

## 工业硅系列专题五：有机硅篇（上）

### 报告摘要：

- **生产工艺：**有机硅产业链由原材料、单体及中间体、下游深加工产品及终端应用等环节组成。有机硅产品通过一系列反应工艺获得，首先单体通过缩聚反应进行水解和低聚形成环状或短链状硅基低聚物，然后将其进一步缩合或开环，获得最终有机硅产品，其中，单体的性能和结构直接影响有机硅材料的性能和应用领域，其生产水平直接反应有机硅工业的水平。
- **主要产品：**有机硅材料按其形态的不同，可分为：硅油（硅脂、硅乳液、硅表面活性剂）、硅橡胶（高温硫化硅橡胶、室温硫化硅橡胶、液体硅橡胶、光固化硅橡胶）、硅树脂、硅烷偶联剂（有机硅化学试剂）等。
- **特性优异，终端广泛：**有机硅产品的结构中既有有机基团，又有无机结构，这种特殊的组成和分子结构使得它集有机物和无机物的特性功能于一身，具有耐温特性、耐候性、电气绝缘性能、生理惰性、低表面张力和低表面能五大突出特性，基于以上优异的特性，其终端应用十分广泛，不仅作为航空、尖端技术、军事技术部门的特种材料使用，而且也用于国民经济各部门，其应用范围已扩到：建筑、电子电气、纺织、汽车、机械、皮革造纸、化工轻工、金属和油漆、医药医疗等。

分析师：祁玉蓉

从业资格证号：F03100031

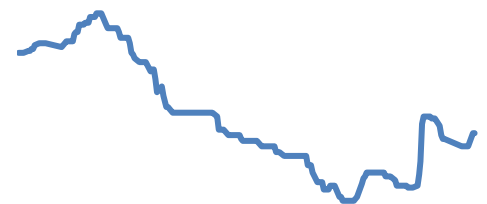
研究所

金属期货（期权）研究室

TEL： 010-82295006

Email: qiyurong@swyhsc.com

### 相关图表



### 相关报告：

《工业硅系列专题一：硅石篇 20230315》

《工业硅系列专题二：工业硅篇 20230421》

《工业硅系列专题三：交割篇》

《工业硅系列专题四：“硅能源”全产业链期货的重要性研讨》

## 目 录

报告摘要: .....	1
一、 有机硅概述.....	4
二、 生产工艺.....	5
(一) 有机硅单体 .....	6
(二) 有机硅中间体 .....	7
(三) 有机聚硅氧烷高分子化合物 .....	9
三、 四大类主要有机硅产品介绍 .....	10
(一) 硅油 .....	10
1. 硅脂和硅膏 .....	11
2. 有机硅乳液 .....	12
(二) 硅橡胶 .....	12
1. 高温硫化 (HTV) 硅橡胶 .....	13
2. 室温硫化 (RTV) 硅橡胶 .....	13
3. 液体硅橡胶 (LR) .....	15
4. 光固化硅橡胶 .....	15
(三) 硅树脂 .....	15
1. 硅树脂涂料 .....	16
2. 硅树脂胶粘剂 .....	17
3. 有机硅塑料 .....	18
(四) 硅烷偶联剂 .....	18
参考文献: .....	20

## 图表目录

图表 1: 有机硅五大新能特点 .....	4
图表 2: 有机硅产业链图 .....	5
图表 3: 有机硅生产工艺流程图 .....	5
图表 4: 直接法合成甲基氯硅烷装置示意图 .....	7
图表 5: 六甲基环三硅氧烷 (D3) 化学结构式 .....	8
图表 6: 八甲基环四硅氧烷 (D4) 化学结构式 .....	8
图表 7: 十甲基环五硅氧烷 (D5) 化学结构式 .....	8
图表 8: 二甲基环硅氧烷混合环体 (DMC) 化学结构式 .....	8
图表 9: 连续水解法生产羟基封端的线型聚二甲基硅氧烷工程示意图 .....	9
图表 10: 线性硅油分子结构式 .....	11
图表 11: 支链型硅油分子结构式 .....	11
图表 12: 硅橡胶与其他有机橡胶的性能比较 .....	13
图表 13: 各种单组分室温硫化硅橡胶的性能比较 .....	14
图表 14: 硅树脂同一般有机树脂的性能对比 .....	16

广期所首个期货品种-工业硅已上市接近一年，工业硅期货上市以来，为实体企业保价稳供起到了不可替代的作用，作为工业硅三大下游之一的有机硅产业，其基本面的变动对工业硅的供需及价格变动产生了较大的影响，本报告将对有机硅的产业链及生产工艺进行分析，以期对市场投资提供一定的参考。

## 一、有机硅概述

有机硅化合物是指含有碳硅键（Si-C）的化合物，且至少有一个有机基团是直接和硅原子相连，习惯上也通常把通过氧（O）、硫（S）、氮（N）等使有机基团与硅原子相连接的化合物也当作有机硅化合物，其中，以硅氧键（-Si-O-Si-）为骨架组成的聚硅氧烷占比最大，约占总量的 90% 以上。当前自然界中并未发现有有机硅化合物的存在，只有在动物羽毛和禾本科植物中发现有硅酸酯类化合物，但这类化合物并不含有碳硅键（Si-C），而是只含有硅-氧碳键（Si-O-C）。

有机硅产品的基本结构单元是由硅氧链节构成的，侧链则是通过硅原子与其他各种有机基团相连，因此，在有机硅产品的结构中既有有机基团，又有无机结构，这种特殊的组成和分子结构使得它集有机物和无机物的特性功能于一身，有机硅产品不仅具有表面张力低、粘温系数小、压缩性高、气体渗透性高等基本性质，与其他高分子材料相比，还具有耐温特性、耐候性、电气绝缘性能、生理惰性、低表面张力和低表面能五大突出特性，以及耐氧化稳定性、难燃、憎水、耐腐蚀、无毒无味以及生理惰性优异特性。

