

# 有机硅树脂涂料的最新进展



刘国杰

(中国氟硅有机材料工业协会专家委员会, 北京 100029)

## 有机硅树脂涂料分类及应用

有机硅树脂是指分子中含 Si—C 键的有机聚合物, 也称硅树脂、硅酮树脂。对硅氧烷单体和它的预聚物及树脂, 也可统称为有机硅, 以它们为成膜物制备的涂料称为有机硅树脂涂料, 也可简称为有机硅涂料。

### 1. 发展简况

国外有机硅树脂是 1943 年正式开始工业化生产, 随后开始了有机硅涂料的研发。由于有机硅材料应用广、性能优良, 发展较快。目前全球有机硅产品品种上万, 总市场规模约 100 亿美元。

国内在 20 世纪 50 年代开始有机硅产品研发, 60 年代开始有机硅涂料研究, 90 年代出现有机硅产能 1 万 t/a 的企业, 现已发展到数万 t/a 与 10 万 t/a 的企业。2007 年全国溶剂型有机硅涂料消耗量在 1 万 t 以上, 有机硅改性树脂涂料和水性硅丙涂料的用量较大, 但未见统计数据。

### 2. 有机硅树脂涂料的分类

按成膜的类型分类, 可分为纯有机硅树脂涂料和有机硅改性树脂涂料。纯有机硅树脂涂料耐热性能与绝缘性能突出, 在较高温度的环境下显示优良耐候性、防腐性, 也是优良的高温绝缘涂料。有机硅改性树脂涂料包括有机硅改性酚醛、醇酸、聚酯、丙烯酸、环氧、聚氨酯树脂, 根据有机硅材料用量多少, 可以不同程度提高改性树脂的耐热性、耐候性、防腐性及其他性能, 同时也改善有机硅

树脂的成膜性能。

按有机硅树脂涂料是否对环境友好来分类, 有溶剂型和环境友好型。环境友好型有机硅树脂涂料有高固体分有机硅树脂涂料、水性有机硅树脂涂料、辐射固化有机硅树脂涂料。

### 3. 纯有机硅树脂涂料

#### (1) 合成与成膜原理

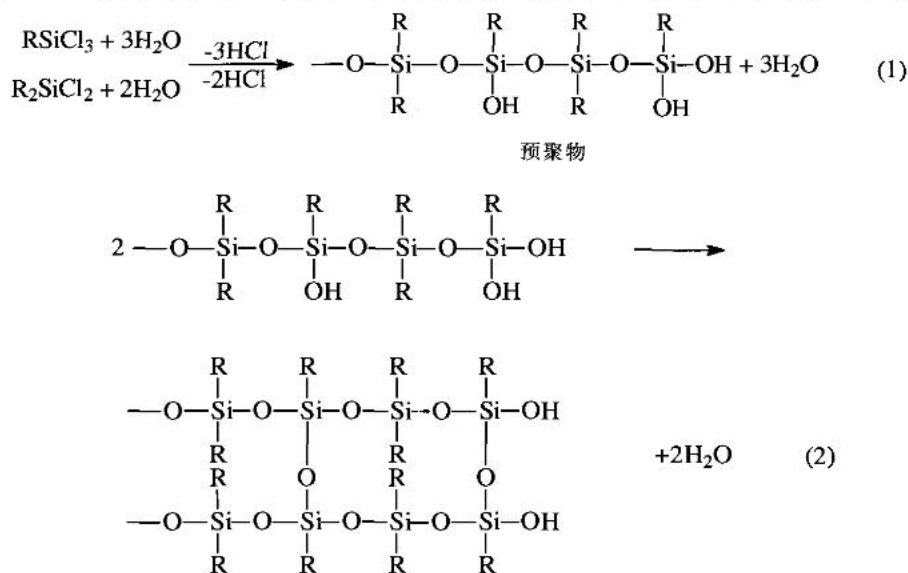
用于制备涂料的有机硅材料 90% 以上是以硅氧键 (—Si—O—Si—) 为骨架组成的 (聚) 硅氧烷, 由有机氯硅烷出发, 经水解缩合及重排, 制成室温下稳定的硅氧烷预聚物。制成的涂料在涂装施工后, 在空气中湿气作用下或加热催化下交联

固化成膜。合成反应及固化反应过程见图 1 (R 代表 CH<sub>3</sub> 或 Ph)。常用的催化剂有月桂酸锌。

#### (2) 耐高温涂料

有机硅树脂最突出的性能是优异的热氧化稳定性, 主要是由于 —Si—O—Si— 为骨架, 清漆可以在 200~250℃ 下长期使用而不分解或变色。在更高的温度下 (如 400℃ 以上), Si 原子上连接的烷基分解 (或燃烧) 掉, 分子间形成新的 —Si—O—Si— 键和 —Si—O—M— 键, 而不是树脂的分解 (图 2)。网络中的 M (金属离子) 是来自耐高温颜料和金属底材。

