第 52 卷 第 4 期：1838-1847 高电压技术 Vol.52, No.4: 1838-1847
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251321

35 kV 混合瓷支柱绝缘子注射工艺多参量协同优化

周日文[1,2]，吴　强[1,2]，蒋云萱[3]，黄星宇[1,2]，冒珏岑[1,2]，王　羽[1,2]
（1.电网环境保护全国重点实验室，武汉 430074；2.武汉大学电气与自动化学院，武汉 430072；
3. 国网湖南省电力公司长沙供电公司，长沙 410000）

摘　要：混合瓷支柱绝缘子由于结构多伞、纵深高，相比线路绝缘子表面硅橡胶注射更为困难。为获取混合瓷支柱绝缘子的最佳注射工艺，实测获取了改良后硅橡胶的固化特性与流变特性，并基于此建立了 35 kV 混合瓷支柱绝缘子表面硅橡胶注射过程仿真模型。测试结果表明：改良后硅橡胶焦烧时间增长、流动性得到提升，更适合混合瓷支柱绝缘子的注胶过程。通过正交试验设计仿真获取了模具温度、胶体温度、注射速度、保压压力和保压时间协同优化注射过程锁模力和体积收缩率的最佳组合，结果表明：模具温度为 140 ℃、胶体温度为 55 ℃、注射速度为 30 mL/s、保压时间为 10 s 和保压压力为 110%注射压力时，可获得最佳注射工艺，此时，最大锁模力和体积收缩率分别为 178.9 kN 和 1.205%。该研究结果可为混合瓷支柱绝缘子注射工艺提供指导。
关键词：混合瓷支柱绝缘子；固化特性；流变特性；注射工艺优化；正交试验

Multi-parameter Coordinated Optimization of the Injection Process for 35 kV Hybrid Porcelain Post Insulators

ZHOU Riwen[1,2], WU Qiang[1,2], JIANG Yunxuan[3], HUANG Xingyu[1,2], MAO Juecen[1,2], WANG Yu[1,2]
(1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan 430074, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. Changsha Power Supply Company, State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410000, China)

Abstract: Due to the multi-umbrella structure and high depth of hybrid porcelain post insulators, the surface silicone rubber injection is more difficult compared to that of line insulators. To obtain the optimal injection process for 35 kV hybrid porcelain post insulators, the curing and rheological properties of the improved silicone rubber were measured experimentally, and a simulation model of the silicone rubber injection process on the surface of the insulator was established on the basis of these properties. The test results show that the improved silicone rubber has a longer scorch time and better fluidity, making it more suitable for the injection process of hybrid porcelain post insulators. Through orthogonal experimental design simulation, the optimal combination of mold temperature, rubber temperature, injection speed, holding pressure and holding time for minimizing the clamping force and volume shrinkage rate during the injection process was obtained. The results show that the best injection process can be achieved when the mold temperature is 140 ℃, the rubber temperature is 55 ℃, the injection speed is 30 mL/s, the holding time is 10 s, and the holding pressure is 110% of the injection pressure; meanwhile, the maximum clamping force and volume shrinkage rate are 178.9 kN and 1.205%, respectively. The research results can provide guidance for the injection process of hybrid porcelain post insulators.
Key words: hybrid porcelain post insulators; curing characteristics; rheological characteristics; injection process optimization; orthogonal experiments

0　引言

随着我国经济的快速发展，电力系统规模不断扩大，人们对电力能源的需求日益增长。然而，在电力输送过程中，输电线路需要穿越各种复杂地形，输电线路和变电站经常受到雨雪、冰冻、雷电等极端天气条件的影响。在这种复杂环境下，变电站的绝缘子绝缘性能面临严峻挑战[1-3]。站用室外支柱绝缘子的耐污闪特性是电网安全运行的重要考量因素。有统计数据显示，在东北、华北和河南电网的变电站中，支柱瓷绝缘子因污闪引发的事故占污闪事故总数的 78%[4]。目前普遍采用的室温硫化硅橡胶(room temperature vulcanized silicone rubber，RTV)涂料虽能提升瓷绝缘子防污闪性能，但在紫外线、

酸雨等恶劣环境作用下，RTV 涂料会出现粉化、龟裂、脱落等老化现象，使用寿命短，需定期补涂[5]。而复合支柱绝缘子机械性能较差，护套-芯棒界面出现缺陷导致界面失效严重时将会出现绝缘子内绝缘击穿，断裂等严重事故[6-8]。

为解决上述问题，新研发由完整瓷支柱绝缘件与高温硫化硅橡胶(high temperature vulcanized silicone rubber，HTV)一次注射成型得到的混合瓷支柱绝缘子兼顾瓷的高机械强度与硅橡胶的防污闪性能，展现出良好的应用前景。注射环节对于混合瓷支柱绝缘子的产品质量至关重要。

现有关于绝缘子硅橡胶注射成型的研究主要集中于复合绝缘子，其是将硅橡胶注射在圆柱形芯棒上而成，无法直接运用到内伞形柱外包覆硅橡胶的混合瓷支柱绝缘子上。梁曦东也指出电站绝缘子因尺寸较大，对伞裙注射材料及成型工艺的要求更为苛刻，制造难度要高于线路绝缘子[9]。混合瓷支柱绝缘子由于其结构多伞、纵深高，注射路径多弯曲且曲率半径小，使得注射成型工艺面临新的技术挑战。混合瓷支柱绝缘子注射成型工艺中各因素对注射的影响规律不清并且缺乏注射工艺参数建议指标，是目前亟须解决的问题。