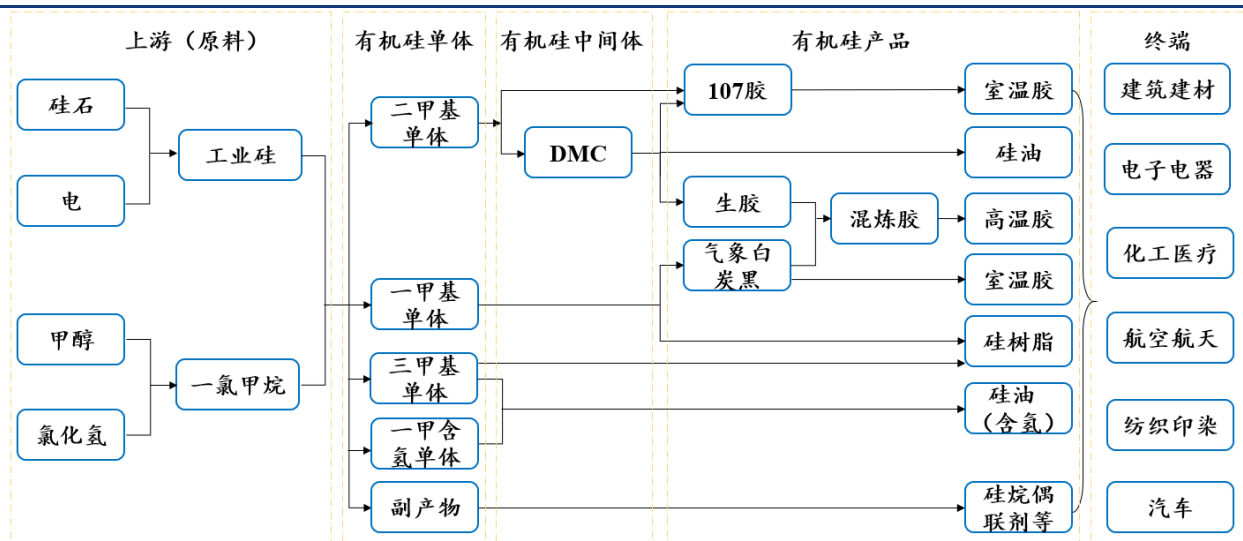
图表 1：有机硅五大新能特点

耐温特性	有机硅化合物中主链结构大多是硅氧键，碳碳键的键能为 345.6 千焦/摩尔，而硅氧键在有机硅化合物中的键能为 506.264 千焦/摩尔，这就决定了有机硅产品具有较高的热稳定性，在辐射照射下或高温下，化合物分子中的化学键保持不断裂，不仅如此，有机硅产品通常也耐低温，因此，有机硅产品使用的温度通常较宽，化学性能和物理机械性能，随温度的变化均较小。
耐候性	有机硅化合物的主链大多是硅氧键，没有双键，不容易被紫外光和臭氧所分解，与其他高分子材料相比具有更好的热稳定性和耐辐射、耐候能力，通常在自然环境下有机硅化合物的使用寿命可达几十年。
电气绝缘性能	有机硅产品的电绝缘性能普遍较好，其介电损耗、耐电弧、耐电压、耐电晕、表面电阻系数和体积电阻系数等参数在绝缘材料中均名列前茅，而且其电气性能较稳定，受温度和频率的影响非常小，因此，有机硅作为一种稳定的电绝缘材料，在电气、电子工业上得到了广泛的应用。此外，有机硅的拒水性优异，这就是电气设备在潮湿环境下使用的可靠性得到较大的提高。
生理惰性	聚硅氧烷类化合物活性极低，耐生物老化，有较好的抗凝血性能，在生物体中无排异反应。
表面张力与表面能	有机硅化合物的主链通常十分柔顺，其分子间的作用力较碳氢化合物要弱很多，因此，与同分子量的碳氢化合物相比，其粘度较低，表面张力较弱，表面能较小，成膜力较强。这种低表面张力和低表面能使其具有疏水、消泡、防粘、润滑、上光等各项优异性能。

资料来源：宏源期货研究所

有机硅材料按其形态的不同，可分为：硅烷偶联剂（有机硅化学试剂）、硅油（硅脂、硅乳液、硅表面活性剂）、高温硫化硅橡胶、液体硅橡胶、硅树脂、复合物等。由于有机硅产品

图表 2: 有机硅产业链图

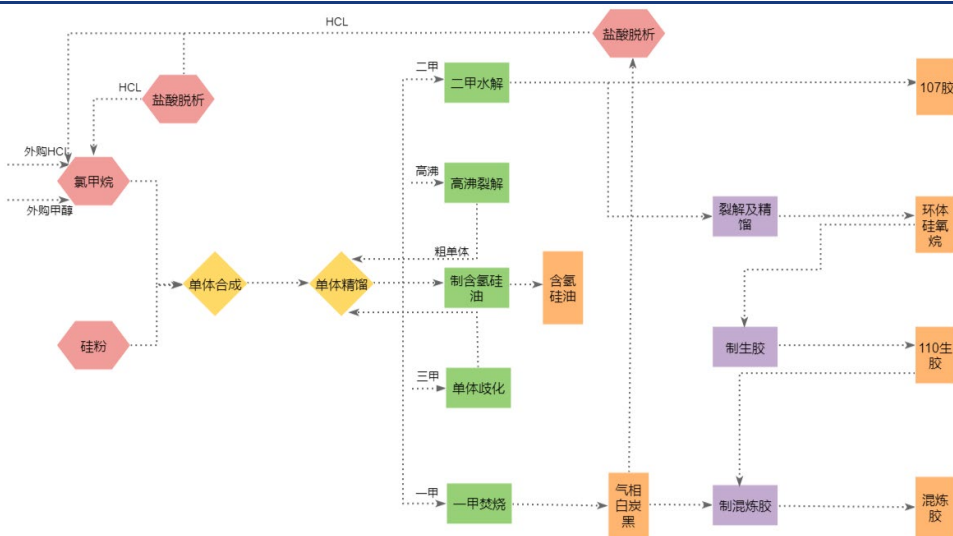


资料来源：宏源期货研究所

## 二、生产工艺

有机硅产品通过一系列反应工艺获得。首先单体通过缩聚反应进行水解和低聚形成环状或短链状硅基低聚物，然后将其进一步缩合或开环，获得最终有机硅产品。

图表 3: 有机硅生产工艺流程图



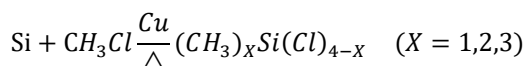
资料来源：百川盈孚，宏源期货研究所

## (一) 有机硅单体

有机硅单体是制备有机硅材料的重要基础和关键环节，在合成有机硅材料的过程中起着重要的纽带作用，其性能和结构直接影响有机硅材料的性能和应用领域，单体的生产水平直接反应有机硅工业的水平。

有机硅单体包括甲基氯硅烷（简称甲基单体）、苯基氯硅烷（简称苯基单体）、甲基乙烯基氯硅烷、乙基三氯硅烷、丙基三氯硅烷、乙烯基三氯硅烷、γ-氯丙基三氯硅烷和氯硅单体等，其中，甲基氯硅烷最重要，用量占有机硅单体的 90% 以上，一般称为粗单体，是由硅粉与氯甲烷反应第一步所得各类甲基氯硅烷总称，一般有机硅项目公布的产能为粗单体（甲基氯硅烷）产能。目前，使用最广泛、用量最大的单体是二甲基二氯硅烷，有机硅绝大部分是由二甲基二氯硅烷制得的聚二甲基硅氧烷作为基础聚合物，再引入其它基团加工为各种形态、适应各种功能要求的聚合物产品及制品。

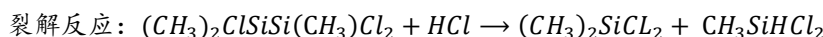
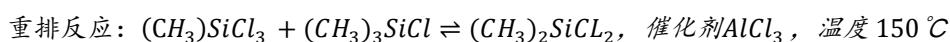
工业中含氯硅烷单体的制备方法包括直接合成法、热缩合法、金属有机法、硅氧加成法和重排再分配法五种。二甲基二氯硅烷主要通过“直接法”合成，“直接法”是由一氯甲烷直接与金属硅接触，在铜基催化剂的催化下进行反应，一步得到甲基氯硅烷的工艺过程，该反应于 1941 年 9 月由 EG 罗乔（Rochow）在美国首先申请了专利，随后，由 Richard Müller 于 1942 年 6 月在德国独立申请了专利，因此，这种反应被广泛称为“Rochow—Müller 过程”。到目前为止，这种“直接合成”法依旧是生产有机硅单体最便捷、经济的办法，其主要反应式如下：



直接合成甲基氯硅烷单体所用的原料主要是纯度为 99% 以上的冶金级金属硅和氯甲烷，该反应使用铜基催化剂，这种催化剂较复杂，表面具有一定的氧化程度及特定结构，其平均分子式为  $\text{CuO}_2$ ，颗粒尺寸在 10um 以下，除铜外，还用少量锌和其他物质作为助催化剂；该反应的反应温度为 280~300℃，压强约为 2~4atm（1 标准大气压=101.325MPa，下同），生成物中除主要产品二甲基二氯硅烷（粗单体中二甲基二氯硅烷的含量一般为 75%~85%，最高可达 85%~90%）以外，还有许多副产物生成，如： $(\text{CH}_3)_3\text{SiCl}$ 、 $(\text{CH}_3)\text{SiCl}_3$ 、 $\text{CH}_3\text{HSiCl}_2$ 、 $(\text{CH}_3)_4\text{Si}$  以及少量的氢气、氯气、甲烷、碳等。

直接法的反应温度不宜过高，否则二甲基二氯硅烷的收率会降低，而多氯硅烷含量将提高，适当增加反应压强（4~5atm）有利于二甲基二氯硅烷的生成。为了要获得纯净的二甲基二氯硅烷，必须用 150~200 块理论塔板的分馏塔进行分馏，粗甲基单体经分馏后可得到纯度达 99.95% 以上的二甲基二氯硅烷。