由于有这一特点, 用甲基硅氧烷树



(1) 预聚物制备; (2) 交联固化成膜

图 1 有机硅预聚物的制备及其固化成膜的反应过程

收稿日期: 2008-04-10

作者简介: 刘国杰 (1939-), 男, 教授级高工, 享受国务院政府特殊津贴, 曾任化工部涂料工业研究设计院副院长、中国化工新材料总公司中西部涂料技术信息中心主任、《现代涂料与涂装》编委会主任兼主编, 公开发表论文 60 余篇。

脂和高含量铝粉（用量在 360g/L 左右）的涂料，使用温度可以达到 649℃；与陶瓷釉料或磁性瓷料配合，使用温度可以到 816℃。这些耐高温的有机硅涂料代表性应用有排烟管、烤炉、马弗炉、高炉（燃烧室）、热交换器、锅炉、烤肉架及器皿、喷气发动机零部件、排气管和其他发动机设备。美国 Tempil 公司生产一种能耐 1370℃ 高温的有机硅消融隔热涂料，商品牌号为 Pyromark2500，用于登月飞船的外表面保护。

适用于 288~316℃ 的白色和彩色的装饰性硅氧烷为基础的装饰性涂料，主要用于工业维护和用于高强度热产光设备、织物干燥器、烘炉以及用于需要耐高温和需要保光保色性好的场所。

耐高温的有机硅树脂涂料要求耐高温的颜填料与之匹配，并且对有机硅树脂无不良影响。白色颜料如使用  $\text{TiO}_2$ ，有机硅树脂涂料可在 350~400℃ 下使用。其他彩色颜料一般采用无机颜料如铁系、铜系、铬系等，但也要考虑重金属对环境的污染。金属颜料可用铝、锌、不锈钢及钛镁粉，对提高耐热性和防腐性有利。体质颜料可用滑石粉、云母粉、碳酸钙、硫酸钡、石膏、硅藻土、二氧化硅等。

### (3) 绝缘涂料

有机硅树脂的另一突出性能是其优良的电绝缘性能，绝缘性等级是 180℃，属 H 级绝缘材料，其介电常数、介质损耗、绝缘电阻在 0~250℃ 之间变化不大（见图 3~5），是一种较好的耐高温电绝缘涂料，可长期在 200℃ 下使用。涂膜具

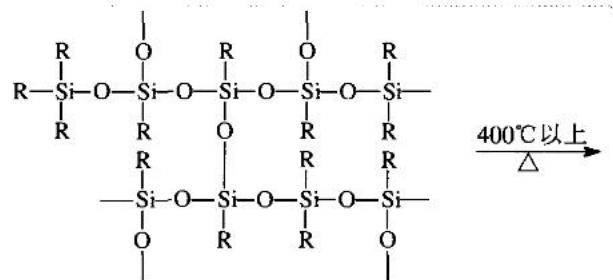
有耐潮湿、耐酸碱、耐辐射、耐臭氧、耐电晕、耐燃、无毒等特性，广泛用于需高温绝缘（H 级）的各种电机、电器的绝缘与保护要求。

### (4) 防粘脱模涂料

除氟碳树脂外，有机硅树脂表面能低于其他各种有机树脂，制成防粘涂料，可长期在 250℃ 下使用。与聚四氟乙烯（特富隆）或其他含氟树脂不粘性涂料相比，虽然防粘性稍逊，但有机硅不粘涂料对铁、铝等基材具有较好的附着力，不产生有害的分解产物，聚有机硅及其改性产品也广泛用于炊具、食品加工机械的防粘涂料，成本也低于氟树脂不粘涂料。全国每年不粘涂料市场价值 2 亿多元，有机硅系列产品占有较大比例。