温度、压力和时间是注射成型中三大工艺因素，直接影响制品的质量[10]。而锁模力在一定程度上反映了模具的稳定性、充模的均匀性和橡胶件的破损情况，体积收缩率表示制品在成型过程中与原始设计的偏差值，通常以这 2 个参数表征注射工艺的优劣。锁模力在满足胶体成型的前提下，数值应尽量小，以避免瓷件破裂与影响设备寿命；体积收缩率越小，最终成品与设计时偏差越小。Bont 等综述了液态硅橡胶注塑成型的工艺变量与建模，发现当模型考虑多参量的协同作用时模型准确度更高[11]。张雨晴等采用 n 级反应模型和自催化(m，n)模型研究了固化反应的动力学方程，并通过外推法优化了固化工艺[12]。研究发现，n 级反应模型的计算结果与试验值存在较大偏差，而自催化(m，n)模型的计算曲线则与试验值较相符。式(1)对此的描述也是常量，没有提到变量，是描述反应行为的参数，需要通过实测得到热流数据进行拟合得到。文献[13-15]均利用 Moldflow 进行模流分析，并通过正交试验优化注塑工艺参数，得到最佳注射方案，有效提升产品质量。Kruse 等通过仿真分析液态硅橡胶和硅基材料在注射成型过程中的行为特性，并探讨了如何通过优化模具设计、工艺参数和材料性能减少实际开发中的试错成本和时间[16]。贺晓辉等通过有限元仿真优化注射浇口参数并进行试制，最终实际产品与仿真结果偏差不超过 3%，证明了有限元分析的有效性[17]。数值模拟计算已经广泛用于流体的流动及成型[18-20]，流体的流变模型建立和边界条件的设定是模拟准确性的关键之一。硅橡胶的固化特性和流变特性均会对最终的包覆效果产生影响[21]。混合瓷支柱绝缘子注射成型采用的 HTV 是专门配方改良过的硅橡胶，其固化特性和流变特性尚不明晰。

本文首先通过差示扫描量热(differential scanning calorimetry，DSC)与流变仪测试 HTV 固化特性与流变特性得到其固化行为模型与黏度模型参数，再以此为基础对 35 kV 混合瓷支柱绝缘子注射成型过程进行仿真，通过正交试验得到混合瓷支柱绝缘子注射中模具温度、胶体温度、注射速度、保压压力和保压时间的最佳工艺组合，以优化其锁模力与体积收缩率。研究结果对混合瓷支柱绝缘子制造中的注射与优化具有指导意义。

1　硅橡胶配方优化

混合瓷支柱绝缘子硅橡胶样品采用 110 型甲基乙烯基硅橡胶(methyl vinyl silicone rubber，MVQ)，其主链为硅氧烷(—Si—O—)，侧链为甲基(—CH_3)和乙烯基(—CH_2═CH)，其中乙烯基质量分数为 7%~24%，混炼工艺从一段式工艺调整为生产基胶铝胶再拼胶的工艺，使甲基乙烯基硅橡胶基体和粉体填料之间的混炼更加均匀。并采用 2 种中位粒径不同的填料氢氧化铝进行颗粒级配，使胶料的孔隙率更小，吸水率更低。为了适应混合瓷支柱绝缘子注射流道特点，在高温固态混炼硅橡胶配方中增加硅油配合剂的添加量，从而降低胶料的门尼黏度，提高胶料的流动性和充模性；同时去除配方中的硫化促进剂材料，从而延长胶料的焦烧时间，使胶料在充模完成前能够一直保持良好的流动性。在高温固态混炼硅橡胶配方中已添加了内脱模剂的基础上，增加了少量的液体石蜡作为外脱模剂，从而提高胶料的脱模性。具体配方优化情况见表 1。

将配方优化后的样品记作硅橡胶 A，未改进样品记作硅橡胶 B，测试其硫化曲线得到硫化工艺参数如表 2 所示。

在 120、13、140、150 ℃时，硅橡胶 A 相较于硅橡胶 B 的硫化时间分别增加 42.12%、23.10%、

表 1 配方优化情况

Table 1 Optimization of the formula

配方	原始硅橡胶质量分数/%	改进硅橡胶质量分数/%	配方优化
羟基硅油	1	2	质量分数增加 1%
含氢硅油	1	0	质量分数降低 1%
液体石蜡	0	0.5	质量分数增加 0.5%

表 2 硅橡胶硫化工艺参数

Table 2 Silicone rubber vulcanization process parameters

测试温度/℃	硫化时间/min		焦烧时间/min	
	硅橡胶 A	硅橡胶 B	硅橡胶 A	硅橡胶 B
120	13.83	9.73	8.03	6.03
130	5.95	4.83	5.18	3.47
140	3	2.22	2.63	1.95
150	1.6	1.2	1.43	1.03

35.34%、33.33%，焦烧时间分别增加 33.17%、43.02%、34.87%、38.83%，配方优化后的硅橡胶硫化时间与焦烧时间延长能够防止胶料在硫化过程中发生焦烧，保证了胶料的流动性，有利于瓷支柱表面的 HTV 注射与提升产品质量。

2 硅橡胶注射过程固化特性测试

2.1 固化特性机理

MVQ 固化主要过程是在特定的温度下，硫化剂 1,1-二叔丁基过氧化-3,3,5-三甲基环己烷(TMCH)受热 O—O 键断裂，生成的叔丁氧基自由基((CH₃)₃CO•)与 MVQ 长链中的 C═C 反应生成大分子自由基，大分子自由基交联形成三维网状结构，其主要过程如图 1 所示。

采用 Kamal 模型[22]描述硅橡胶固化行为，并通过差示扫描量热法的试验数据来确定模型参数，即：

$$\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t}=\left(K_1+K_2\alpha^m\right)(1-\alpha)^n \tag{1}$$

式中：α 为固化度，取值范围为 0~1，见式(2)；t 为时间，s；K_1、K_2 为速率常数，如式(3)、(4)所示；m、n 为常量。

$$\alpha(t)=\frac{1}{\Delta H}\int_0^t\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t \tag{2}$$

