

偶联剂的生产与应用

熊联明 编著

OULIANJI
DE SHENGCHAN
YU YINGYONG

- 硅烷偶联剂
 - 钛酸酯偶联剂
 - 铝酸酯偶联剂
 - 其他偶联剂



化学工业出版社

熊联明 编著

偶联剂的生产与应用



OULIANJI
DE SHENGCHAN
YU YINGYONG



化学工业出版社

· 北京 ·

《偶联剂的生产与应用》系统讲述了偶联剂生产与应用的相关知识，介绍了偶联剂的种类、结构特征、偶联机理、合成方法、生产技术与应用领域。全书共分五章，包括绪论、硅烷偶联剂、钛酸酯偶联剂、铝酸酯偶联剂和其他偶联剂。

《偶联剂的生产与应用》适合于从事偶联剂研究、生产和应用的研发人员、生产人员与工程技术人员使用，也可供大专院校相关专业师生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

偶联剂的生产与应用/熊联明编著. —北京: 化学工业出版社, 2017. 4

ISBN 978-7-122-28999-5

I. ①偶… II. ①熊… III. ①偶联剂-研究
IV. ①TQ047. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 021146 号

责任编辑: 刘俊之
责任校对: 边涛

文字编辑: 刘志茹
装帧设计: 韩飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印装: 三河市航远印刷有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 7 字数 109 千字 2017 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

偶联剂是一类同时具有两种不同性质官能团的物质，其分子结构的最大特点是分子中含有化学性质不同的两个基团，一个是亲无机物的基团，易与无机物表面起化学反应；另一个是亲有机物的基团，能与合成树脂或其他聚合物发生化学反应或生成氢键溶于其中。因此偶联剂被称作“分子桥”，用于改善无机物与有机物之间的界面作用，从而大大提高复合材料的性能，如物理性能、电性能、热性能、光性能等，并可很大程度上改善材料的加工成型性以及工艺操作性等。事实上，偶联剂已成为材料工业必不可少的助剂之一，被人们形象地称为“工业味精”。

目前，偶联剂已基本上适用于所有无机材料和有机材料的连接表面，在塑料、橡胶、胶黏剂、涂料、纤维、皮革、纸张、金属材料、冶金铸造及建筑等领域得到广泛应用。

为了较全面地介绍偶联剂生产技术和在各行各业中的应用，特编写此书，希望能为广大科学技术人员、生产和应用人员了解有关知识和技术提供帮助，并希望通过有关知识的介绍能对读者有所启发，对促进我国偶联剂技术的研究、生产和应用作出一份贡献。

本书集中了作者多年的偶联剂教学、科研和生产经验，编写时注重简明扼要，注意吸取国内外诸多同类书籍之精华，尤其参阅了书末所列著作与文献。

本书获南昌航空大学学科与教材建设基金资助出版。张艳、李永红、向顺成协助完成了大量图表绘制与文字打印工作。在此一并致谢。

由于作者水平有限，不足之处在所难免，敬请读者指正。

编著者

2016年12月

| | | |
|--------------|---------------------|----------|
| 第 1 章 | 绪论 | 1 |
| 1.1 | 偶联剂的历史 | 1 |
| 1.2 | 偶联剂的性能、结构与分类 | 1 |
| 1.3 | 偶联剂的应用 | 4 |
| 第 2 章 | 硅烷偶联剂 | 6 |
| 2.1 | 概述 | 6 |
| 2.1.1 | 硅烷偶联剂的种类 | 7 |
| 2.1.2 | 硅烷偶联剂的结构特征 | 10 |
| 2.1.3 | 硅烷偶联剂的偶联机理 | 10 |
| 2.1.4 | 硅烷偶联剂的物理与化学性质 | 15 |
| 2.2 | 硅烷偶联剂的合成方法 | 20 |
| 2.2.1 | 硅氢加成法 | 20 |
| 2.2.2 | 直接合成法 | 21 |
| 2.2.3 | 格氏法 | 21 |
| 2.2.4 | 由卤代硅烷脱 HX 法 | 21 |
| 2.2.5 | 醇解法 | 21 |
| 2.3 | 硅烷偶联剂的生产 | 22 |
| 2.3.1 | 烃基烷氧基硅烷类 | 22 |
| 2.3.2 | 乙烯基硅烷类 | 24 |
| 2.3.3 | 氨基硅烷类 | 28 |
| 2.3.4 | 环氧烃基硅烷类 | 31 |
| 2.3.5 | 丙烯酰氧基硅烷类 | 34 |
| 2.3.6 | 含硫硅烷类 | 35 |