杜邦公司的特富隆不粘涂料系列产品，由于在合成过程中使用了全氟辛酸铵，是否属于致癌物质尚无定论；使用有机硅系列防粘涂料，目前尚无此类问题产生。

4. 有机硅改性树脂涂料  
有机硅改性醇酸树脂涂料在有机硅用量适当时，耐候性能可提高 4 倍；耐热性能、防腐性能明显增强，使醇酸涂料



低温固化的涂膜

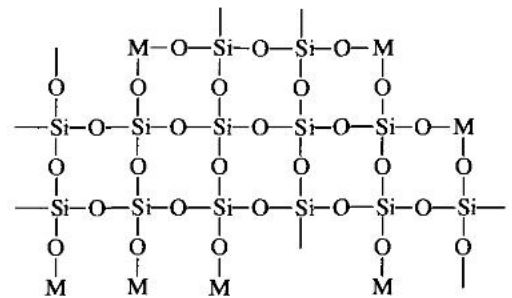


图 2 有机硅涂料在 400℃ 以上进一步产生交联

档次大为提高。有机硅改性聚酯-氨基涂料，其使用温度从 120~150℃ 可以提高到 180~200℃，其耐候性、耐腐蚀性也明显提高。有机硅改性聚酯-氨基涂料一个主要用途是用于卷材涂料，提高其抗酸雨腐蚀性和耐候性，扩大彩板在建筑物外用范围。

有机硅改性丙烯酸树脂涂料，改进其耐寒性、耐水、耐碱性和耐候性，并改善其电性能。用 3-甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷(MPTS)和丙烯酸丁酯、甲基丙烯酸甲酯、甲基丙烯酸正丁酯共聚，MPTS 用量占单体总量的 30% 时，耐候性

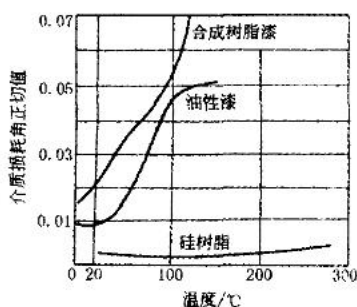


图 3 甲基苯基硅树脂及其他有机漆的介质损耗角正切与温度的关系

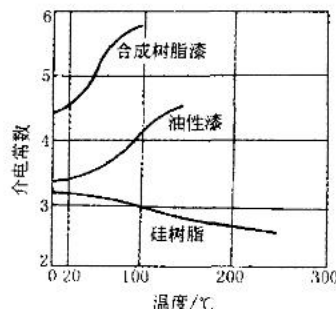


图 4 在 800r/s/50V 下甲基苯基硅树脂及某些有机漆的介电常数与温度的关系

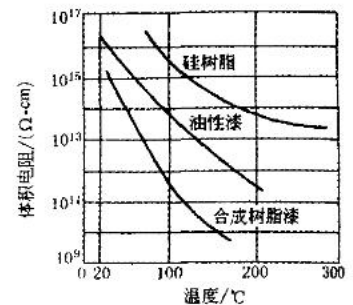


图 5 在 1000V 下甲基苯基硅树脂及某些有机漆的电阻率

优良,其物理性能与综合性能也较好。

氟化改性有机硅涂料,可以进一步降低有机硅涂料的表面能,改进其防沾污性;上述有机硅改性树脂涂料均属于溶剂型的,下面重点介绍水性有机硅改性丙烯酸树脂涂料。

### 5. 有机硅改性丙烯酸乳胶涂料

有机硅改性丙烯酸乳胶涂料可以改进涂料的耐沾污性、耐候性、耐擦洗性,但与改性树脂中有机硅单体的含量成比例。有机硅改性丙烯酸树脂的聚合反应体系中,有丙烯酸单体自聚、有机硅单体自聚和二者之间的共聚反应的竞争,希望二者共聚反应达到要求的程度而不产生沉淀。

#### (1) 反应条件对乳液聚合的影响

经过国内外很多学者的工作证实,有效抑制反应体系中有有机硅单体的水解缩聚是添加二元醇抑制剂,如乙二醇、丙二醇、丙二醇丙醚等;其次是反应温度、pH值、引发剂用量的影响。反应温度在62~74℃、pH值为6~7、引发剂过硫酸钾的用量为0.6%~0.8%时,可得到稳定的有机硅改性丙烯酸乳液。

#### (2) 有机硅单体结构和用量对乳液聚合的影响

有机硅单体空间位阻大,可以减缓其水解缩聚的反应速度。用不同烷氧基的不饱和和硅氧烷在pH值为3.5的水解速率和使用3%硅烷改性丙烯酸乳液的稳定性见表1。乙烯基三异丙氧基硅烷水解速度最慢(约600min),乙烯基三甲氧基硅烷水解最快(约2min),是空间位阻差异所致。

除有机硅单体结构外,有机硅单体的用量对乳液稳定性影响较大。如果不添加水解抑制剂,采用空间位阻大的 $\gamma$ -甲基丙酰氧基三异丙氧基硅烷,其用量占单体总量的10%(质量),可得稳定的硅-丙乳液;其他位阻较小的硅氧烷,用量占单体总量5%(质量)以上时,乳液中就有凝胶产生。