$$K_1=A_1\exp\left(-\frac{E_1}{T}\right) \tag{3}$$

$$K_2=A_2\exp\left(-\frac{E_2}{T}\right) \tag{4}$$

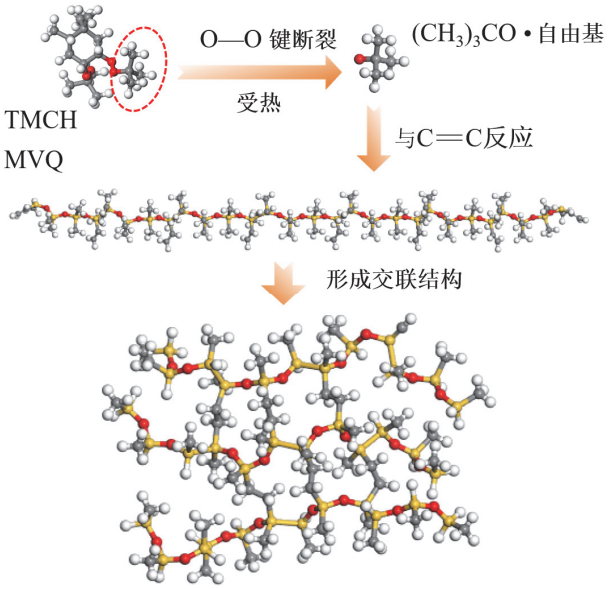


图 1 MVQ 固化过程示意图

Fig.1 Diagram of the MVQ curing process

式中：T 为温度，K；A_1、A_2、E_1 和 E_2 均为常量；ΔH 为总反应热，J/g。

2.2 固化特性测试

2.2.1 等温 DSC 测试

固化工艺常在等温状态下进行，等温固化过程更加符合实际注射成型工艺。通过等温 DSC 测试曲线可以拟合得到 Kamal 模型参数。

测量仪器选用日本 HITACHI DSC200，试验采用普通坩埚，参比物为铝质空坩埚，测量气体氛围为氮气。在 60 ℃时，放入硅橡胶样品，以 20 ℃/min 的升温速率升到 145、150 ℃和 155 ℃，并进行 30 min 的保温，测量热流量随时间的变化曲线。得到硅橡胶等温固化温度分别为 145、150 ℃和 155 ℃时的热流量数据如图 2 所示。拟合后得到具体固化反应动力学材料数值如表 3 所示。

2.2.2 非等温 DSC 测试

非等温 DSC 曲线可以有效推断材料固化反应起始温度[12]。为了进一步分析其固化特性，测试硅橡胶的非等温 DSC 曲线，将硅橡胶放入普通坩埚，温度分别从 30 ℃以升温速率为 5、10、15 ℃/min 上升至 200 ℃，测试气体氛围为氮气，测量可得各升温速率下的固化工艺温度如表 4 所示。

通过 3 个温度下数据进行外推，探究得到升温速率为 0 时硅橡胶的工艺温度。如图 3 所示，当硅橡胶升温速率为 0 时，其反应起始温度 t_i、峰顶温度 t_p 和终止温度 t_f 分别为 121.47、141.93 ℃和

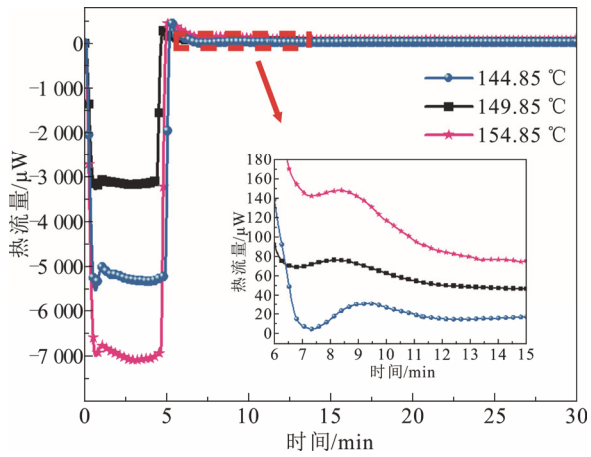


图 2　不同温度下硅橡胶的等温 DSC 结果

Fig.2　Isothermal DSC results of silicone rubber at different temperatures

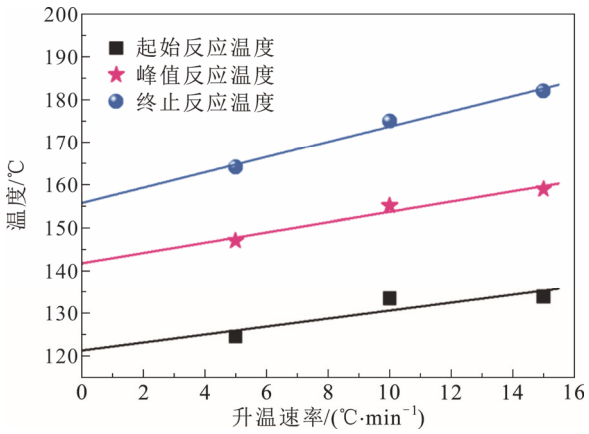


图 3　硅橡胶的固化反应温度外推

Fig.3　Extrapolation of the curing reaction temperature of silicone rubber

表 3　固化反应动力学材料数据

Table 3　Material data for curing reaction kinetics

模型参数	拟合数据	范围	单位
A_1	997 000	[0，+∞)	s^{-1}
A_2	31.911	[0，+∞)	s^{-1}
E_1	34 308	[0，+∞)	K
E_2	2 372.5	[0，+∞)	K
m	0.576 07	[0，100)	
n	0.551 97	[0，100)	

表 4　各升温速率下的固化工艺温度

Table 4　Curing process temperatures at various heating rates

升温速率 β/(℃·min^{-1})	起始温度 t_i/℃	峰顶温度 t_p/℃	终止温度 t_f/℃
5	124.7	147.2	164.2
10	133.6	155.2	175.0
15	134.0	159.1	182.1

155.87 ℃，考虑到生产成本问题可将注射过程模具温度控制在 121.47~141.93 ℃。

3　硅橡胶注射过程流变特性测试

3.1　流变特性机理

硅橡胶在较低温度下是玻璃态，温度升高到玻璃化转变温度以上进入高弹态，继续升温到粘流温度进入黏流态[23]。固化前的硅橡胶处在黏流态，表现为黏性流动。一般情况下，硅橡胶的流动符合非牛顿流体特性，其注射过程中，满足流体运动的三大定律[24]。