| | | |
|-------|----------------------------------|----|
| 2.4 | 硅烷偶联剂的应用 | 36 |
| 2.4.1 | 硅烷偶联剂的选择及使用方法 | 36 |
| 2.4.2 | 硅烷偶联剂在热固性复合材料中的应用 ... | 41 |
| 2.4.3 | 硅烷偶联剂在热塑性复合材料中的应用 ... | 43 |
| 2.4.4 | 硅烷偶联剂在橡胶中的应用 | 45 |
| 2.4.5 | 硅烷偶联剂在涂料中的应用 | 47 |
| 2.4.6 | 硅烷偶联剂在胶黏剂中的应用 | 48 |
| 2.4.7 | 硅烷偶联剂在金属表面处理中的应用 | 49 |
| 2.4.8 | 硅烷偶联剂在聚合物改性和功能材料制备 中的应用 | 51 |

第3章 钛酸酯偶联剂

54

| | | |
|-------|---------------------------|----|
| 3.1 | 概述 | 54 |
| 3.1.1 | 钛酸酯偶联剂的种类 | 55 |
| 3.1.2 | 钛酸酯偶联剂的结构特征 | 56 |
| 3.1.3 | 钛酸酯偶联剂的偶联机理 | 57 |
| 3.2 | 钛酸酯偶联剂的合成方法 | 60 |
| 3.2.1 | 交换法 | 60 |
| 3.2.2 | 螯合聚合合法 | 60 |
| 3.2.3 | 季铵盐法 | 62 |
| 3.2.4 | 配位法 | 63 |
| 3.3 | 钛酸酯偶联剂的生产 | 64 |
| 3.3.1 | 单烷氧型钛酸酯(KHT-103)的合成 | 64 |
| 3.3.2 | 磷酸酯型钛酸酯(KHT-201)的合成 | 64 |
| 3.3.3 | 螯合型钛酸酯(KHT-303)的合成 | 65 |
| 3.4 | 钛酸酯偶联剂的应用 | 65 |
| 3.4.1 | 选择标准 | 66 |
| 3.4.2 | 使用方法 | 66 |
| 3.4.3 | 钛酸酯偶联剂与硅烷偶联剂的比较 | 68 |
| 3.4.4 | 钛酸酯偶联剂在高分子材料中的应用 | 69 |

| | | |
|-------|------------------------------|----|
| 4.1 | 概述 | 77 |
| 4.1.1 | 铝酸酯偶联剂的种类 | 78 |
| 4.1.2 | 铝酸酯偶联剂的结构特征 | 78 |
| 4.1.3 | 铝酸酯偶联剂的偶联机理 | 79 |
| 4.2 | 铝酸酯偶联剂的合成方法 | 79 |
| 4.2.1 | 催化剂法 | 79 |
| 4.2.2 | 无催化剂法 | 80 |
| 4.3 | 铝酸酯偶联剂的生产 | 81 |
| 4.3.1 | 异丙醇铝的制备 | 81 |
| 4.3.2 | 铝酸酯偶联剂的合成 | 81 |
| 4.4 | 铝酸酯偶联剂的应用 | 82 |
| 4.4.1 | 使用方法 | 82 |
| 4.4.2 | 选择标准 | 83 |
| 4.4.3 | 注意事项 | 83 |
| 4.4.4 | 用量 | 83 |
| 4.4.5 | 铝酸酯偶联剂在高分子材料中的应用 | 84 |
| 4.4.6 | 铝酸酯偶联剂在高分子材料中的应用 实例 | 86 |