为了获得更多的二甲基二氯硅烷单体，可采用催化重排反应和裂解反应来综合回收其中的低沸物和高沸物，反应式如下：

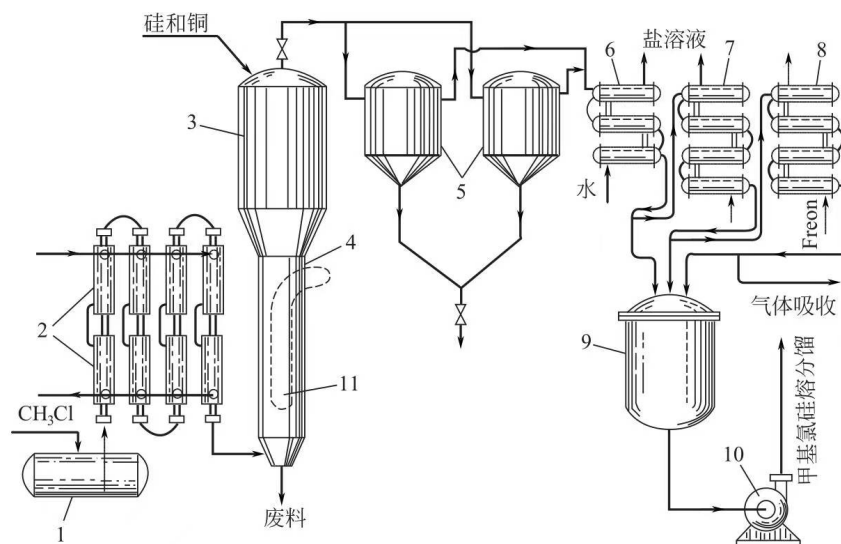


直接法生产甲基氯硅烷单体的操作相当复杂，原料的好坏、催化剂的种类、催化剂含量的



高低、触体的形态、卤代烃的流速、反应温度、压强等都能对二甲基二氯硅烷的产率以及生成物中各种烷基硅烷的比例产生影响，这也就促进了当前有机硅工业集中的单体生产和分散的产品加工格局。

图表 4：直接法合成甲基氯硅烷装置示意图



- 1—储存器；2—蒸馏器；3—分离器；4—反应器；5—过滤器；  
6, 7, 8—冷凝器；9—收集器；10—离心泵；11—双筒式锅炉管

资料来源：《有机硅材料基础》（朱晓敏，章基凯），宏源期货研究所

## （二）有机硅中间体

有机硅中间体指的是一系列硅氧烷系列产品，主要有二甲基环硅氧烷混合环体（DMC）、硅醚（MM）、六甲基环三硅氧烷（D3）、八甲基环四硅氧烷（D4）、十甲基环五硅氧烷（D5）等，这些中间体是制备高分子聚合物的重要原料。

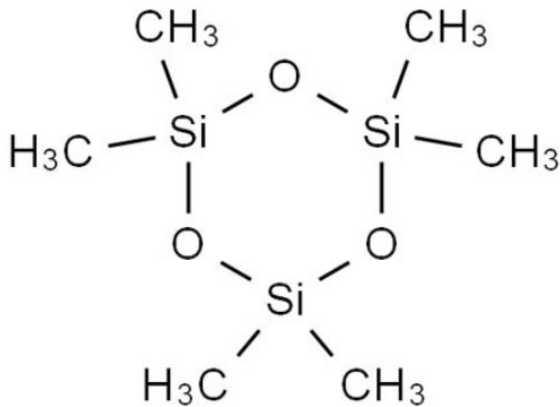
D3 指的是八甲基硅氧烷，是合成一般有机硅聚合物的重要原料，还可用来制备特定的有机硅化合物，作为各种表面处理剂、偶联剂、交联剂等。

D4 指的是十甲基硅氧烷的四环体，无色透明或乳白色液体，可燃，无异味，是有机硅行业的重要中间体。主要用途包括制备甲基硅油等有机硅高聚物，无线电零件的绝缘和防潮，气相色谱玻璃毛细管柱表面去活性剂等。

D5 指的是十甲基硅氧烷的五环体，是一种无色无味的有机硅化合物，广泛使用于化妆品和人体护理产品中，与大部分的醇和其他化妆品溶剂有很好的相容性。

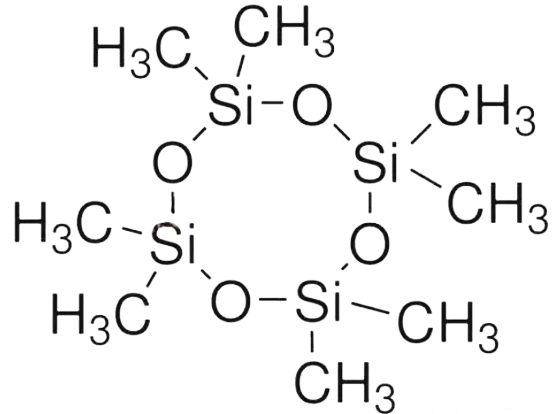
DMC 是二甲基环硅氧烷混合物，也就是 D3、D4、D5 的混合物，由线体和环体构成，可以用来聚合硅油（聚硅氧烷）用，是无色透明油状液体，可燃，密度范围 0.95-0.97g/cm<sup>3</sup>。DMC 是生产硅橡胶、硅油的主要原料，在橡胶填料处理及化妆品上也有广泛应用。

图表 5：六甲基环三硅氧烷（D3）化学结构式



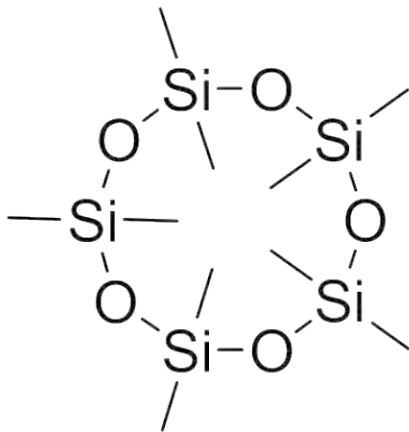
资料来源：公开资料整理，宏源期货研究所

图表 6：八甲基环四硅氧烷（D4）化学结构式



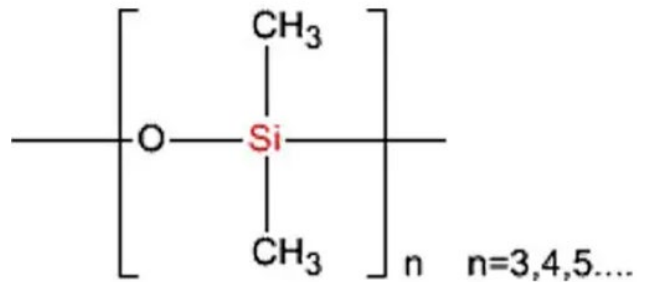
资料来源：公开资料整理，宏源期货研究所

图表 7：十甲基环五硅氧烷（D5）化学结构式



资料来源：公开资料整理，宏源期货研究所

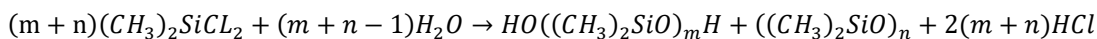
图表 8：二甲基环硅氧烷混合环体（DMC）化学结构式



资料来源：公开资料整理，宏源期货研究所

工业中环型硅氧烷最重要的合成方法是二甲基二氯硅烷的水解和线型环型聚硅氧烷的重排。

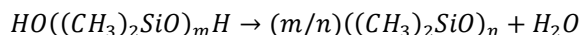
二甲基二氯硅烷的水解得到环型硅氧烷：把二甲基二氯硅烷在 15~20℃ 的温度条件下加入过量的水中，形成的混合物的组成为 0.5%D3，42.0%D4，6.7%D5，1.6%D6 和 49.2% 线型聚二甲基硅氧烷及大环硅氧烷，小环硅氧烷的产率随着硅原子上有机取代基的体积增大而提高。水解反应产物的组成取决于反应条件，酸性条件有利于环型及线型低聚体的形成，而在碱性条件下正好相反。浓度越低，则分子内缩合的概率就越大，在水中加入与水互溶的有机溶剂能提高环型硅氧烷的产率。二氯硅烷的水解产物通过分馏，就能得到各种环型硅氧烷单体。化学反应式如下：



线型环型聚硅氧烷的重排：当线型或环型聚硅氧烷加热到较高温度时，分子中的化学键进行重排，形成各种大小的环状化合物。需要的环型硅氧烷单体可以从重排产物中分馏出来，而剩余的化合物可以重新返回反应釜再进行重排，重排反应是可逆反应，所以在反应进行中，必须不断蒸出生成的环体，线形聚合物才能全部转变成环体。以生成 D4 为主的环状混合物的化