改性的硅-丙乳液性能与硅氧烷在单体总量中所占比例有关。采用水解抑制方法可使硅氧烷单体占单体总量的

30%(质量)以上。硅氧烷含量对涂料性能影响见表2。

从表2中看出,当硅氧烷单体占单体总量20%时,涂料性能改进明显,体现了高性能;人工老化1000h,变色1~2级。这是普通纯丙烯酸乳液涂料无法达到的。在天然曝晒一年后,各色硅-丙乳液涂膜的变色 $\Delta E$ 在0.48~0.85;而纯丙烯酸乳液涂膜变色 $\Delta E$ 在0.95~1.80,硅-丙乳液涂膜抗变色性的改进明显。

虽然改性丙烯酸酯乳胶树脂性能是与树脂中硅氧烷含量成比例,但树脂的原料成本也随硅氧烷含量增加而明显上升,工艺控制难度也加大;添加二元醇抑制剂,可以解决工艺控制问题,但增加了涂料中的VOC。另外,硅氧烷用量增加过多,控制稍不恰当,涂膜易开裂。综合考虑,在改进性能达到要求的前提下,硅氧烷单体用量应尽量减少。

近来浙江大学的W Zhang和M J Yang对硅氧烷用量对涂料性能影响进行了研究,用丙烯酸丁酯(BA)、甲基丙烯酸甲酯(MMA)、丙烯酸(AA)、甲基丙烯酰氧丙基三甲氧基硅烷(MPTS)和聚二甲氧基硅氧烷(HDMPS)等单体,分别采用间歇法和半连续法工艺聚合,硅氧烷单体占单体总量分别为0%、4%、8%、12%、16%和20%,分别合成共聚乳液,并制成白涂料。经户外曝晒15个月后,保光率是随硅氧烷在单体总量中比例增加而增

加;UV辐照500h后,保光率和户外曝晒试验结果相似,硅氧烷占8%和20%的配方的保光率均在80%以上。涂膜拉伸强度、耐沾污性和20%的配方相当。综合各方面考虑尤其是从涂料的性价比考虑,硅氧烷单体在总单体量中占8%可以获得耐候性、耐沾污性优良的外墙装饰涂料,工艺上是半连续法优于间歇法。

### 6. 涂料用的有机硅助剂

有机硅助剂在涂料中广泛应用,如对颜料的润湿分散;涂料的抑泡、消泡;湿膜的流平、消除涂膜弊端;涂膜的消光、增光。特别是硅烷偶联剂,不仅可以作为多种用途的助剂,含官能基的硅氧烷偶联剂可以改性其他有机硅树脂,促进涂层对基材、层间的附着力,取代六价铬进行表面处理,对改进涂料与涂膜性能起着特殊作用。

## 硅氧烷在无铬表面钝化处理中的特殊应用

金属表面在清洁之后进行磷化处理,然后用铬酸盐或 $Cr_2O_3$ (铬酐)钝化,在金属表面生成一层致密的钝化薄膜,可以进一步提高涂料的附着力和防腐蚀性能。采用铬钝化铝合金表面,在钝化工序产生 $Cr^{6+}$ 的废水, $Cr^{6+}$ 是致癌物,增加废水处理难度,也容易造成污染。开发代替铬钝化剂的转化型涂层是国内外涂料涂装技术界致力研究的课题。

表1 不同有机硅氧烷对乳液稳定性的影响

硅氧烷类型	水解时间/min	凝胶量/%
乙烯基三甲氧基硅烷	约2	2.15
乙烯基三乙氧基硅烷	约30	1.75
乙烯基-三-(2-甲基乙氧基)硅烷	约10	0.97
乙烯基三异丙氧基硅烷	约600	0.015

表2 硅氧烷在单体总量中的比例对涂料性能影响

涂料性能	硅氧烷含量/(%) (质量)				
	5	10	20	25	30
人工老化500h(1000h)	5	10	20	25	30
变色/级	3(-)	2(-)	1(1~2)	1(1~2)	1(1~2)
粉化/级	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	1(0)
耐洗刷性/次	>10000	>10000	>10000	>10000	>3000
耐沾污性(15次循环白度下降)/%	10~15	10~15	10~15	<7	<7

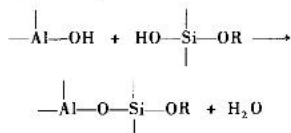
近年来,利用硅氧烷取代铬进行铝合金表面钝化处理,取得了明显进展。

### 1. 硅氧烷用于铝合金表面无铬钝化处理

采用含乙烯基或烯丙基的硅氧烷为前驱体,用溶胶-凝胶技术进行铝合金的无铬表面处理,关键要符合两个要求:①无铬转化型涂层对金属表面具有优良的附着力,对它上层的底漆要有优良的层间附着力;②具有和铬酸盐相同的防腐性能。