Herschel-Bulkley-WLF 黏度模型结合了 Herschel-Bulkley 模型和 WLF 方程，适用于具有屈服应力且黏度随温度和剪切速率显著变化的复杂流体。由于未固化的硅橡胶具有屈服应力，且黏度随温度和剪切速率均会发生变化因此使用此模型进行模拟，其数学表达式如式(5)所示。

$$\eta=\frac{\tau_y}{\dot{\gamma}}+K\dot{\gamma}^{(a-1)} \tag{5}$$

式中：η 为黏度，Pa·s；τ_y 为屈服应力，Pa；$\dot{\gamma}$ 表为剪切速率，s^{-1}；K 为 WLF 黏度；a 为数据拟合系数。

式(6)、(7)分别表示温度对屈服应力和 WLF 黏度的影响；式(8)表示反应固化度 α 对 WLF 黏度的影响，由于流变特性主要运用在填充过程中，不考虑硅橡胶发生固化，这里假定 α=0，τ_{y0}、T_y、C_a、C_b、C_1、C_2 与 T_g 与 K_{00} 为数据拟合系数；K_0 为参考温度下 WLF 黏度；α_g 为凝胶转化度。

$$\tau_y=\tau_{y0}\exp\left(\frac{T_y}{T}\right) \tag{6}$$

$$K=K_0\exp\left(-\frac{C_a\left(T-T_g\right)}{C_b+\left(T-T_g\right)}\right) \tag{7}$$

$$K_0=K_{00}\left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g-\alpha}\right)^{(c_1+c_2\alpha)} \tag{8}$$

3.2　流变特性测试

流变测试仪器选择美国 TA DHR-2，硅橡胶的固化起始温度为 120~125 ℃，考虑其注射过程尚未硫化，因此选择 105、110 ℃和 115 ℃这 3 个温度进行流变测试；测试结果如图 4 所示。由图 4 可知，本研究所用硅橡胶具有“剪切稀化”的特性，属于非牛顿流体范畴的假塑性流体。

由于 α 为 0，无须考虑 C_1、C_2 取值，此处对 n、

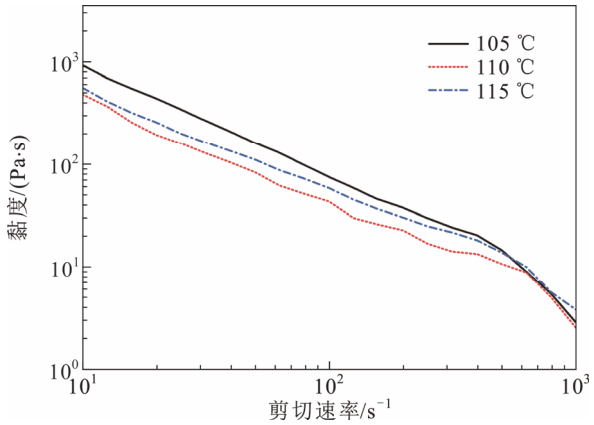


图 4 硅橡胶流变曲线试验数据

Fig.4 Silicone rubber rheological curve test data

τ_{y0}、T_y、C_a、C_b、K_{oo}和 T_g进行拟合，流变拟合参数如表 5 所示。

表 5 流变拟合数据

Table 5 Rheological fitting data

模型参数	拟合数据	范围
n	0.189 681	(0，1]
τ_{y0} /Pa	10 000	(0，+∞)
T_y/K	33	(0，+∞)
C_a	7.237 917	[0，+∞)
C_b	124.345 169	[0，+∞)
K_{00}/(Pa·s^n)	940 610.635 593	(0，+∞)
T_g/K	223	(0，+∞)

4 注模仿真模型建立

4.1 浇筑系统创建

本文以 35 kV 混合瓷支柱绝缘子为例，建立浇筑过程的注模仿真模型，结构参数如表 6 所示。

表 6 35 kV 混合瓷支柱绝缘子结构参数

Table 6 Structural parameters of 35 kV hybrid porcelain post insulators

参数	数值
公称结构高度/mm	305
公称伞径/mm	160
公称爬电距离/mm	550

导入混合瓷支柱绝缘子表面硅橡胶模型进行网格划分，并参照厂家实际生产情况与文献[21]创建浇筑系统。浇筑系统满足进胶平衡与应力平衡，成型结束时，保证固态硅橡胶材料完全填充型腔，即完全进胶，不存在缺胶漏胶等缺陷。参照厂家实际生产情况与标准 Q/GDW 13256.1—2019，硅橡胶厚度设置为 3 mm，厚度较薄，适合采用双层面进行网格划分。流道和分流道均设计为冷流道，防止硅橡胶在流道中提前固化，其结构参数如表 7 所示。蓝色三角形表示注射位置，浇口位置的设计如图 5 所示。

表 7 流道设计结构参数

Table 7 Flow channel design structural parameters

位置	形状	尺寸参数
主流道	圆锥体	始端直径 8 mm，末端直径 5 mm，长度 6 mm
分流道	圆柱体	横截面直径 8 mm
浇口	圆锥体	始端直径 8 mm，末端直径 3 mm

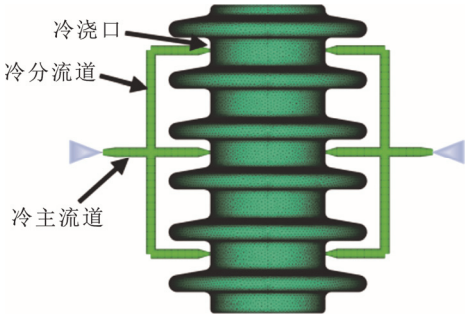


图 5 混合瓷支柱绝缘子浇口设置

Fig.5 Hybrid porcelain post insulator gate setting

4.2 工艺条件设置

根据前文中得到的固化特性与流变特性设置 HTV 材料参数，模具温度应大于 121.47 ℃而小于 141.93 ℃，此处将模具温度设置为 120~140 ℃；胶体温度应小于 121.47 ℃。根据硅橡胶的流变特性，温度较低时硅橡胶处于玻璃态，温度较高时硅橡胶处于黏流态且接近固化，为了保证注射过程中硅橡胶保持良好的流动性并防止还未注射完全就发生固化，将其温度取在 40~60 ℃之间。固化时间在 30~60 s，根据所选注射剂的注射参数与混合瓷支柱绝缘子需要的硅橡胶体积量，将注射速度设置在 10~30 mL/s。工艺参数设置如表 8 所示。

“速度/压力切换”是指在注塑成型过程中，从螺杆的注射速度控制阶段转变为压力控制阶段的时刻。这一切换点通常发生在填充阶段，当型腔被填充到 95%~99%之间时，将填充过程转化为保压控制。这种切换方式被称为 V/P 切换，其目的是确保型腔内的塑料熔体能够充分填充并避免缺陷。