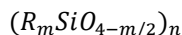
学反应式如下：



此外，二氯硅烷和金属氧化物或含氧无机盐反应也是合成环型硅氧烷单体的一种方法，这种方法比较适合用于合成含较大有机取代基的环型硅氧烷单体，其中氧化锌和氧化铜对于合成D3单体最为有效。二氯硅烷还能和硫酸盐、碳酸盐、碳酸氢盐、硝酸盐的作用来合成环型硅氧烷单体，硫酸盐包括硫酸铜、硫酸锌、硫酸镍和硫酸亚铁等，其反应条件和金属氧化物类似，而碳酸盐如碳酸钠和碳酸钙和二氯硅烷的反应一般在无溶剂的条件下进行，这个反应的温度控制很重要，碳酸钠的反应温度为200~300℃，而碳酸钙则为300~450℃。

### (三) 有机聚硅氧烷高分子化合物

有机聚硅氧烷指的是以Si-O-Si键为主链，硅原子上直接连接有机基团的高分子化合物，其结构通式如下：

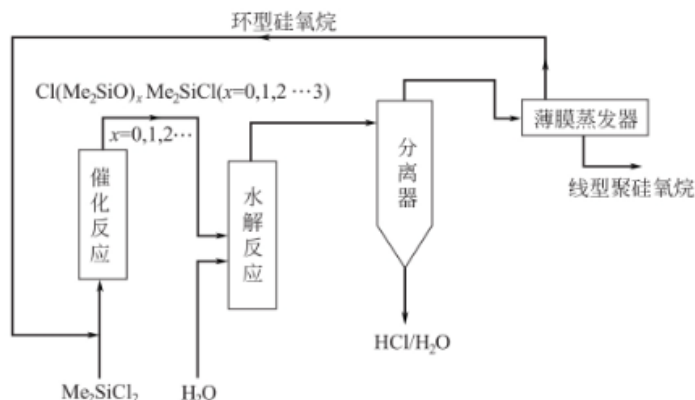


其中，R为有机基团，如甲基、苯基、乙烯基等，n为聚合度。

有机聚硅氧烷的制备方法大体可分为两大类：缩聚反应和开环聚合反应。

缩聚反应是具有两个或两个以上官能团的单体，相互反应生成高分子化合物，同时产生小分子的化学反应，在工业中只有氯硅烷的水解和缩合是制备聚硅氧烷的主要方法之一。氯硅烷的水解包括两个反应过程，首先它水解并生成硅醇，然后硅醇间脱水或和氯硅烷脱氯化氢而缩聚成硅氧烷。线型聚硅氧烷是通过二氯硅烷的水解反应来得到，为了使二氯硅烷能完全转化为羟基封端的线型聚硅氧烷，工业中采用连续水解的方法，这是利用在催化剂存在的条件下硅氧键会产生断裂并形成平衡体系的原理，让从反应体系中分馏出来的环型低聚硅氧烷在酸催化条件下和二氯硅烷反应，从而形成二氯封端的线型聚硅氧烷。通过有机氯硅烷水解得到的线型聚硅氧烷的分子量对于大多数应用来说太低，它们还必须通过端硅醇基进一步缩合来提高分子量，这个反应可以用酸或碱来催化，该反应还可以在用磺酸表面活性剂（如十二烷基苯磺酸）稳定的水乳液中进行，该表面活性剂同时也是缩聚反应的催化剂。在温和的反应条件下即可得到数均分子量高达 $10^6$ 的高分子量聚合物。

图表 9：连续水解法生产羟基封端的线型聚二甲基硅氧烷工程示意图



资料来源：《有机硅材料基础》（朱晓敏，章基凯），宏源期货研究所

开环聚合反应是一种加聚反应，即在反应过程中并不放出小分子副产物，因此加聚物的化学组成和起始单体相同，和缩聚反应相比，通过开环聚合能很好地控制产物的结构和分子量，并能得到较高分子量的化合物。环硅氧烷的开环聚合是目前制备聚硅氧烷最重要的一种方法，如高温胶和硅油等大都是通过这种方法来合成的。在大量的环型硅氧烷单体中，八甲基环四硅氧烷（D4）和六甲基环三硅氧烷（D3）是两个最重要的合成线型聚硅氧烷的单体。

根据活性增长中心的结构，环硅氧烷的开环聚合分为阴离子型或阳离子型。环硅氧烷阴离子聚合的引发剂主要是无机或有机强碱，如果用其它引发剂，聚合反应后需要用酸来中和，或用氯硅烷来封端，否则产物易裂解；环硅氧烷阳离子聚合可在室温下以适宜的速率进行，并且引发剂易于从聚合物中除去，这种方法在合成含有在碱性条件下不稳定取代基的聚硅氧烷时特别有用的。

环硅氧烷开环聚合通常有两种方法，常用的是平衡聚合，但它限于平衡聚合产率相对高的体系，另一种方法是非平衡聚合，即在达到平衡之前就把聚合反应的活性增长中心猝灭。平衡聚合也被称为热力学控制聚合，指的是在平衡状态下进行的聚合，这种聚合一般是由于在合成高分子量聚合物的同时，也会发生大分子断链降解过程，最后使聚合物分子分布达到平衡状态，按照定义，这种状态不依赖于所用单体和引发剂。

环硅氧烷的平衡聚合是工业上合成线型聚硅氧烷最重要的方法，在平衡聚合中，产物的分子量可通过引发剂的浓度来调节，但较精确地控制则是采用加入封端剂的方法，其用量需要大大超过引发剂的量，通过加入含功能团的封端剂，可以实现链端基功能化。另外，平衡聚合法也可以用来合成各种无规共聚物。

以生产硅橡胶生胶的原料——高分子量线型聚硅氧烷为例：聚合过程包括原料计量、脱水、配料、聚合、破煤、脱低分子、冷却、出料等操作，生产中出料大多采用螺杆逆向带出法或氮气压料法，但必须注意物料的冷却，以保障产品的出厂质量。

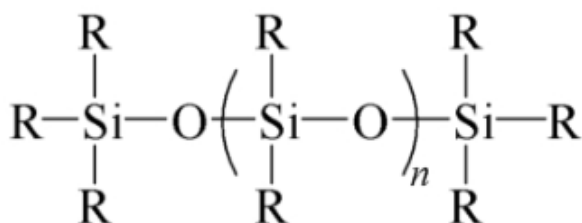
### 三、四大类主要有机硅产品介绍

#### （一）硅油

硅油通常是指在室温下是液态的有机聚硅氧烷产品，一般无色（或淡黄色）、无味、无毒、不易挥发、不易燃烧，具有典型的有机聚硅氧烷的特性，包括：耐高低温、抗氧化、黏温系数低、抗剪切、低蒸气压、低表面张力、憎水、电气绝缘及生理惰性。

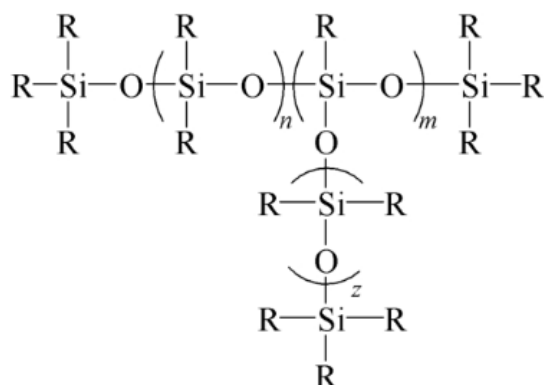
硅油可以是线型，也可以支链型，在实际应用中，主要是线型硅油为主，支链型硅油不太常见。硅油依其结构可基本分为烃基硅油、硅官能基硅油、碳官能基硅油和含非活性有机聚合物链段硅油四类，习惯上，人们将前两类硅油称为线性硅油或普通硅油，将后两类硅油称为改性硅油，若依反应活性分类，则烃基硅油、含非活性有机聚合物链段硅油为惰性硅油，硅官能基硅油、碳官能基硅油为活性硅油。