#### (1) 附着力

铝合金表面通过磷化处理形成硬的多孔的氧化铝膜,厚度在 50nm 左右。氧化铝层表面在潮湿环境具有有效的羟基密度。这些表面羟基可以参加溶胶-凝胶的缩合反应,如下式:



在铝表面和硅溶胶-凝胶膜之间形成化学键—Al—O—Si—,这些化学键的形成使溶胶-凝胶网络和铝表面产生强相互作用,是对铝合金表面具有较强附着力的基础,示意如图 6。

实验证实,含乙烯基和烯丙基的硅烷的溶胶-凝胶体系均通过了湿附着力的检验。对于用 2-(3,4-环氧环己基)乙基三甲氧基硅烷为基础的溶胶-凝胶体系

的涂膜湿附着力好,而 2,3-环氧丙氧基丙基三甲氧基硅烷为基础的溶胶-凝胶体系的涂膜湿附着力略差,在划线附近的涂膜有轻微的剥离。而乙烯基或丙烯基是疏水的,所以以它们为基础的溶胶-凝胶涂膜湿附着力较好。

#### (2) 防腐性能

一般采用中等溶解度的,如偏钒酸钾、硼酸铈等作为腐蚀抑制剂。用含腐蚀抑制剂偏钒酸钾(0.37%,质量分数)的溶胶-凝胶体系涂覆和固化后的样板的盐雾试验一周没有明显腐蚀,而不同组成的体系在涂装与固化后,盐雾试验 24h 就产生严重腐蚀。

在铝合金样板的下半部涂覆该涂料体系,得到厚度为 10 $\mu\text{m}$  的均匀涂膜,上半部为裸铝板。涂膜固化后,进行盐雾试验 336h 后未发现腐蚀,甚至不添加任何腐蚀抑制剂也是如此。在 130 $^{\circ}\text{C}/2\text{h}$  固化,进行泰伯尔(Taber)耐磨试验(按 ASTM D1044),荷重 500g,200 转后,雾影 <5%,而上半部裸铝产生了明显磨损。

涂覆这种涂料体系的样板浸于异丙醇、乙醇、5% HCl 溶液和 0.1N  $\text{NH}_4\text{OH}$  水溶液中 24h 后,涂膜的外观与硬度无明显变化。

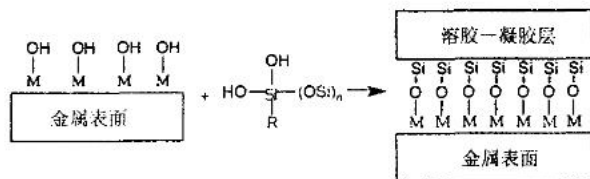


图 6 溶胶-凝胶和铝合金表面相互作用

### 2. 转化型底涂和底漆的一步涂装工艺

进一步利用溶胶-凝胶技术将无铬的转化型底漆和底漆一步涂装,形成有机/无机杂化纳米涂料,这是研究有机/无机杂化纳米涂料的新进展。

金属表面处理和底漆一步涂装工艺,不仅省去了磷化与铬酸盐钝化工序,而且涂膜性能优于先磷化、钝化然后再涂底漆的对比样品,这种一步涂装工艺在国外水性涂料涂装中得到了应用。

采用含环氧基的硅氧烷为前驱体的溶胶-凝胶体系,与环氧树脂形成有机/无机杂化纳米涂料,采用双包装。组分 1 是主要组分,包括硅氧烷前驱体和水性环氧树脂。水性环氧树脂是 Shell 公司的 EPI-REZ<sup>®</sup> 5522-WY-55 或 Deft 公司的 W022,以及二氧化钛颜料与非铬酸盐腐蚀抑制剂。组分 2 是水性环氧树脂的固化剂,Shell 公司提供的 EPI-CURE<sup>™</sup> 8290-Y-60 或 Deft 公司提供的 44W022。用喷涂法将该涂料喷涂于已清洁和去氧化的样板上。试验结果列于表 3。