| | | |
|-------|-------------------|-----|
| 5.1 | 铝钛偶联剂 | 95 |
| 5.1.1 | 铝钛偶联剂简介 | 95 |
| 5.1.2 | 铝钛偶联剂的合成 | 96 |
| 5.1.3 | 铝钛偶联剂的应用 | 98 |
| 5.2 | 有机硼酸酯偶联剂 | 100 |
| 5.2.1 | 有机硼酸酯偶联剂简介 | 100 |
| 5.2.2 | 有机硼酸酯偶联剂的合成 | 100 |
| 5.2.3 | 有机硼酸酯偶联剂的应用 | 101 |
| 5.3 | 锆类偶联剂 | 101 |

| | |
|--------------------|-----|
| 5.4 有机铬络合物偶联剂····· | 102 |
| 5.5 锡偶联剂····· | 102 |
| 5.6 木质素偶联剂····· | 102 |

第 1 章

绪 论

1.1 偶联剂的历史

偶联剂最早于 20 世纪 40 年代由美国联合碳化合物公司 (UC) 和道康宁公司 (DowCorning) 首先研发, 最初把它作为玻璃纤维的表面处理剂而用在玻璃纤维增强塑料中。1947 年, Johns Hopkins 大学的 Ralph K. Witt 等发现烯丙基三乙氧基硅烷处理玻璃纤维而制成聚酯复合材料时, 可以得到双倍的强度, 从而开创了偶联剂实际应用的先河, 并极大地刺激了偶联剂的研究与发展。随后, 由于偶联剂独特的性能和显著的改性效果, 以及新产品的不断问世, 使其应用领域日益扩大, 继而在橡胶、塑料、填充复合材料、环氧封装材料、弹性体、涂料、胶黏剂和密封剂等方面获得了广泛应用, 使用偶联剂可以极大地改进上述材料的力学性能、电气性能、耐候性、耐水性、难燃性、粘接性、分散性、成型性以及工艺操作性等。事实上, 偶联剂已成为材料工业必不可少的助剂之一, 被人们形象地称为“工业味精”。

1.2 偶联剂的性能、结构与分类

为了提高塑料的某些性能并降低成本, 有效的办法是填充改性。但在树

脂中添加无机填料后熔融指数会大大降低，以致无法注射成型，而且表现性能也不佳，所以如何能在聚合物中添加多量的填料而塑料制品又有良好的表现质量，这一问题受到人们的重视。使用偶联剂可以解决上述问题。

偶联剂也称表面处理剂，实际上是一种增加无机填料与有机聚合物之间亲和力的有机物质。大多数无机填料属亲水性，与聚合物难以相溶，如果不经过偶联处理，它们会发生相间分离。经过各种偶联处理后能使填料表面的亲水性变成亲有机物性，偶联剂在填料和聚合物之间通过物理的和化学的作用使它们紧密相连，从而达到良好的机械强度。另一方面无机填料不论经过硅烷、钛酸酯还是其他偶联剂处理后，其聚集的颗粒直径大多有明显减小，例如沉淀碳酸钙用高级脂肪酸处理后，聚集粒径即减小 $4/5$ ，故可提高填料在聚合物中的分散性，使填料聚合物体系的流动性得以改善，这些因素都有利于改进制品的力学性能、表现质量和加工性能。偶联剂的用量一般为填充剂用量的 $0.5\% \sim 2\%$ 。

偶联剂是一类具有两种不同性质官能团的物质，其分子结构的最大特点是分子中含有化学性质不同的两个基团，一个是亲无机物的基团，易与无机物表面起化学反应；另一个是亲有机物的基团，能与合成树脂或其他聚合物发生化学反应或生成氢键溶于其中。因此偶联剂被称作“分子桥”，用于改善无机物与有机物之间的界面作用，从而大大提高复合材料的性能，如物理性能、电性能、热性能、光性能等。偶联剂用于橡胶工业中，可提高轮胎、胶板、胶管、胶鞋等产品的耐磨性和耐老化性能，并且能减少天然橡胶(NR)用量，从而降低成本。偶联剂在复合材料中的作用在于它既能与增强材料表面的某些基团反应，又能与基体树脂反应，在增强材料与树脂基体之间形成一个界面层，界面层能传递应力，从而增强材料与树脂之间的黏合强度，提高了复合材料的性能，同时还可以防止其他介质向界面渗透，改善了界面状态，有利于制品的耐老化、耐应力及电绝缘性能。