图表 10：线性硅油分子结构式



资料来源：《有机硅材料基础》（朱晓敏，章基凯）；宏源期货研究所

图表 11：支链型硅油分子结构式



资料来源：《有机硅材料基础》（朱晓敏，章基凯），宏源期货研究所

硅油可作为产品直接使用，如用作绝缘油、传动油、导热油、真空泵油及刹车油等，当然它们会含有少量的添加剂，如抗氧化剂。这些产品一般被称为硅油的一次制品，主要包括有机硅消泡剂、有机硅脱膜剂和硅油织物整理剂三大类产品。

消泡剂又称为抗泡剂，用于抑制或消除各种生产过程中产生的有害泡沫，有机硅消泡剂广泛用于石油、化工、电镀、印染、纸浆/造纸、制糖、发酵、医药、医疗、食品、水及废水处理等领域。

在橡胶、塑料制品生产、精密压铸、食品制造过程时，使用脱膜剂可以防止成品与模具材料黏着，使其容易脱膜，分为非反应硅油型、树脂型和橡胶型三种形态，可根据用途进行选择，可直接使用，也可以配成溶液、乳液、脂膏等二次加工制品使用。

有机硅织物整理剂具有良好的综合性能，不仅可以满足耐磨、耐撕裂、耐折皱、挺括、洗后免熨烫，而且手感柔软，富有弹性及超级滑爽，还可减少 20%~50% 的树脂消耗量，并使织物的吸水率降低，缩短干燥时间，从而节省能源，有机硅织物整理剂按其形态可分为溶解于有机溶剂的溶液型和乳化分散在水中的乳液型两类，目前用的最多的是乳液型，按其用途可分为防水剂、弹性整理剂、纤维润滑剂和柔软剂四类。

以硅油为主要原料，加入各种性能改进剂，经过特定工艺配制成的复合物、溶液、乳液等制品，则被称为硅油的二次加工制品，硅油经二次加工后，产品形态和性质均发生变化，从而拓宽了硅油的应用范围，硅油的二次加工制品主要包括以下两种：

## 1. 硅脂和硅膏

硅脂和硅膏是指以硅油为基础，加入增稠剂、稳定剂及其它添加剂后经混合研磨加工而成的脂状机械混合物，两者无严格区别。

硅脂有无味、无毒、闪点高、凝固点低、蒸汽压低等特点，它还具有较高的耐温性和低的黏温系数，良好的机械稳定性和抗水性，优良的氧化稳定性、润滑性和电绝缘性能。

在温度变化时，硅脂的黏度变化很小，而且温度对它的体积电阻影响也不大。

硅脂可溶解在芳香类溶剂中如苯、甲苯、二甲苯或含氯溶剂如三氯乙烯等，但不溶于甲醇、乙醇、丙酮、乙二醇及甘油等。

硅脂对铁、铜、钢、铝及其合金没有腐蚀性，在天然橡胶、合成橡胶、酚醛树脂、三聚氰胺树脂、醋酸纤维素等表面用硅脂涂层，外观没有显著变化。

硅脂在塑料、橡胶、木材与金属间的润滑性很好，而在玻璃与玻璃之间的润滑性能也不错。

硅脂按其使用目的分类，有润滑脂、脱膜脂、绝缘脂、密封脂、真空脂，散热脂，减震脂等。

## 2. 有机硅乳液

乳液是指一相液体以液滴状态分散于另一相液体中形成的非均相液体分散体系。根据连续相和分散相的不同，基本可以分成油包水型和水包油型两种乳液，大多数为水包油型，前者连续相为油脂，分散相为水溶液，而后的连续相为水溶液，分散相为油脂。除了上述这两类外，还有复合乳液，即水相和油相互为内外相，层层交替所形成的乳液，这种乳液一般存在于原油中，不太常见。乳液广泛应用于工业生产和日常生活中。但如果将两种纯的、互不相溶的普通液体混在一起，无论如何搅拌，一般最终不能形成稳定的乳液，而如果在其中加入少量称为乳化剂的表面活性剂，就能得到稳定的乳液。

水包油型有机硅乳液的合成方法主要有两种：一是把已制备好的有机硅高分子与水 and 乳化剂作用，即可得到有机硅乳液，这种方法的优点是操作简单方便，适合大规模生产，但对于高分子量有机硅而言，由于黏度大而难以乳化，把有机硅高分子分散到水相中通常用的方法是机械乳化法，比如用胶体磨、均质机或超声波等把硅油打成小液滴并均匀分散在水中，乳液的稳定性取决于油相的黏度和含量，还有就是乳化剂，机械乳化法所用的乳化剂一般为非离子型。第二种方法是乳液聚合，即把有机硅单体如 D3 或 D4 分散在水中，然后在乳化剂和引发剂并存的条件下进行聚合而成，由于聚合和乳化一步完成，因而耗时少、效率高，而且得到的乳液颗粒均匀，稳定性较高，此外，在乳液聚合中也可以通过控制聚合反应条件来控制产物的分子量，或通过共聚引入各种功能基团。

含有机硅的油包水型乳液，其油相以硅油为主，通常可含有矿物油、地蜡等其他成分，而水相中则可以加入醇、无机盐等极性物质。油包水型有机硅乳液在化妆品行业获得广泛的应用，如用于干爽型化妆品、护肤品（如胭脂、眼影、眉笔、防汗剂、防晒油、护肤霜、沐浴露）等产品中，能改善油性化妆品的黏性感，赋予皮肤光滑、柔软、干爽、舒适的感觉。而如果将水包油型有机硅乳液用于皮肤上，由于水、醇的蒸发热远大于挥发性的有机硅化合物，所以会使皮肤有湿、冷、发黏的感觉，油包水型硅油乳液通常由亲油性的聚醚改性硅油作乳化剂这样可以避免有机乳化剂对皮肤产生的刺激。有机硅抛光剂有良好的延展性、舒适的美感光泽以及抗污染、抗腐蚀等性能，而在抛光剂中，尤其是在家具抛光剂中，油包水型有机硅乳液也得到广泛的应用。

## （二）硅橡胶

硅橡胶是最重要的有机硅产品之一。制备硅橡胶的原料通常由线型聚硅氧烷（硅橡胶生胶，简称硅生胶）、补强填料、交联剂、催化剂、改性添加剂等组成，按照硫化方法和硫化条件的不同，硅橡胶一般可分为高温硫化（HTV）硅橡胶和室温硫化（RTV）硅橡胶两大类型，按照产品形态与混配方式不同，高温硫化硅橡胶又分为高黏度硅橡胶（HCR）和液体硅橡胶（LR）。高黏度高温硫化硅橡胶约占全世界硅橡胶市场份额的 80%，而液体硅橡胶和室温硫化硅橡胶则各



占 10%左右，而通过光照进行固化的硅橡胶是一类相对较新的硅橡胶产品，目前其市场份额还相对较小。

硅橡胶具有很高的热稳定性和优异的低温性能，能在-60~260℃温度范围内保持柔软性、回弹性、表面硬度和机械性能，此外，它们还具有优良的电绝缘性、耐候性、耐臭氧和透气性，而且无毒无味，一些特殊结构的硅橡胶还有优异的耐油、耐溶剂、耐辐射等特性。

图表 12：硅橡胶与其他有机橡胶的性能比较

橡胶	全自动生产	无废生产	化学稳定性	低温弹性 (<-40℃)	热稳定性 (>200℃)	染色性
热塑橡胶	极好	极好	好/差	差	差	好
乙丙橡胶	好	差	好/差	差	差	差
天然橡胶	差	差	差	差	差	差
聚氨酯橡胶	好	好	好	差	差	极好
硅橡胶	极好	极好	好	极好	极好	极好

资料来源：《有机硅材料基础》（朱晓敏，章基凯），宏源期货研究所

## 1. 高温硫化（HTV）硅橡胶

高温硫化硅橡胶（以下简称高温胶）是由高摩尔质量的线性聚硅氧烷，加入补强填料，各种添加剂和硫化剂后，经混炼均匀，在高温下硫化而成的弹性体，其制造一般分为三个阶段：一是从有机硅中间体（例如环硅氧烷）出发合成高摩尔质量（40 万~80 万）的线性聚硅氧烷（生胶）；二是以生胶为骨架材料，加入填料、结构控制剂、各类添加剂及硫化剂等制成混炼胶；三是将混炼胶通过模压、挤出、注射成型等加工方法，在高温下硫化成弹性产品。