表 3 水基溶胶-凝胶/环氧树脂杂化涂料体系

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 溶胶液(体系 1)/ Shell EPI-REZ <sup>®</sup> 3522-WY-55	环氧硅烷二氧化铝- 硅酸盐溶胶-凝胶液(体系 3)/ Shell EPI-REZ <sup>®</sup> 5522-WY-55	环氧硅烷溶胶-凝胶液 (体系 4)/Shell EPI-REZ <sup>®</sup> 5522-WY-55	环氧硅烷溶胶- 凝胶液(体系 4)/ deft 44W022
溶胶-凝胶/环氧树脂 固化剂	1:6 Shell EPI-cure <sup>®</sup> 8290-Y-60	1:3 Shell EPI-cure <sup>®</sup> 8290-Y-60	1:1 Shell EPI-cure <sup>®</sup> 8290-Y-60	1:1 Deft 44W022
室温固化	15d	15d	15d	7d
涂膜厚度/ $\mu\text{m}$	37.5	50	50	25
干附着力试验	通过	通过	通过	通过
室温固化湿附着力	通过	失败	失败	失败
80 $^{\circ}\text{C}/2\text{h}$ 固化湿附着力	通过	通过	通过	失败
盐雾试验	用锌盐腐蚀抑制剂 1 个月	无效	无效	无效
耐磨性	好	好	优	优
涂层外观	有光,均匀	有光,均匀	有光,均匀	有光,均匀

功能型硅烷中以缩水甘油醚基丙基三甲氧基硅为用于溶胶-凝胶杂化涂料中的惟一偶联剂。溶胶-凝胶/环氧树脂的有机/无机杂化纳米涂料的固化过程和最后结构如图7。

铝合金主要用于飞机制造和海洋开发等较特殊应用领域,解决其无铬表面处理,减少污染和提高性能意义较大。如推广到整个钢铁的表面处理,在减少污染改进性能方面具有更大意义。

以汽车工业为例,按中国汽车工业协会统计,2007年1~11月中国汽车销售量800余万辆,若按均价10万元/辆计,总销售额8000亿元,按涂料涂装成本占整车价格的3%计,则达240亿元。假定前处理费用占其中10%计则为24

亿元,价值可观。涂装新标准要求处理的磷化液中不含重金属和亚硝酸盐,对环境有毒有害的物质也作了严格限制,环保压力大。据不完全统计,全国每年仅钢铁表面处理(磷化、钝化等)的市场总额超过50亿元人民币,这不包括表面处理产生的废水的处理费用。