偶联剂的种类繁多，按化学结构及组成可分为硅烷类、钛酸酯类、铝酸酯类、有机铬络合物类、锆化合物类、磷酸酯类和硼酸酯类等。目前应用范围最广的是硅烷偶联剂和钛酸酯偶联剂，硅烷偶联剂历史较久，至今仍是玻璃纤维等含硅无机材料的主要表面处理剂，钛酸酯偶联剂是 20 世纪 70 年代新产品，主要用来处理含钙、钡等非硅无机填料。选用偶联剂的基本原则是，酸性填料应使用含碱性官能团的偶联剂，而碱性填料应该用含酸性官能团的偶联剂。

(1) 硅烷类偶联剂

硅烷类偶联剂是人们研究最早、应用最早的偶联剂。由于其独特的性能及新产品的不断问世,使其应用领域逐渐扩大,已成为有机硅工业的重要分支。它是近年来发展较快的一类有机硅产品,其品种繁多,结构新颖,仅已知结构的产品就有百余种。1945年前后,由美国联碳和道康宁等公司开发和公布了一系列具有典型结构的硅烷偶联剂;1955年,又由UC公司首次提出了含氨基的硅烷偶联剂;从1959年开始陆续出现了一系列改性氨基硅烷偶联剂;20世纪60年代初期出现的含过氧基硅烷偶联剂和60年代末期出现的具有重氮和叠氮结构的硅烷偶联剂,又大大丰富了硅烷偶联剂的品种。近几十年来,随着玻璃纤维增强塑料的发展,促进了各种偶联剂的研究与开发。改性氨基硅烷偶联剂、过氧基硅烷偶联剂和叠氮基硅烷偶联剂的合成与应用就是这一时期的主要成果。

(2) 钛酸酯类偶联剂

钛酸酯类偶联剂由美国肯里奇石油化学公司于1975年开发。其结构的一端可与无机填充剂界面上的自由质子反应,在无机物表面形成一有机单分子层,该分子层在压力作用下可以自由伸展和收缩,从而提高塑料的拉伸和抗冲击强度。另一端是可与合成树脂分子相互缠绕,使无机相和有机相紧密结合的长链烃基。这类偶联剂特别适用于碳酸钙、硫酸钡等非硅无机填充剂填充的聚烯烃体系。

(3) 铝酸酯类偶联剂

与其他偶联剂(如钛酸酯偶联剂、硼酸酯等偶联剂)相比,经铝酸酯偶联剂活化改性处理后的无机粉体,除质量稳定外,还具有色浅、无毒、味小及对PVC的协同热稳定性和润滑性,适用范围广,无需稀释剂,使用方便,价格低廉。

经铝酸酯偶联剂活化改性处理的各种无机粉体,因其表面发生化学或物理化学作用生成一有机分子层,由亲水性变成亲有机性。实践证明,无机粉体表面经铝酸酯偶联剂改性后用于复合制品中,偶联剂的亲无机物端与亲有机物端能分别与无机填料表面和有机树脂发生化学反应或形成缠结结构,增强了无机粉体与有机树脂的界面相容性,所以用铝酸酯偶联剂改性,不仅可以改善填充无机粉体的塑料制品的加工性能,而且也可以明显改善制品的物理力学性能,使产品吸水率降低,吸油量减少,填料分散均匀。对于一些低填充的塑料制品,一般可大幅度增加填料的用量(比原填充量增加一倍或一

倍以上),改善加工性能(熔体黏度下降,对模具磨损减少),提高产品质量,降低生产成本,因而具有明显的经济效益。

(4) 有机铬络合物类偶联剂

有机铬络合物类偶联剂开发于20世纪50年代初,是由不饱和有机酸与三价铬原子形成的金属络合物,在玻璃纤维增强塑料中,其偶联效果良好。主要品种有甲基丙烯酸氯化铬络合物,商品名沃兰。它一端有活泼的不饱和基团,可以与合成树脂反应;另一端依靠铬原子与玻璃纤维表面的硅氧键结合。这种偶联剂的制造和应用技术比较成熟,成本低,但品种单一,适用范围和偶联效果不及前述几类。