考虑瓷支柱绝缘子表面积大且硅橡胶较薄，胶料的保压相对困难。在实际硅橡胶产品生产中，保

表 8　注射成型工艺参数设置

Table 8　Settings of injection molding process parameter

参数	控制方式	数值
模具表面温度/℃		120~140
熔体温度/℃		40~60
固化时间/s		30~60
填充控制速度/(mL·s^{-1})	由流动速率控制	10~30
速度/压力切换的充填体积分数/%	由充填体积分数控制	99
保压控制的压力和时间	按照充填压力与时间控制	填充压力的 120%，20 s

压压力通常比注射压力略高，但保压压力不能过高，否则会导致锁模力增加；保压压力也不能过低，不然会导致胶料难以充满。综合考虑下，设定保压压力的数值为填充压力的 105%~125%，保压时间设置为 5~25 s。

5　多因素协同优化分析

基于上述仿真试验分析，开展正交试验，并引入误差列，得到六因素五水平正交表 $L_{25}(5^6)$，各因素代表物理量如表 9 所示，正交表 $L_{25}(5^6)$如表 10 所示。误差采用极差法分析正交试验结果，用于衡量该因素对试验结果的影响程度。极差越大，说明该因素的水平变化对试验结果的影响越显著，作为主要因素；而极差较小的因素则是次要因素。试验结果如表 11 所示。

5.1　锁模力的极差分析

硅橡胶成型过程中锁模力的极差分析结果如图 6 所示。由图 6 可知，各因素对锁模力的影响程度为：注射速度>保压时间>保压压力>模具温度>胶体温度，模具温度和胶体温度小于误差列极差值时，可以认为这两者对锁模力的影响并不明显。注射速度对锁模力的影响尤其明显，其变化趋势远大于另外 4 个因素，并且在多因素综合作用时，注射速度越大锁模力越小。其余因素没有明显规律，并且变化较小。

因此，为了降低硅橡胶注射成型中的锁模力，应该优先考虑注射速度的优化，再考虑保压时间和保压压力的选取，而另外 2 个因素可以忽略。使锁模力最优的最佳工艺参数为模具温度 125 ℃、胶体温度 60 ℃、注射速度 30 mL/s、保压时间 10 s 和保压压力为 110%注射压力。此时锁模力和体积收缩率分别为 173.3 kN 和 2.696%部分试验结果出现锁模力偏大的情况，如编号 12，经过分析，锁模力的影响因素为：注射速度>保压时间>保压压力，而“异

表 9　正交试验各因素代表物理量

Table 9　Physical quantities of each factor in the orthogonal experiment

因素类型	物理量
因素 A	模具温度/℃
因素 B	胶体温度/℃
因素 C	注射速度/(mL·s^{-1})
因素 D	保压时间/s
因素 E	保压压力占比/%
因素 F	误差

注：保压压力以充填末端压力的百分比设定。

表 10　$L_{25}(5^6)$正交试验各因素与水平

Table 10　$L_{25}(5^6)$ orthogonal experiment factors and levels

水平	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	因素 E	因素 F
1	120	40	10	5	105	1
2	125	45	15	10	110	2
3	130	50	20	15	115	3
4	135	55	25	20	120	4
5	140	60	30	25	125	5

表 11　正交试验结果

Table 11　Results of orthogonal experiment

编号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	因素 E	因素 F	锁模力/kN	体积收缩率/%
1	120	40	10	5	105	1	842.8	4.566
2	120	45	20	25	125	2	268.4	3.895
3	120	50	30	20	110	3	191.4	3.451
4	120	55	15	15	115	4	375.6	4.212
5	120	60	25	10	120	5	203.5	3.432
6	125	40	30	15	125	5	228.2	2.854
7	125	45	15	10	110	1	282.6	3.183
8	125	50	25	5	115	2	207.6	2.824
9	125	55	10	25	120	3	764.1	3.222
10	125	60	20	20	105	4	207.3	2.953
11	130	40	25	25	110	4	213.8	2.617
12	130	45	10	20	115	5	1 411.98	8.761
13	130	50	20	15	120	1	273.2	2.767
14	130	55	30	10	105	2	164.7	2.169
15	130	60	15	5	125	3	381.8	3.832
16	135	40	20	10	115	3	250.8	1.91
17	135	45	30	5	120	4	192.0	1.867
18	135	50	15	25	105	5	509.8	3.481
19	135	55	25	20	125	1	234.2	2.182
20	135	60	10	15	110	2	714.0	2.513
21	140	40	15	20	120	2	635.4	3.542
22	140	45	25	15	105	3	191.5	1.412
23	140	50	10	10	125	4	770.6	2.304
24	140	55	20	5	110	5	244.5	1.347
25	140	60	30	25	115	1	220.1	1.67

常”结果中这 3 个因素参数选取均为该参数范围内最大或较大的锁模力情况，当多个有效影响因素均处于致使锁模力较大值时，多因素综合将“放大”锁模力结果，这种极端工艺组合使仿真结果出现“异常”偏大情况。

5.2 体积收缩率的极差分析

硅橡胶成型过程中体积收缩率的极差分析结果如图 7 所示。由图 7 可知，各因素对体积收缩率的影响程度为：模具温度>注射速度>保压时间>保压压力>胶体温度，胶体温度小于误差列极差值，可认为胶体温度对体积收缩率的影响并不明显。在多因素综合作用时，注射速度对体积收缩率的影响较为规律，并且当注射速度越大时体积收缩率越小。其余因素对体积收缩率的变化没有明显规律。

5 种参数对体积收缩率的贡献较为平均。从极差结果来看，为了降低硅橡胶注射成型中的体积收缩率，可以优先考虑模具温度和注射速度的优化，再考虑保压时间的选取，而另外 2 个因素可以忽略。使体积收缩率最优的最佳工艺参数为模具温度 140 ℃、胶体温度 55 ℃、注射速度 30 mL/s、保压时间 10 s 和保压压力为 110%注射压力。此时锁模力和体积收缩率分别为 178.9 kN 和 1.205%。