高温硫化硅橡胶的应用制品主要包括模压制品（如各种胶板、垫圈、垫片、薄膜、胶辊、电子电器的按键，用于特种场合的各种模具橡胶制品等），挤出制品（如各种胶管、胶绳、型材、电线电缆包皮、胶条等），胶布制品（如密封垫、膜片、自黏布、隔离布等），广泛应用于航天、航空、电子、电气、机械、汽车、日用密封、医疗卫生等国民经济和人们生活的各个领域，并在国防军工、高技术产业中发挥着重要作用，

## 2. 室温硫化（RTV）硅橡胶

室温硫化硅橡胶，简称室温胶，是 20 世纪 60 年代问世的一种有机硅弹性体。这种橡胶最显著的特点是在室温下无须加热、加压即可固化，使用极其方便，因此一问世就得到迅速发展。和高温胶一样，室温硫化硅橡胶也是由基础胶、补强填料、交联剂、催化剂和其它添加剂组成。作为基础胶的聚合物的分子量大大低于用以制造高温胶的聚合物的分子量。

根据配方的不同，室温胶硫化可以通过活性基团的缩合/分解或加成反应来进行，按硫化反应机理室温胶可分为缩合型和加成型两种，而按包装贮存形式又可分为单组分和双组分两种，单组分室温硫化硅橡胶是缩合型的，而双组分室温胶有缩合型和加成型两种。

单组分室温硫化硅橡胶：单组分室温硫化硅橡胶是以低分子量的羟基封端聚有机硅氧烷为基础胶（最常见的基础胶为 107 胶），并配以填料（和高温胶一样有白炭黑、碳酸钙、钛白粉等）、交联剂、催化剂和其它添加剂，在无水条件下把所有成分混合均匀，然后包装在密闭容器中，使用时取出，借助空气中的水分发生缩合反应，从而形成交联弹性体。这种缩合硫化体

系的特点包括恒温反应、释放出可挥发低分子化合物、在水分不够时硫化会受到抑制等。根据交联体系的不同，单组分室温胶分为脱羧酸型、脱肟型、脱醇型、脱酰胺型、脱胺型、脱丙酮型和脱羟胺型等型号，不同的型号的室温胶有不同的性能特征和用途。

- ✓ 脱酸型是历史最悠久、也是目前价格最低廉的一种单组分室温硫化硅橡胶，它使用广泛，最主要的缺点是其固化过程的副产物醋酸有刺激性气味，并对金属有腐蚀性，而且不适合水泥制件的黏结（因醋酸与硅酸盐的作用，橡胶与混凝土之间形成一层白垩土层而失去粘接力）。脱酸型室温胶，可以不加催化剂，但为了更快的固化，常加有机锡化合物。
- ✓ 脱肟型从各方面来看是综合性能最好的制品，所以现在使用最多。但因为既有独特的臭味，又对铜有腐蚀性，因而其应用受到一定的限制，脱肟型室温胶中通常要加入少量催化剂，比如有机锡化合物（二月桂酸二丁基锡、辛酸亚锡等）等。
- ✓ 脱醇型室温胶主要用于电气绝缘方面，但与其它类型相比，其硫化速度太慢。
- ✓ 脱丙酮型室温胶的硫化速度快，最适于作电气绝缘之用，其硫化也须用催化剂，如钛酸酯、含胍基硅烷等。
- ✓ 脱胺型和脱羟胺型室温胶主要可用作建筑密封胶。
- ✓ 脱酰胺型硫化弹性体模量低，大多用于移动范围大的接缝密封。

图表 13：各种单组分室温硫化硅橡胶的性能比较

单组分室温胶种类	优点	缺点
脱羧酸型	强度高，粘接性优良，透明度高，硫化快	副产品醋酸有刺激性气味，并对金属有腐蚀性
脱肟型	几乎无臭味，粘接性一般	副产品肟会腐蚀铜类金属，同时还侵蚀部分塑料
脱醇型	无臭性，也无腐蚀性	硫化速度慢，难保存
脱胺型	不侵蚀碱性材料	有独特的胺的臭味，腐蚀铜
脱丙酮型	无臭，无腐蚀性，硫化快	合成工艺复杂，成本高
脱酰胺型	硫化快，粘接性良好，硫化弹性体模量低，相对伸长率高	强度低
脱羟胺型	硫化快，粘接性良好，硫化弹性体模量低	强度低

资料来源：《有机硅材料基础》（朱晓敏，章基凯），宏源期货研究所

缩合型双组分室温硫化硅橡胶：缩合型双组分室温硫化硅橡胶的生胶通常也是羟基封端的聚硅氧烷，但其硫化反应不是靠空气中的水分，而是靠催化剂来进行引发。因为它的硫化不需要空气中的水分，所以能深度固化，而不受胶层厚度的限制。缩合型双组分室温胶用的交联剂用量较小，体系中多余的活性基团不多，所以固化后对异种材料具有极好的脱模性。而且硫化胶强度较高，可将其用于制模和制造模型制品。按照交联剂的不同，缩合型双组分室温硫化硅橡胶分为脱醇型、脱羟胺型、脱氢型和脱水型四种。

加成型室温硫化硅橡胶：加成型室温硫化硅橡胶有弹性硅凝胶和硅橡胶之分，前者力学强度较低，而后者强度较高。有机硅凝胶中一般不含或含很少量的填料，所以其透明度相当高。而且这种凝胶可在-65~200℃温度范围内长期保持弹性，它具有优良的电气性能和化学稳定性、耐水、耐臭氧、耐气候老化、憎水、防潮、防震、无腐蚀，且具有生理惰性、无毒、无味、易于灌注、能深部硫化、线收缩率低、操作简单等优点，所以，硅凝胶在医疗保健、电子工业、



汽车工业等领域有广泛的应用。高强度的加成型室温硫化硅橡胶由于线收缩率低、硫化时不放出低分子，因此是制模的优良材料，在机械工业上已广泛用来制造环氧树脂、聚酯树脂、聚氨酯、聚苯乙烯、乙烯基塑料、石蜡、低熔点合金、混凝土等的模具。加成型室温硫化硅橡胶的高仿真性、无腐蚀、成型工艺简单、易脱模等特点，使它适用于文物复制和美术工艺品的复制。

### 3. 液体硅橡胶（LR）

液体硅橡胶是相对混炼型半固态高黏度硅橡胶和常见室温硫化单组分硅胶而言的一类黏度较小的有机硅橡胶，所有的液体硅橡胶都是加成硫化型，这类胶不仅流动性好，而且还具有硫化快等特点。液态硅橡胶可以常温固化，也可以高温固化，其高温固化可以在数秒钟内完成。液体硅橡胶一般用于浇注成型、注射成型和织物涂层等领域。由于其硫化速度快、生产自动化程度高和无废料生产等众多优点，它在许多领域有取代高黏度高温硫化硅橡胶和室温硫化硅橡胶的趋势。在最近 20 年的时间里，液体硅橡胶的主要创新方向是加快其硫化速度和增加产品品种，比较新的品种包括高撕裂强度、无后处理、耐热、抗冷却剂、自润滑、耐油、自黏、导电（抗静电）和阻燃等液体硅橡胶。

### 4. 光固化硅橡胶

光固化是指单体、低聚体或聚合物基质在光诱导下的固化过程，一般用于成膜过程，光固化技术是一项高效节能和清洁环保型技术，它节约能源——能耗仅为热固化的 1/5。光固化硅橡胶的用途很广泛，在很多方面可以取代室温硫化硅橡胶，甚至部分高温胶。目前光固化硅橡胶最主要的用途是密封、黏结和涂层，其中包括电子元器件与组合件的包封和灌封，光纤的预涂层涂料，纸张和塑料的隔离涂层等，而硅氢加成型光固化硅橡胶还能通过挤出法生产医用硅胶软管。