(5) 其他偶联剂

锆类偶联剂是含铝酸锆的低分子量的无机聚合物。它不仅可以促进不同物质之间的黏合,而且可以改善复合材料体系的性能,特别是流变性能。该类偶联剂既适用于多种热固性树脂,也适用于多种热塑性树脂。锆化合物类偶联剂是1983年由美国卡维东化学公司开发的新偶联剂,在其分子的主链上有两种有机配位基团:一种可赋予偶联剂以良好的羟基稳定性和水解稳定性;另一种可赋予偶联剂与有机物良好的反应性。锆化合物类偶联剂不仅可促进无机物与有机物的结合,还可改善填充体系的性能,特别是能显著降低填充体系的黏度,价格低廉。目前,已商品化的有7个品种,均为液体,适用于聚烯烃、聚酯、环氧、聚酰胺、聚丙烯酸、聚氨酯等。在碳酸钙、二氧化硅、陶土、三水合氧化铝、二氧化钛等填充体系中,都有偶联和改性作用。

此外,还有铝钛类、磷酸酯类、硼酸酯类、锡类和水质素类等偶联剂。

1.3 偶联剂的应用

偶联剂是一种具有特殊结构的化合物。在它的分子中,同时具有能与无机材料(如玻璃、水泥、金属等)结合的反应性基团和与有机材料(如合成树脂等)结合的反应性基团。因此,通过偶联剂可使两种性能差异很大的材料界面偶联起来,以提高复合材料的性能和增加粘接强度,从而获得性能优异、可靠的新型复合材料。

偶联剂在工业中的地位日趋重要,已成为现代有机工业、有机高分子工

业、复合材料工业及相关技术领域不可缺少的配套化学助剂。偶联剂的应用十分广泛，主要有以下几方面：

- ① 用作表面处理剂，以改善填料和树脂的相容性、浸润性和分散性；
- ② 用于无机填料填充塑料时，改善其分散性和黏合性；
- ③ 提高胶黏剂和涂料湿态下的黏合力、耐候性，改善颜料的分散性，提高耐磨性和树脂的交联。在水电站工程中提高水泥与环氧树脂的黏合性；
- ④ 用于氟橡胶与金属的黏合密封，具有耐水、耐高温、耐气候等性能；
- ⑤ 用于纺织工业，令纺织品柔软丰满，提高其防水性以及染料黏合力；
- ⑥ 用作难粘材料聚烯烃（如 PE、PP）和特种橡胶（如硅橡胶、EPR、CR、氟橡胶）的黏合促进剂；
- ⑦ 提高橡胶制品的机械强度、耐磨性、湿态电气性能和流变性；
- ⑧ 提高复合材料湿态物理机械强度、湿态电气性能，并改善玻璃纤维的集束性、保护性和加工工艺。

当前，偶联剂的三大应用领域：一是作非交联聚合物体系的交联固化剂，使其实现常温常压固化；二是材料表面改性剂，赋予防静电、防霉、防臭、抗凝血及生理惰性等功能；三是异种基体间的弹性桥联剂，即改善两种不同化学性能材料之间的粘接性，达到提高制品的机械、电绝缘、抗老化及憎水等综合性能的目的。

第 2 章

硅烷偶联剂

2.1 概述

硅烷偶联剂 (silane coupling agents, 简称 SCA), 是一类在分子中同时具有两种不同的性质基团 (可水解基团和非水解基团) 的有机硅化合物, 是人们研究最早、应用最早的偶联剂, 由美国联合碳化物公司和道康宁公司在 20 世纪 40 年代首先开发, 最初只把它作为玻璃纤维的表面处理剂而应用在玻璃纤维增强塑料中, 随后, 由于硅烷偶联剂独特的性能, 显著的改性效果, 以及新品种的不断问世, 其应用领域日益扩大, 已成为有机硅工业一个重要的分支, 硅烷偶联剂是随着复合材料的发展而发展起来的, 但其应用已超过了复合材料领域。硅烷偶联剂的作用效果与有机硅胶黏剂有许多相似之处, 同时也可以作为有机硅胶黏剂或其他胶黏剂的交联剂、增稠剂和底漆, 或使材料的表面改性, 而赋予材料表面防静电、防腐、抗凝血和生理惰性。