部分试验结果出现体积收缩率偏大的情况，见编号 12，经过分析，其原因与锁模力偏大情况类似，体积收缩率的影响因素为：注射速度>保压时间>保压压力>保压压力，而“异常”结果中这 4 个因素参数选取均为该参数范围内出现最大或较大的体积收缩率情况，当多个有效影响因素均处于致使体积收缩率较大值时，多因素综合将“放大”影响程度，这种极端工艺组合使仿真结果出现“异常”偏大情况。

5.3 综合加权评分分析

在上述对锁模力和体积收缩率的正交试验研究分析中，各因素和水平对 2 个指标的影响程度不同。为了同时考虑 2 个指标，接下来利用综合加权分析，将 2 个指标综合为单指标。

首先对 2 组数据进行归一化处理，以便后续进行分析比较，归一化的计算式为：

$$x_{ij}=\frac{y_{ij}-\min\limits_{j}y_{ij}}{\max\limits_{j}y_{ij}-\min\limits_{j}y_{ij}} \tag{9}$$

式中：x_{ij} 为第 i 水平下的 j 次试验归一化后的数值；y_{ij} 为第 i 水平下的 j 次试验；i=1, 2, …, 5；j=1, 2, 3, …, 25。

考虑锁模力和体积收缩率是同时制约包覆硅橡胶的质量，将两者数据归一化后，各分配权重为 0.5，并扩大 100 倍得到该项工艺参数的评分。

计算硅橡胶成型过程中综合加权指标的极差分析结果如图 8 所示。由图 8 可知，各因素对综合指标的影响程度为：注射速度>保压时间>模具温度>保压压力>胶体温度，胶体温度小于误差列极差

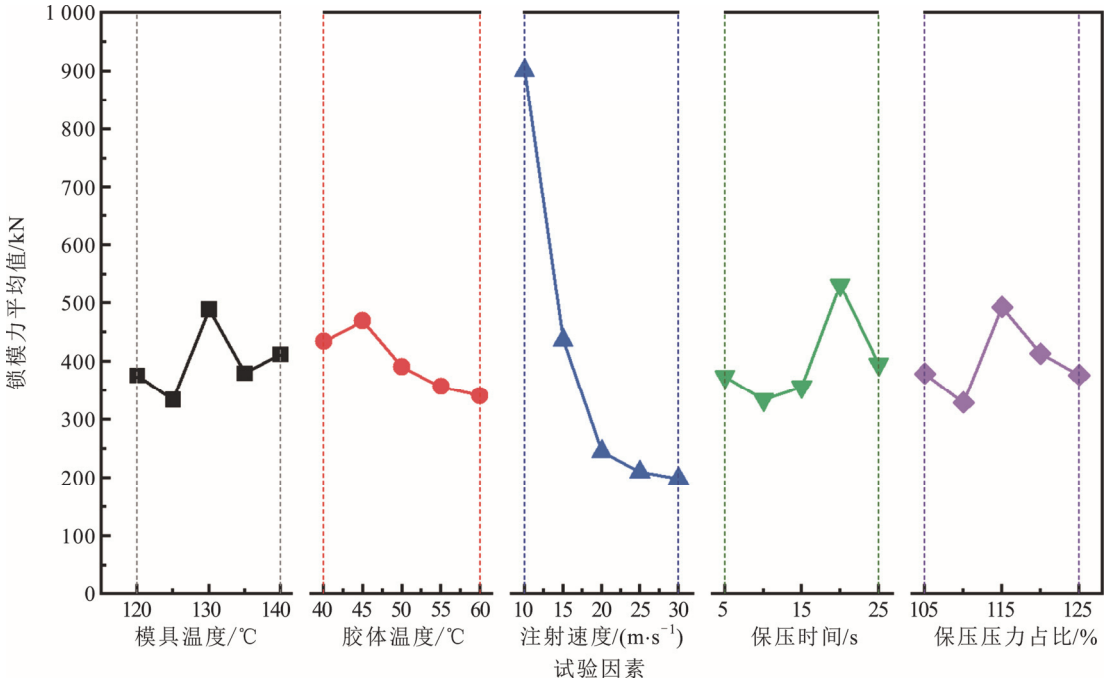


图 6 各因素对锁模力的影响趋势图

Fig.6 Trend chart of the influence of various factors on the clamping force

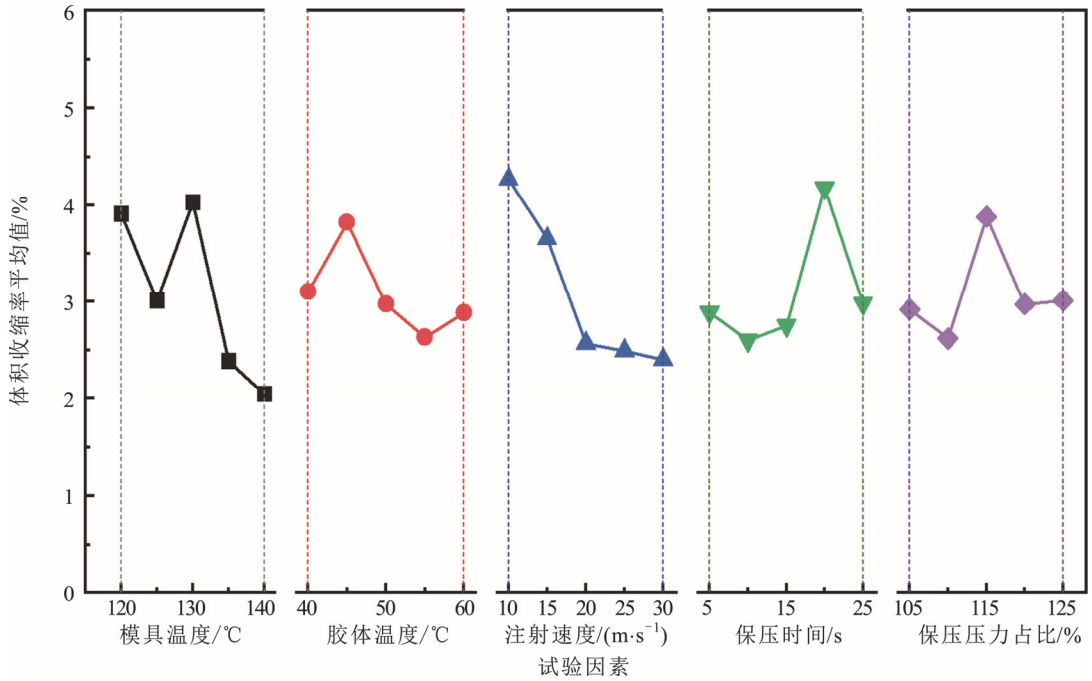


图 7　各因素对体积收缩率的影响趋势图

Fig.7　Trend chart showing the influence of various factors on the volume shrinkage rate

