



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 96107785.9

[43]公开日 1997年3月26日

[11] 公开号 CN 1145941A

[22]申请日 96.5.30

[30]优先权

[32]95.6.1 [33]US[31]458,149

[71]申请人 PPG工业公司

地址 美国宾夕法尼亚

[72]发明人 G·B·伍德温

[74]专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商标
事务所
代理人 任宗华

权利要求书 3 页 说明书 12 页 附图页数 2 页

[54]发明名称 憎憎防水表面处理

[57]摘要

公开了在诸如玻璃、塑料、金属、无机聚合物基体上提供耐久性的不湿性表面，组合物包括选自具有通式 $R_mR'_nSiX_{4-m-n}$ 的化合物的全氟烷基烷基硅烷，式中 R 是全氟烷基烷基基团，R' 是烷基或乙烯基，m+n 不大于 3，X 选自卤素、烷氧基和酰氧基。全氟烷基烷基硅烷是在诸如烷烃、烯烃、芳烃、醚、酮或卤代烃之类的溶剂中使用，它们一起形成组合物并在初始时润湿表面。硅烷与表面反应后，其剩余的组合物便被处理的表面排斥。

权 利 要 求 书

1. 一种在基体上生产不湿性表面的组合物，该组合物包括一全氟烷基烷基硅烷和至少一种溶剂，该溶剂的表面张力比处理基体的表面自由能至少高5达因/厘米，其沸点足够高以在将组合物施用于基体表面时阻止溶剂的蒸发。

2. 权利要求1的组合物，其中所说的全氟烷基烷基硅烷选自通式为 $R_m R'_n SiX_{4-m-n}$ 的化合物，其中R是全氟烷基烷基基团，R'是烷基或乙烯基， $m+n$ 不大于3，X选自卤素、烷氧基和酰氧基。

3. 权利要求2的组合物，其中所说的全氟烷基烷基硅烷的全氟烷基部分选自 $CF_3 - C_{30}F_{61}$ 。

4. 权利要求3的组合物，其中所说的全氟烷基部分选自 $C_6F_{13} - C_{18}F_{37}$ 。

5. 权利要求4的组合物，其中所说的全氟烷基部分选自 $C_8F_{17} - C_{12}F_{25}$ 。

6. 权利要求2的组合物，其中R'选自甲基、乙基、乙烯基和丙基。

7. 权利要求3的组合物，其中X选自氯、溴、碘、甲氧基、乙氧基和乙酰氧基。

8. 权利要求2的组合物，其中所说的溶剂包括沸点至少为65℃的溶剂，选自烷烃、烯烃、芳烃、醚、酮、卤代烃和它们的混合物。

9. 权利要求8的组合物，其中所说的溶剂包括选自己烷，庚烷、

辛烷、癸烷、十二烷、十六烷、苧烯、甲苯、二甲苯、正丁醚、环戊酮、环己酮、甲基异丁基酮、氯苯、三氯乙烷、三氯三氟乙烷、二氯甲烷、全氟化碳的溶剂和它们的混合物。

10. 权利要求 9 的组合物, 其中所说的组合物进一步包括能水解缩合成硅胶的可完全水解的硅烷和反应性干燥剂。

11. 一种在基体上生产不湿性表面的方法, 该方法包括用组合物接触表面, 该组合物包括一全氟烷基烷基硅烷和至少一种溶剂, 该溶剂的表面张力比处理基体的表面自由能至少大 5 达因/厘米, 其沸点足够高以在基体表面施用 时阻止溶剂完全蒸发。

12. 权利要求 11 的方法, 其中所说的全氟烷基硅烷选自具有通式 $R_mR'_nSiX_{4-m-n}$ 的化合物, 式中 R 是全氟烷基烷基基团, R' 是烷基或乙烯基, $m+n < 4$, X 是选自卤素、烷氧基和酰氧基的基团。

13. 权利要求 12 的方法, 其中所说的全氟烷基烷基的全氟烷基部分选自 $CF_3 - C_{30}F_{61}$ 。

14. 权利要求 13 的组合物, 其中所说的全氟烷基部分选自 $C_6F_{13} - C_{18}F_{37}$ 。

15. 权利要求 14 的组合物, 其中所说的全氟烷基部分选自 $C_8F_{17} - C_{12}F_{25}$ 。

16. 权利要求 12 的组合物, 其中 R' 选自甲基、乙基、乙烯基和丙基。

17. 权利要求 12 的组合物, 其中 X 选自氯、溴、碘、甲氧基、乙氧基和乙酰氧基。

18. 权利要求 12 的方法, 其中所说的溶剂包括沸点至少为 65 °C 的溶剂, 选自烷烃、烯烃、芳烃、醚、酮、卤代烃和它们的混合

物。

19. 权利要求 18 的组合物，其中所说的溶剂包括选自己烷，庚烷、辛烷、癸烷、十二烷、十六烷、苈烯、甲苯、二甲苯、正丁醚、环戊酮、环己酮、甲基异丁基酮、氯苯、三氯乙烷、三氯三氟乙烷、二氯甲烷、全氟化碳的溶剂以及它们的混合物。