硅烷偶联剂是人们研究最早、应用最早的偶联剂。由于其独特的性能及新产品的不断问世, 使其应用领域逐渐扩大, 已成为有机硅工业的重要分支。它是近年来发展较快的一类有机硅产品, 其品种繁多, 结构新颖, 仅已知结构的产品就有百余种。1945 年前后由美国联碳和道康宁等公司开发和公布了一系列具有典型结构的硅烷偶联剂; 1955 年又由联碳公司首次提出

了含氨基的硅烷偶联剂；从 1959 年开始陆续出现了一系列改性氨基硅烷偶联剂；20 世纪 60 年代初期出现的含过氧基硅烷偶联剂和 60 年代末期出现的具有重氮和叠氮结构的硅烷偶联剂，又大大丰富了硅烷偶联剂的品种。近几十年来，随着玻璃纤维增强塑料的发展，促进了各种偶联剂的研究与开发。改性氨基硅烷偶联剂、过氧基硅烷偶联剂和叠氮基硅烷偶联剂的合成与应用就是这一时期的主要成果。

我国于 20 世纪 60 年代中期开始研制硅烷偶联剂。首先由中国科学院化学研究所开始研制 γ -官能团硅烷偶联剂，南京大学也同时开始研制 α -官能团硅烷偶联剂，现在国内已能生产多种偶联剂。

2.1.1 硅烷偶联剂的种类

目前，硅烷偶联剂的品种已超过 100 多种，按有机官能团分类，产品类型包括乙烯基、环氧基、甲基丙烯酰氧基、氨基、脲基、氯丙基、巯基和硫化物等。硅烷偶联剂的主要品种列于表 2-1。

表 2-1 国内外常用硅烷偶联剂的名称与类型

| 类型 | 序号 | 名称 | 分子式 | 商品编号 |
|------------------|----|-----------------|--|----------------------|
| 乙 烯 基 类 | 1 | 乙烯基三氯硅烷 | $\text{CH}_2=\text{CHSiCl}_3$ | A150, WD-26 |
| | 2 | 乙烯基三乙氧基硅烷 | $\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ | A151, KBM5220, WD-20 |
| | 3 | 乙烯基三甲氧基硅烷 | $\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OCH}_3)_3$ | A171, KBM5210, WD-21 |
| | 4 | 乙烯基三(2-甲氧乙氧基)硅烷 | $\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_4\text{OCH}_3)_3$ | A172, KBM1003, WD-27 |
| | 5 | 乙烯基三乙酰氧基硅烷 | $\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OCOCH}_3)_3$ | |
| | 6 | 乙烯基三过氧化叔丁基硅烷 | $\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OOBu-}t)_3$ | |
| | 7 | 乙烯基甲基二氯硅烷 | $\text{CH}_2=\text{CHSiMeCl}_2$ | WD-22 |

续表

| 类型 | 序号 | 名称 | 分子式 | 商品编号 |
|-----------------------|------------|--|--|-------------------------------|
| 氯 烃 基 类 | 8 | γ -氯丙基三氯硅烷 | $\text{ClCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SiCl}_3$ | γ -氯 I |
| | 9 | γ -氯丙基甲基二氯硅烷 | $\text{ClCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si MeCl}_2$ | |
| | 10 | γ -氯丙基三甲氧基硅烷 | $\text{ClCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ | WD-31 |
| | 11 | γ -氯丙基三乙氧基硅烷 | $\text{ClCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ | γ -氯 II, KBM703, WD-30 |
| | 12 | 氯甲基三乙氧基硅烷 | $\text{ClCH}_2\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ | |
| 氨 烃 基 类 | 13 | γ -氨丙基三乙氧基硅烷 | $\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ | KH550, WD-50 |
| | 14 | γ -氨丙基三甲氧基硅烷 | $\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ | WD-56 |
| | 15 | γ -(β -氨乙基)氨丙基三甲氧基硅烷 | $\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{NH}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ | KH791, KBM602, WD-51 |
| | 16 | γ -脲丙基三乙氧基硅烷 | $\text{H}_2\text{NCONH}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ | |
| | 17 | 苯胺甲基三乙氧基硅烷 | $\text{PhNHCH}_2\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ | 南大-42, WD-42 |
| 18 | 苯胺甲基三甲氧基硅烷 | $\text{PhNHCH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ | 南大-73 | |
| 环 氧 烃 基 类 | 19 | γ -(2,3-环氧丙氧)丙基三甲氧基硅烷 |  | KH560, WD-60 A-187, KBM403 |
| | 20 | γ -(2,3-环氧丙氧)丙基三乙氧基硅烷 |  | WD-62 |
| | 21 | γ -(2,3-环氧丙氧)丙基甲基二甲氧基硅烷 |  | WD-61 |
| | 22 | β -(3,4-环氧环己基)乙基三甲氧基硅烷 |  | A-186 |