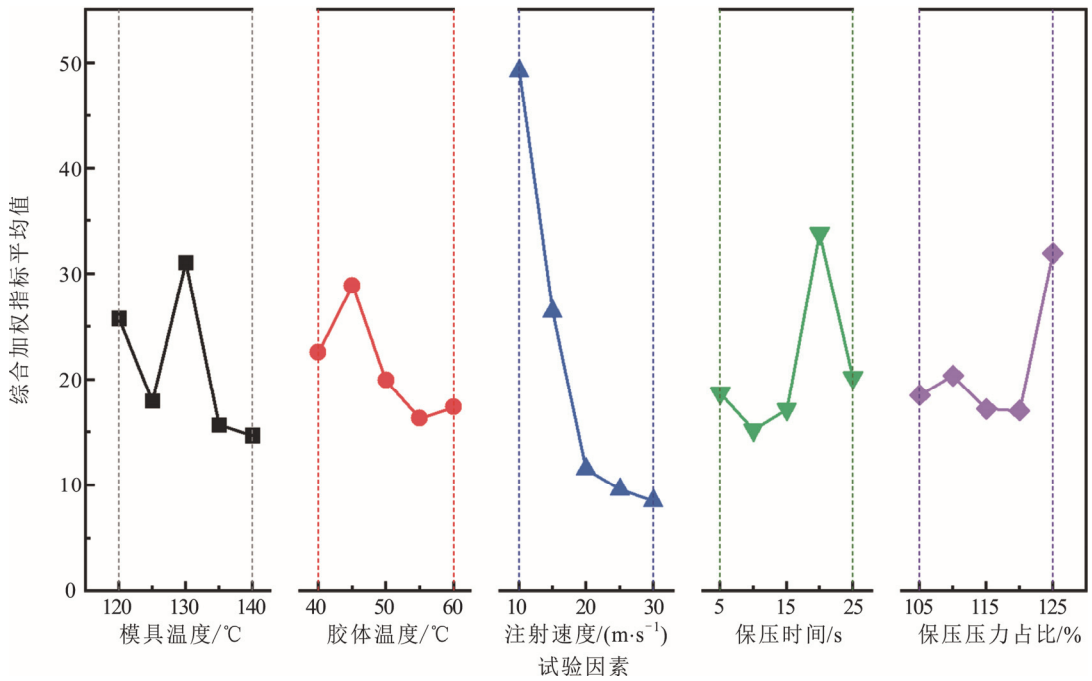


图 8　各因素对综合加权指标的影响趋势图

Fig.8　Trend chart showing the impact of various factors on the comprehensive weighted index

值，可认为胶体温度对综合指标的影响并不明显。

使综合指标最优的最佳工艺参数为模具温度 140 ℃、胶体温度 55 ℃、注射速度 30 mL/s、保压时间 10 s 和保压压力为 110%注射压力，这与体积收缩率最优的工艺指标一致。

可以看出，注射速度对综合指标的影响尤其明显，其影响的变化趋势大于另外 4 个因素，而模具温度、胶体温度、保压时间和保压压力变化时，综合指标的变化不规律，并且变动幅度相对较小，这与前文分析锁模力最优时结论一致。从极差结果来

看，为了降低硅橡胶注射成型中的综合指标，可以优先考虑注射速度的优化，再考虑保压时间和模具温度的选取，保压压力也可以一定考虑，而胶体温度因素可以忽略。

6 结论

1）配方改良后的硅橡胶焦烧时间与硫化时间均增长，流动性增强，有利于混合瓷支柱绝缘子硅橡胶注射；其固化反应起始温度为 121.47 ℃、峰顶温度为 141.93 ℃和终止温度为 155.87 ℃且具有“剪切稀化”的特性，属于非牛顿流体范畴的假塑性流体。

2）各因素对锁模力的影响程度为：注射速度>保压时间>保压压力>模具温度>胶体温度；各因素对体积收缩率的影响程度为：模具温度>注射速度>保压时间>保压压力>胶体温度。

3）综合方案最优的工艺参数为模具温度 140 ℃、胶体温度 55 ℃、注射速度 30 mL/s、保压时间 10 s 和保压压力为 110%注射压力，此时锁模力和体积收缩率分别为 178.9 kN 和 1.205%。

参考文献 References

[1] 李立涅，罗 兵，董旭柱，等. 高电压技术发展现状及展望[J]. 高电压技术，2025，51(8)：3682-3720.
LI Licheng, LUO Bing, DONG Xuzhu, et al. Advances and prospects of high voltage technology[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 3682-3720.

[2] 孙庆峰，华正轩，梅 简，等. 高压支柱瓷绝缘子异常发热原因分析及预防措施[J]. 电瓷避雷器，2020(3)：232-236.
SUN Qingfeng, HUA Zhengxuan, MEI Jian, et al. Analysis on the abnormal heating of high voltage post insulator with ceramic material and preventive measures[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3): 232-236.

[3] 刘冀邱，李燕雷，赵江涛，等. 特高压盘形悬式瓷绝缘子质量提升关键技术[J]. 高电压技术，2025，51(10)：5175-5185.
LIU Jiqiu, LI Yanlei, ZHAO Jiangtao, et al. Key technologies for improving the quality of ultra high voltage disc suspension porcelain insulators[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(10): 5175-5185.

[4] 王黎明，李剑超，梅红伟，等. 雾霾条件下支柱绝缘子的闪络特性[J]. 高电压技术，2019，45(2)：433-439.
WANG Liming, LI Jianchao, MEI Hongwei, et al. Flashover characteristics of post insulators under fog and haze conditions[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 433-439.

