, 等. 107 胶的黏度对酸性硅酮胶的性能影响 [J]. 化学与黏合, 2021,43(05):399-401.

Optimization of tensile strength and extrudability of silicone rubber using orthogonal experimental method

Luo Weiyang¹, Chen Bingyao^{1,2,3}, Cao Zhiyun¹, Chen Liang¹, He Xiaojun¹, Liu Yubin¹

(1. Guangdong Sanhe Holding Co. LTD., Zhongshan 528429, Guangdong, China;

2. Sanhe Fine Chemical (Guangdong) Technology Co. LTD., Zhongshan 528441, Guangdong, China;

3. Guangdong Shunde Sanhe Chemical Technology Co. LTD., Foshan 528325, Guangdong, China)

Abstract: This paper uses the orthogonal experimental method to study the effects of three factors (107 glue, nano-calcium carbonate, silicone oil) on tensile strength and extrudability. Experimental results show the optimal formulation: 40% 107 glue, 60% nano-calcium carbonate, and 3% silicone oil. Under this formulation, tensile strength reaches 2.63 MPa and extrudability 68.2 mL/min. Analysis shows that silicone oil content has the greatest impact on tensile strength (40.16%), while 107 glue content has the largest effect on extrudability (64.29%). These results provide valuable guidance for silicone rubber industrial production.

Key words: orthogonal experiment; silicone rubber; tensile strength; extrudability

(R-03)

米其林任命新的首席财务官

Michelin appoints new Chief Financial Officer

轮胎巨头米其林宣布, Bénédicte de Bonnechose 女士将于 2026 年 6 月 1 日起被任命为米其林集团首席财务官, 她将接替 Yves Chapot 先生担任该职务。

Bénédicte de Bonnechose 自 2021 年 1 月 1 日起担任米其林执行委员会成员, 目前负责城市和长途交通业务以及欧洲地区的业务。她于 2019 年 4 月加入米其林集团, 担任集团副首席财务官。

此前, Bénédicte de Bonnechose 曾在德勤 (Deloitte) 会计师事务所从事工业和零售行业的审计工作 4 年, 之后在拉法基集团 (Lafarge Group) 担任财务职务超过 25 年, 并于 2007 年开始在水泥、骨料和混凝土部门担任业务和运营领导职务。2015~2018 年, 她担任拉法基豪瑞 (LafargeHolcim) 法国和比利时总裁。

摘编自“橡胶快递”

(R-03)