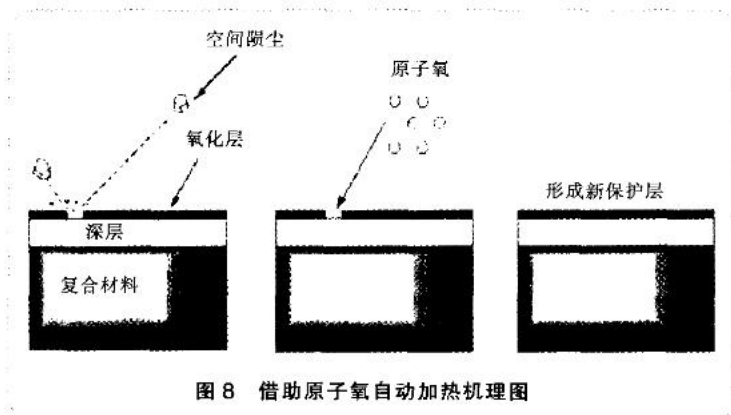


图8 借助原子氧自动加热机理图

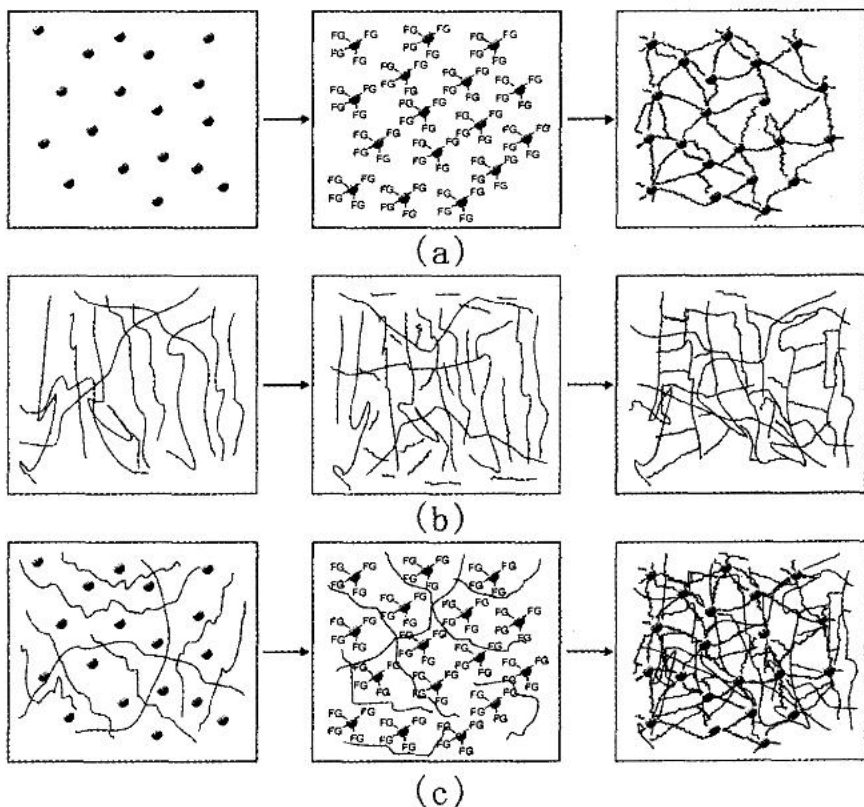
## 硅氧烷在人造卫星涂料中的应用

### 1. 人造卫星涂料的性能要求

随着航天科技发展,低地的、与地球同步轨道的卫星越来越多,卫星飞行寿命要求愈来愈长,因而对卫星保护涂料的耐久性要求越来越高。20世纪八、九十年代研发的有机消融隔热的涂料已不能满足航天技术的发展了。在低地轨道和与地球同步轨道卫星所处条件使有机材料易于降解,是由于高能量UV辐射、地面原子氧,以及卫星飞行的高速度。

在高强度复合材料卫星的外壳基材表面覆盖一层二氧化硅涂层,其受腐蚀的速率比有机聚合物要慢1~2个数量级,对原子氧的抵御力大大提高。当涂层被腐蚀或被太空陨尘和碎片划伤,二氧化硅层能产生自加热作用,使涂层的损坏得以修复,见图8。

由图8可以看出,涂层受空间碎片冲击损坏,经原子氧作用自动加热修复成为新的保护层。设计一种有机/无机杂化纳米复合陶瓷合金涂料,由部分陶瓷(无机)和部分聚合物(有机)构成,是在有机聚合物基体内嵌入金属或硅-氧网络胶束的纳米相簇。利用溶胶-凝胶制备陶瓷合金的技术是使有机相和无机相在纳米范围内协同作用,发挥抵御原子氧降解、高能UV线辐射和空间碎片的冲击,以及由卫星高速度通过大气层摩擦引起的高温。



(a)具有胶粒的溶胶-凝胶网络和带官能基硅烷反应;(b)水稀释环氧树脂为基础的涂料体系反应和固化;(c)杂化纳米涂料体系的反应和固化。

注:FG代表氨基、环氧等官能基;圆球代表溶胶-凝胶纳米粒子;柔软的长线为环氧聚合物;短波纹线代表胺固化剂。

图7 有机/无机(溶胶-凝胶/环氧树脂)杂化涂层固化与结构

## 2. 卫星用的有机/无机纳米复合陶瓷合金涂料

### (1) 纳米复合陶瓷合金涂料结构

纳米复合陶瓷合金由环脂基环氧和烷氧基硅杂化封端的低聚物和溶胶-凝胶前驱体四乙氧基硅烷 (TEOS) 的低聚物, 通过溶胶-凝胶技术原位制成有机/无机纳米复合陶瓷合金。在陶瓷合金涂层中无机纳米相结构加强作用如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 由硅或金属-氧网络胶束的纳米相均匀地分布在有机相中, 形成有机/无机纳米杂化涂层, 如同陶瓷合金一样, 具有抵御原子氧的降解、高能 UV 线辐射、高能粒子冲击的作用, 大大提高涂层的耐久性。硅或金属-氧网络胶束纳米相是溶胶-凝胶前驱体和有机树脂经水解缩合生成。

### (2) 有机/无机纳米复合陶瓷合金的制法

陶瓷合金由有机树脂 (低聚物) 和溶胶-凝胶前驱体组成, 分别合成杂化功能基封端的环脂基环氧化物 (反应过程见图 10) 和 TEOS 的低聚物。

最后所得有机低聚物 I 是由环脂基环氧和三乙氧基硅烷封端, 后者是和溶胶-凝胶前驱体反应的功能基, 而封端的环氧基是提供阳离子 UV 固化的前提。

溶胶-凝胶前驱体——四乙氧基硅烷 (TEOS) 低聚物的合成: 在单颈圆底烧瓶中加入 TEOS (100g)、乙醇 (88g) 和蒸馏水 (8g), 氢氟酸 (0.5g) 在机械混合时滴加。在真空下蒸除溶剂后得到 TEOS 低聚物。产物结构已通过  $^1\text{H}$  NMR 证实。