## （三）硅树脂

硅油和硅橡胶的结构主体为由二官能度硅氧烷组成的聚二烷基硅氧烷链，而硅树脂则是含有二官能度、三官能度以及四官能度硅氧结构单元的高度交联的热固性聚合物，与硅油和硅橡胶相比，硅树脂是有机硅材料中问世较早的一类，但硅树脂的品种相对较少，市场份额也较小。但由于许多独特的性能，硅树脂在很多应用领域是其它材料所不能替代的。根据发生固化反应的条件，硅树脂还可分为加热固化型、常温干燥型、常温固化型和光固化型四种类型；按照产品的形态分类，硅树脂还可分为溶剂型、无溶剂型、水溶液型、水乳液型，溶剂型硅树脂是最主要的产品形态；另外，硅树脂按其用途大致可分为有机硅绝缘漆、有机硅涂料、有机硅塑料和有机硅黏合剂等几大类。

硅树脂是一种热固性塑料，最突出的性能是热氧化稳定性和电绝缘性能，此外，硅树脂还具有卓越的耐潮、防水、防锈、耐寒、耐臭氧和耐候性能，对绝大多数含水的化学试剂如稀矿物酸的耐腐蚀性能良好，但耐溶剂的性能较差。鉴于其上述特性，有机硅树脂主要作为绝缘漆（包括清漆、瓷漆、色漆、浸渍漆等）来浸渍 H 级电机及变压器线圈，以及用来浸渍玻璃布、玻布丝及石棉布后制成电机套管、电器绝缘绕组等。此外，硅树脂还可用作耐热、耐候的防腐涂料，金属保护涂料，建筑工程防水防潮涂料，脱模剂，黏合剂以及二次加工成有机硅塑料，用于电子、电气和国防工业上，作为半导体封装材料和电子、电器零部件的绝缘材料等。

图表 14：硅树脂同一般有机树脂的性能对比

性能	硅树脂	一般有机树脂
耐热性	由于以硅氧烷键为骨架，因此热分解度高，通常在 250℃以下都稳定	由于以含碳键为骨架，因此在高温下易氧化分解
电气特性	由于耐热性高，因此在高温下其电气性能降低很少，并且随频率变化也极小	在高温下易分解，所以电气性能大大降低，但是，在常温和常态下，具有与硅树脂相同的电气性能
耐水性	高憎水性，因此其涂膜的吸水性小，另外，即使吸收了水分也会迅速挥发而恢复到原来的状态	浸水后电气特性大大降低，吸收的水分难以除掉，电气特性恢复较慢
耐候性	由于不会产生由紫外线引起的自由基反应，也不易被氧化，因此耐候性极佳	除丙烯酸类树脂外，耐候性好的有机树脂不多
机械强度	由于分子间引力小，有效交联密度低，因此机械强度（弯曲、拉伸、冲击、耐擦伤性）较弱	分子间引力大，易定向，有效交联密度大，机械强度高，但在 200℃以上强度急剧下降
耐溶剂性	与机械强度同理，耐各种有机溶剂的能力差	通常比硅树脂优良
粘接性	对金属和塑料等基材的粘接性差	以环氧树脂为代表，对基材的粘接性好
相容性	通常与其他有机树脂的相容性有限	即使与不同种类的树脂也大都能相容，可以混合使用

资料来源：《有机硅材料基础》（朱晓敏，章基凯），宏源期货研究所

硅树脂最主要的产品有涂料、黏结剂、模塑料等。硅树脂也可通过它们的应用温度范围来分类：第一类是 400℃以上，在如此高温下，硅树脂的有机基团会被空气中的氧气氧化，还会产生可挥发成分，并最终生成二氧化硅，它能和其它耐热物质烧结，生成耐更高温的复合材料；第二类是 300℃以下，在此温度下，硅树脂即使长时间使用也能保持它的化学结构基本不变，300~400℃是个比较困难的温度范围，因为在此温度下，有机基团会被氧化，但对烧结过程而言温度又太低；第三类是在室温条件下，在此温度下，硅树脂的润湿和疏水性能就显得非常重要。

## 1. 硅树脂涂料

硅树脂涂料包括有机硅绝缘涂料、有机硅玻璃树脂涂料、耐热耐候的防腐涂料、耐候涂料、脱模涂料、建筑防水涂料、有色涂料七大类。

耐高温绝缘涂料是硅树脂最重要的应用之一，电机及电器设备上需要各种各样的电绝缘材料，而这些通常是涂绝缘涂料的有机或有机材料，所以电气设备的技术水平与绝缘涂料的质量密切相关。电机及电器设备的重量、体积、价格及其使用寿命首先取决于绝缘涂料的性能。电绝缘材料的耐热性越高、电绝缘性能越强，在同等功率条件下，电气设备的体积就可以做得越小，质量越轻，使用寿命却越长。有机硅绝缘材料是性能优良的耐高温绝缘材料，从而使同样功率的电机重量减轻 35%~40%，并且降低了铜和硅钢片的消耗量。

有机硅透明树脂是以甲基三乙氧基硅烷为主要原料，经水解、缩合制得甲基硅树脂预聚体。因其固化后透明度高，外观像玻璃，故又称为玻璃树脂。玻璃树脂可溶于乙醇、丁醇、乙酸乙酯、苯、二甲苯以及酮类等，最常用的溶剂为乙醇，玻璃树脂的使用方法有喷涂、浸涂、辊涂、刷涂、真空喷涂等。在使用前，涂覆的基材表面要进行清洗，以除去杂质和油污，清洗的方法有酸洗、碱洗、水洗、丙酮洗等。对于某些高分子材料，如有机玻璃、聚碳酸酯等，需进行特

定的表面处理。有机硅玻璃树脂的主要特点是坚硬透明，成膜后的薄膜绝缘性能好，并且有耐磨、耐热、耐老化、耐辐射、低温不脆化、疏水、防潮、无毒、透光率强等优点，可作为玻璃、有机玻璃、聚碳酸酯、丙烯酸系塑料、镜头、飞机和汽车上的挡风玻璃板、仿金工艺品、金属化塑料、扑克牌、高级画报等的透明保护涂层。此外，由于玻璃树脂涂层的折射率比任何透明塑料都低，因此可通过降低界面反射来提高透光率，改善光学性能。玻璃树脂还可用作电子电器元件的绝缘和防潮涂层。此外，用玻璃树脂代替环氧清漆和普通有机硅绝缘涂料浸渍小型变压器线圈，可避免因使用上述两种绝缘涂料时，苯类溶剂的中毒和空气污染问题。

有机硅树脂具有优良的耐高温和耐候性能，使其成为高温涂料的理想材料。另外，硅树脂在高温下被氧化成二氧化硅后和绝热材料烧结，形成耐更高温度的复合材料。有机硅涂料除了耐热外，还具有耐候、耐水、耐各种气体和蒸汽、耐臭氧和紫外线等特性。因此，目前已广泛用作烟道气、锅炉、电炉、各种加热器、水泥焙烧炉、石油裂解炉等的耐热防腐涂料，以及用作飞机、导弹、宇航器等的绝热保护涂料。

有机改性硅树脂涂料能经受室外长期暴晒，无失光、粉化、变色等现象，耐候性能非常卓越，而且价格较便宜，能够室外干燥，施工简便。现在主要品种有有机硅改性醇酸树脂、聚酯树脂、丙烯酸树脂、聚氨酯树脂等，分自干型及烘干型两大类，就耐候性能来讲，烘干型优于自干型。自干型醇酸硅树脂耐候涂料，能常温固化，而且价格低廉，使用寿命可达 8~10 年，它多用作维护性涂料，适用于永久性建筑及设备，例如高压输电线路的铁塔、铁路桥梁、货车、石油钻探设备、动力站、农业机械、海洋船舶的水上部分等涂饰保护。有机硅改性聚酯涂料是一种烘干型耐候涂料，主要用于金属板材，建筑用预涂装金属板及铝质屋面板，经户外耐候试验 7 年，仍不需重涂，有机硅改性丙烯酸酯涂料更具有卓越的耐候性能，保光、保色性能也很好，大量用于金属板材的预涂装、预制建筑及机器设备等涂装使用，其户外耐候使用期限可达 15 年。

硅树脂的防粘和脱模性能与硅油类似，其主要差别是：硅树脂脱模剂能够在模具上形成一层半永久性的薄膜，可连续使用几十至几百次不需要更换，而硅油脱模剂则需要经常更换。因此，硅树脂脱模剂比较清洁和耐腐蚀，可以解决硅油脱模剂对制品的沾污问题。硅树脂脱模涂料业已用作烤面包托盘、油炒锅、不粘炊具、塑料橡胶模压制品的模具以及防粘隔离纸带等的脱模剂，由于它具有长使用寿命和其它一些优点，因此目前已取代传统的脱模材料如油脂、矿物油和脂肪酸等。