[5] 胡建林，钟 睿，刘泽辉，等. 1 000 kV 特高压交流线路用 RTV 绝缘子表面涂层老化分析[J]. 电网技术，2018，42(10)：3436-3443.
HU Jianlin, ZHONG Rui, LIU Zehui, et al. Aging analysis of RTV insulator coating on 1 000 kV UHV AC transmission line[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3436-3443.

[6] 彭雅楠，李文栋，曾世胤，等. 界面湿放电下护套 ATH 填料析出对绝缘子芯棒酥朽老化的影响[J]. 高电压技术，2024，50(4)：1673-1683.
PENG Yanan, LI Wendong, ZENG Shiyin, et al. Effect of HTV housing ATH filler precipitation on decay-like aging of FRP core rod under interfacial wet discharge condition[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1673-1683.

[7] 李帅兵，李天耕，淡嘉豪，等. 电气设备复合绝缘结构的太赫兹无损检测综述[J]. 高电压技术，2024，50(1)：194-209.
LI Shuaibing, LI Tiangeng, DAN Jiahao, et al. Review of terahertz non-destructive testing of composite insulation structures for electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 194-209.

[8] 刘智鹏，魏 来，李庆民，等. GIL 支柱绝缘子嵌件-环氧界面缺陷演化过程与放电脆裂机制[J]. 高电压技术，2024，50(1)：359-369.
LIU Zhipeng, WEI Lai, LI Qingmin, et al. Defects evolution process and mechanism of discharge embrittlement of GIL post insulator inserts and epoxy interface[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 359-369.

[9] 梁曦东，仵 超，左 周，等. 高电压有机外绝缘发展综述与展望[J]. 中国电机工程学报，2024，44(18)：7412-7425.
LIANG Xidong, WU Chao, ZUO Zhou, et al. Review and prospects for development of high voltage outdoor organic insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7412-7425.

[10] HUANG Y G, LI D X, LIU Y J. Experimental analysis for factors affecting the repeatability of plastics injection molding tests on the self-developed apparatus[J]. International Journal of Science and Engineering, 2013, 5(1): 6-11.

[11] BONT M, BARRY C, JOHNSTON S. A review of liquid silicone rubber injection molding: process variables and process modeling[J]. Polymer Engineering & Science, 2021, 61(2): 331-347.

[12] 张雨晴，张锋锋，王锦艳，等. 非等温 DSC 法研究 TSPZ-EP 环氧树脂的固化动力学[J]. 高分子材料科学与工程，2021，37(11)：77-85.
ZHANG Yuqing, ZHANG Fengfeng, WANG Jinyan, et al. Curing kinetics of TSPZ-EP epoxy resin characterized by non-isothermal DSC[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(11): 77-85.

[13] 牛吉梅. CAE 技术在注塑工艺参数优化中的应用[J]. 塑料科技，2019，47(7)：74-77.
NIU Jimei. Application of CAE technology in optimization of injection process parameters[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(7): 74-77.

[14] 潘秀石，林桂霞. 基于正交试验法的加湿器底座注塑工艺优化设计[J]. 工程塑料应用，2016，44(4)：65-68.
PAN Xiushi, LIN Guixia. Optimized design of injection molding process for humidiifer pedestal with orthogonal experiment method[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(4): 65-68.

[15] 石晓慧，王守城，王恒冲，等. 基于 Moldflow 及正交实验的双色注塑工艺参数优化[J]. 塑料，2015，44(2)：113-116.
SHI Xiaohui, WANG Shoucheng, WANG Hengchong, et al. Parameters optimization of two-colored injection molding process based on Moldflow and orthogonal test[J]. Plastics, 2015, 44(2): 113-116.

[16] KRUSE T. Real world LSR/silicon CAE simulation[J]. Journal of Polymer Engineering, 2011, 31(6): 555-567.

[17] 贺晓辉，丁永峰，张 杰，等. 浇口参数对薄壁塑件翘曲的影响[J]. 塑料，2025，54(2)：160-165.
HE Xiaohui, DING Yongfeng, ZHANG Jie, et al. Analysis of gage parameters on the warpage of thin-walled plastic parts[J]. Plastics, 2025, 54(2): 160-165.

[18] AL-SAIF A S J A, JASIM A M. A novel algorithm for studying the effects of squeezing flow of a Casson fluid between parallel plates on magnetic field[J]. Journal of Applied Mathematics, 2019, 2019: 3679373.

[19] ATLAS M, HUSSAIN S, SAGHEER M. Entropy generation and unsteady Casson fluid flow squeezing between two parallel plates subject to Cattaneo-Christov heat and mass flux[J]. The European Physical Journal Plus, 2019, 134(1): 33.

[20] BHASKAR K, SHARMA K. Unsteady MHD squeezing viscous Casson fluid flow in upright channel with cross-diffusion and thermal radiactive effects[J]. Indian Journal of Physics, 2021, 95(7): 1453-1467.

[21] 王作龄. 橡胶的硫化与成型技术(一)[J]. 世界橡胶工业，2006，33(6)：59-63.
WANG Zuoling. Vulcanization and forming technology of rubber (part I)[J]. World Rubber Industry, 2006, 33(6): 59-63.

[22] KAMAL M R. Thermoset characterization for moldability analysis[J]. Polymer Engineering & Science, 1974, 14(3): 231-239.

[23] 滕彦理. 高速列车橡胶内风挡注射模具的设计及注射参数优化研究[D]. 青岛：青岛科技大学，2020.
TENG Yanli. The study on the design of injection mold for rubber inner windshield of the high-speed train and the optimization of its injection parameters[D]. Qingdao, China: Qingdao University of Science and Technology, 2020.

[24] ABBAS Z, JAFAR M A, HASNAIN J. Analysis of asymptotic solutions for non-Newtonian fluid flow between two parallel discs with dissimilar in-plane motion[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2020, 84: 129-138.



周日文
2002—，男，硕士生
主要从事绝缘子检测和外绝缘方面的研究工作
E-mail: 2024282070135@whu.edu.cn

ZHOU Riwen



吴　强(通信作者)
1995—，男，博士
主要从事高电压设备监测、绝缘子检测和外绝缘方面的研究工作
E-mail: wuqiang@whu.edu.cn

WU Qiang
Ph.D.
Corresponding author

收稿日期　2025-09-08　修回日期　2026-02-02　　编辑　曾文君