### (3) 有机/无机纳米复合陶瓷合金涂料的性能

将有机低聚物 I 和溶胶-凝胶前驱体 TEOS 低聚物以一定比例配合, 在蒽和光敏剂存在下 (分别为 0.01% 和 3% 质量) 进行 UV 固化。涂层一旦固化, 形成有机/无机纳米复合陶瓷合金涂膜 (见图 9)。这种涂膜如暴露于原子氧时, 就形成氧化硅保护层, 结合硅-氧网络胶束纳米相, 将防止原子氧、高能粒子和高能 UV 辐射的冲击破坏。由差光扫描量热仪 (PDSC) 测量总反应热进行了确证。

有机/无机纳米复合陶瓷合金涂料用于人造地球卫星的保护涂料, 对其性能、可能具备的结构、制备技术路线、UV 固化速率的影响因素进行了探讨, 对进一步开发该特种功能涂料有重要启示作用。

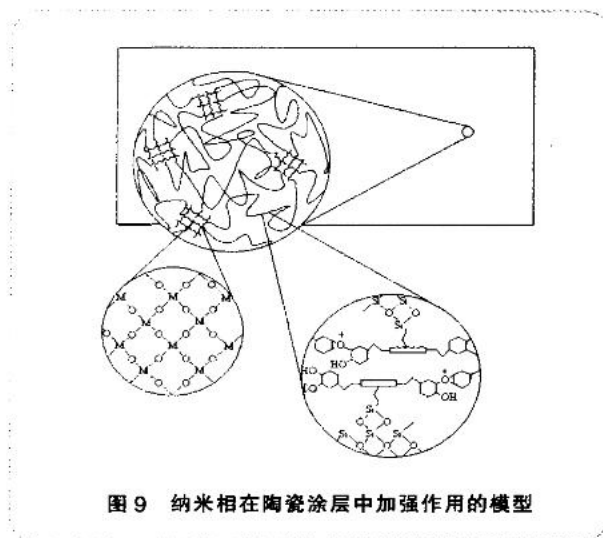


图 9 纳米相在陶瓷涂层中加强作用的模型

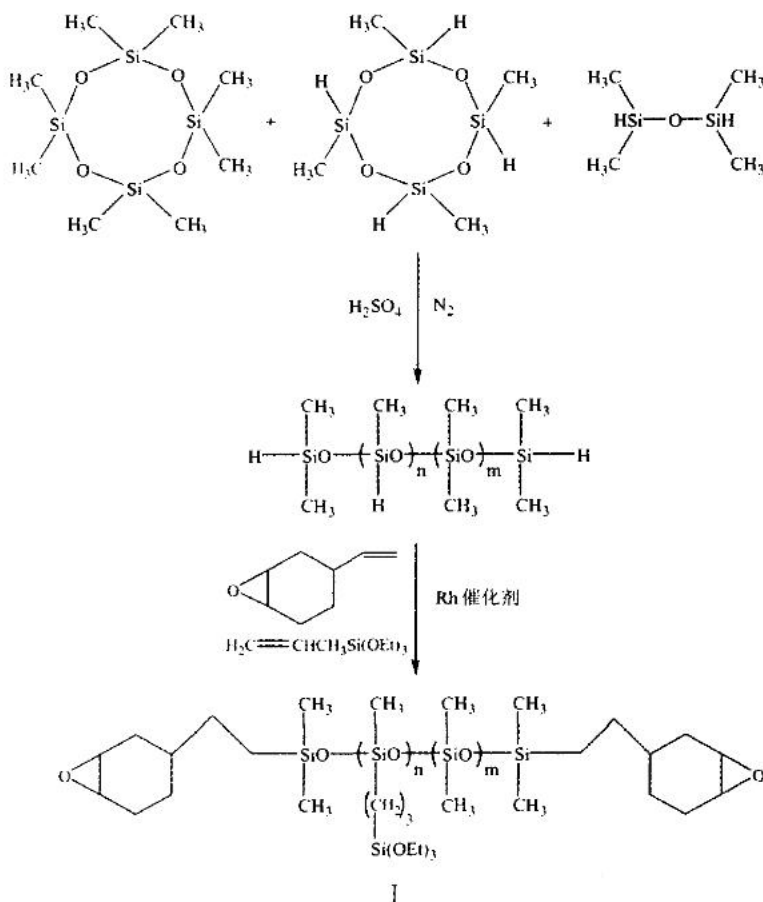


图 10 杂化封端功能基化的聚(二甲硅氧烷-共-甲基硅氧烷)环脂基环氧化物