硅树脂憎水性强，所以可作为防水防潮涂料，可分为水溶液型、溶剂型和乳液型三种类型，广泛用于建筑物防水。有机硅建筑防水涂料具有卓越的防水、防风化、防剥落和耐化学腐蚀等性能。经过有机硅建筑防水剂处理过的建筑物，可保持清洁、不粘尘埃，提高建筑物的隔热、隔声性能，并防止建筑物表面开裂，使建筑物不易风化，从而延长其使用寿命。

有机硅有色涂料是以纯有机硅树脂或改性硅树脂作为基料，加入颜料调制而成的涂料。在建筑上，硅树脂可以作为水性颜料的载体，它几乎能着任何颜色。和普通分散和硅酸盐涂料相比，这种有色涂层防水，能呼吸，并具备硅树脂的所有特性。而有机硅示温涂料则是加入感温变色颜料、耐热及其它填料的纯硅树脂。根据变色颜料的变色温度范围不同，可以制得不同报警温度的示温涂料。它可用于各种高温设备的预警。

## 2. 硅树脂胶粘剂

有机硅胶黏剂可分为以硅树脂为主要成分和以硅橡胶为主要成分两类。由于硅树脂，特别



是含苯基硅树脂拥有特别优良的耐热性，它们可用作高温胶黏剂的主要成分。纯硅树脂为基料的有机硅胶黏剂以硅树脂为基料，加入某些无机填料和有机溶剂混合而成，用以粘接金属、玻璃钢等。固化时需加热和加压。

### 3. 有机硅塑料

热固性有机硅塑料是以硅树脂为基本成分，加以云母粉、石棉、玻璃纤维或玻璃布等填料，经压塑或层压而制成。它们有较高的耐热性，优良的电绝缘性和耐电弧性以及防水、防潮等性能。有机硅塑料按其成型方法不同，主要可分为层压塑料、模压塑料和泡沫塑料三种类型。

有机层压塑料：目前使用最多的是由硅树脂和玻璃布制得的层压塑料，它具有突出的耐热性和电绝缘性能，可在 250℃长期使用，且吸水率低，耐电弧性和耐火焰性好，介电损耗小。有机硅玻璃布层压塑料可用作 H 级电机的槽楔绝缘、高温继电器外壳、高速飞机的雷达天线罩、接线板、印刷电路板、线圈架、各种开关装置、变压器套管等，还可用作飞机的耐火墙以及各种耐热输送管等。

有机硅模压塑料：有机硅模压塑料是由有机硅树脂、填料、催化剂、染色剂、脱模剂以及固化剂经过混炼而成的一种热固型塑料。通常所用的填料有：玻璃纤维、石棉、石英粉、滑石粉、云母等；催化剂为氧化铅、三乙醇胺以及三乙醇胺与过氧化苯甲酰的混合物；常用的脱模剂是油酸钙。根据用途不同，有机硅模压塑料可分为结构材料用和半导体封装用两种类型：结构材料用的有机硅模压塑料习惯上称之为有机硅塑料，它的特点是耐高温、抗潮、机械强度和电绝缘性能随温度变化很小，所以广泛用于火箭、宇航、飞机制造、无线电、电气和仪表工业中用来制作大功率直流电机的接触器、接线板、各种耐热的绝缘材料，以及能在 200℃以上长期使用的仪器壳体和电气装置的零部件，如刷架环、线圈架、电工零件、来弧罩、印刷线路盘、电阻与换向开关、配电盘等；用于封装电子元件、半导体晶体管、集成电路等的有机硅模压塑料具有耐燃、不燃、吸水率低、防潮性好和无腐蚀等特性，在很宽的温度、湿度和频率范围内仍能保持稳定的电绝缘及机械性能，从而使封装的半导体元件免潮气、尘埃、冲击、振动及温度等因素的影响。

有机硅泡沫塑料：有机硅泡沫塑料是一种低密度的具有泡孔结构的材料，它可经受 360℃的高温并且耐燃，是用作隔热、隔声和电绝缘的优良材料。有机硅泡沫塑料可分为两类：一类是粉状的，它加热到 160℃左右即自行发泡；另一类是液态双组分的，室温下即可发泡。有机硅泡沫塑料可用作航天器、火箭等的轻质、耐高温、抗湿材料，也可作为推进器、机翼、机舱的填充材料以及火壁的绝缘等。

## （四）硅烷偶联剂

偶联剂是在塑料配混中改善合成树脂与无机填料界面性能的一种添加剂，又称无机填料的表面改性剂，它在塑料加工过程中可降低合成树脂熔体的黏度，改善填充剂的分散度以提高加工性能，进而使制品获得良好的性能。

硅烷偶联剂最早被用于玻璃纤维增强塑料（玻璃钢）中玻璃纤维的表面处理上，从而使玻璃钢的机械性能、电学性能和抗老化性能得到很大的提高。目前，硅烷偶联剂的用途已经被扩大到各种无机有机复合材料的生产中，它已成为材料工业中必不可少的助剂之一，广泛应用于橡胶、塑料、胶黏剂、密封剂、涂料、玻璃、陶瓷、金属防腐等领域，最大的应用领域是聚合

物复合材料。

硅烷偶联剂的使用方法可分为三种：气相沉积法、溶液沉积法和整体混合法。前面两种方法都是对基材表面进行预处理，所以可以统称为表面打底法（表面预处理法），第三种方法主要用于复合物的合成。

气相沉积法：硅烷偶联剂可以在干燥条件下通过化学气相沉积法来对基材进行改性，通过这种方法一般比较容易得到单分子层。环状含氮硅烷最适用于气相沉积法，它反应最快，反应时间一般少于 5min。氨基硅烷也能较快沉积，在没有催化剂存在的条件下反应时间一般不超过 30min。而别的硅烷偶联剂则需要 2~4h 的反应时间。加入少量有机胺可加快反应速度。

溶液沉积法：溶液沉积法是把硅烷偶联剂配成溶液，然后在液相对基材进行改性。最常用的溶剂是醇水混合物，一般是 95% 的乙醇和 5% 的水，然后用醋酸把 pH 值调到 4.5~5.5。硅烷在搅拌下加入，其浓度一般为 2%，反应 5min 后即可使用。硅烷偶联剂也可以在有机溶剂，如醇中配成 25% 的浓溶液，然后用喷涂法喷到填料上，并在高效固体混合机如增强型双锥式混合机中混合。

整体混合法：整体混合法是把纯硅烷偶联剂在聚合物和填料熔融混合过程中直接加入，让其迁移到填料表面。硅烷偶联剂还可以事先分散在固体载体中，如聚合物或石蜡中，制成含高浓度硅烷的母粒。把它代替纯硅烷可以改善硅烷偶联剂在聚合物和填料混合物熔融态中的分散性，从而提高复合物的产品质量。

## 参考文献:

- [1] 邝澎,李晶.Rochow-M ü ller 反应制备甲基氯硅烷单体工艺的研究进展[J].工业催化,2021,29(03):31-40.
- [2] 常珊. 有机硅单体的合成[D].北京交通大学,2012.
- [3] 温景剑. 有机硅单体合成及表征[D].北京交通大学,2012.
- [4] 苏凯. 有机硅单体合成 Rochow 反应高效铜基催化剂制备及机理探索[D].中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所),2022.DOI:10.27550/d.cnki.ghgys.2021.000059.
- [5] 朱晓敏, 章基凯. 有机硅材料基础[M].北京:化学工业出版社,2013.



**免责条款：**

宏源期货有限公司是经中国证监会批准设立的期货经营机构，已具备期货交易咨询业务资格。

本报告分析及建议所依据的信息均来源于公开资料，本公司对这些信息的准确性和完整性不作任何保证，也不保证所依据的信息和建议不会发生任何变化。我们已力求报告内容的客观、公正，但文中的观点、结论和建议仅供参考，不构成任何投资建议。投资者依据本报告提供的信息进行期货投资所造成的一切后果，本公司概不负责。本报告版权仅为本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布。如引用、刊发，需注明出处为宏源期货，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。

风险提示：期市有风险，投资需谨慎