续表

| 类型 | 序号 | 名称 | 分子式 | 商品编号 |
|-----------|----|----------------------------|---|-----------------------|
| 甲基丙烯酰氧烷基类 | 23 | γ -甲基丙烯酰氧丙基三氯硅烷 | $\text{CH}_2=\text{CCH}_3\text{COOC}_3\text{H}_6\text{SiCl}_3$ | |
| | 24 | γ -甲基丙烯酰氧丙基三甲氧基硅烷 | $\text{CH}_2=\text{CCH}_3\text{COOC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ | KH570, WD-70 A-174 |
| | 25 | γ -甲基丙烯酰氧丙基甲基二乙氧基硅烷 | $\text{CH}_2=\text{CCH}_3\text{COOC}_3\text{H}_6\text{SiCH}_3(\text{OC}_2\text{H}_5)_2$ | |
| | 26 | γ -甲基丙烯酰氧丙基甲基二甲氧基硅烷 | $\text{CH}_2=\text{CCH}_3\text{COOC}_3\text{H}_6\text{SiCH}_3(\text{OCH}_3)_2$ | WD-71 |
| 含硫烷基类 | 27 | γ -硫丙基三甲氧基硅烷 | $\text{HSC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ | WD-80, KBM803 |
| | 28 | γ -硫丙基三乙氧基硅烷 | $\text{HSC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ | WD-81, KH80, A-189 |
| | 29 | 双(3-三乙氧基丙基)四硫化物 | $[(\text{EtO})_3\text{C}_3\text{H}_6\text{Si}]_2\text{S}_4$ | WD-40, Si-69 |
| | 30 | 双(3-三乙氧基丙基)二硫化物 | $[(\text{EtO})_3\text{C}_3\text{H}_6\text{Si}]_2\text{S}_2$ | WD-42, Si-75 |
| 拟卤素类 | 31 | β -氰乙基三氯硅烷 | $\text{NCC}_2\text{H}_4\text{SiCl}_3$ | |
| | 32 | β -氰乙基甲基二氯硅烷 | $\text{NCC}_2\text{H}_4\text{SiMeCl}_2$ | |
| | 33 | β -氰乙基三乙氧基硅烷 | $\text{NCC}_2\text{H}_4\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ | |
| | 34 | γ -氰丙基三甲氧基硅烷 | $\text{NCC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ | |
| 季铵烷基类 | 35 | 3-异氰酸丙基三乙氧基硅烷 | $\text{ONCC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ | |
| | 36 | 十八烷基二甲基(3-三甲氧基丙基)氯化铵 | $[\text{C}_{18}\text{H}_{37}(\text{CH}_3)_2\text{N C}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3]\text{Cl}$ | |
| | 37 | 2-甲基丙烯酰氧乙基二甲基(3-三甲氧基丙基)氯化铵 | $[\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOC}_2\text{H}_4\text{N}(\text{CH}_3)_2\text{C}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3]\text{Cl}$ | |
| | 38 | 4-烯苄基二甲基(3-三甲氧基丙基)氯化铵 | $[\text{CH}_2=\text{CC}_6\text{H}_4\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_2\text{C}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3]\text{Cl}$ | |