20. 权利要求 19 的组合物，其中所说的组合物进一步包括能水解缩合成硅胶的可完全水解的硅烷和一反应干燥剂。

说明书

憎憎防水表面处理

本申请系 USSN 08/220, 353 (1994年3月30日提交)的部分继续申请, 该申请又是 USSN 07/589, 235 (1990年9月28日提交, 今 USP 5, 308, 705)的部分继续申请, 它又是 USSN 07/503, 587 (1990年4月3日提交, 今 USP4, 983, 459)的部分继续申请。

本发明一般涉及表面处理技术, 特别是生产在各种基体上的防水表面的技术, 更特别是生产这样一种防水表面, 它不需施用必须除去的过多材料。

Armstrong 的 USP4, 724, 022 公开了一种用于抗划伤的窗户装置生产的玻璃脱离表面的改进制备方法, 它是用(十七氟-1, 1, 2, 2-四氢癸基)-1-三氯硅烷对玻璃表面进行处理。

Yoneda 等人的 EP - A - 92107814.3 (公开号 0513690A2) 叙述了至少有两个处理表面层的表面处理基体, 第一外部层是用一化合物处理, 形成与水至少有 70° 接触角的表面得到的; 第二下部层是用选自异氰酸酯硅烷化合物和可水解硅烷化合物的至少一种反应性硅烷化合物进行处理得到的。

Franz 等人的 USP4, 983, 459 和 4, 997, 684 分别公开了用一全氟烷基烷基硅烷和一氟化烯烃调聚物进行处理以在玻璃上提供一经久耐用的不湿性表面制品和方法。

Franz 等人的 USP 5, 308, 705 叙述了用全氟烷基烷基硅烷和氟化烯烃调聚物处理在除玻璃以外的基体上提供不润湿表面性质的方法。

Goodwin 的 USP 5, 328, 768 公开了一玻璃基体，其表面首先用二氧化硅底层处理，再用全氟烷基烷基硅烷处理。

Berquier 的 USP 5, 368, 892 叙述了包括憎水、憎油、抗紫外层的不湿性玻璃板和其生产方法，该方法包括清洁玻璃、将玻璃在 $-10^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内在一非极性溶剂体系中与含氟化有机硅烷的溶液接触至少 5 分钟，然后漂洗。

图 1 说明在有不同表面自由能（以达因/厘米测定）的基体上液滴的接触角是溶剂表面张力（达因/厘米）的函数。

图 2 说明液滴接触角是各种不同流体的表面自由能（达因/厘米）的函数，其表面张力以达因/厘米测定。

本发明提供具有高防水性和高润滑性的基体表面。这种经久耐用的防水和防污物的基体表面的提供是在基体的表面施以包括全氟烷基烷基硅烷化合物和能给予表面处理自憎性的溶剂的组合物，即此组合物最初将基体表面湿润，并在基体表面被全氟烷基烷基硅烷处理后，组合物即被已处理的基体表面排斥。组合物包括用于全氟烷基烷基硅烷的至少一种溶剂。组合物包括的至少一种溶剂具有足够高的沸点以防止在施用全氟烷基烷基硅烷时溶剂完全蒸发，并具有比全氟烷基烷基硅烷处理后的表面的表面自由能高至少 5 达因/厘米的表面张力。组合物可包括单一的溶剂或混合溶剂。

本发明是将包括全氟烷基烷基硅烷和溶剂的组合物施用于基体的表面以生产表面处理制品。全氟烷基烷基硅烷和溶剂组合物最好

采用为悬浮液或溶液，最好是在全氟烷基烷基硅烷的溶剂中。本发明的优选溶液是用常规技术，诸如浸渍、流挂、擦拭或喷雾法，将其施用在基体表面上。该组合物最初将表面润湿，通常润湿约 0.2-2 秒，直至处理后的表面变成有足够的疏水性以排除剩余的组合物。当全氟烷基烷基硅烷与表面进行反应，并且处理过的表面排斥剩余的组合物时，任何多余的组合物都能很容易地例如用擦拭法除去，而没有任何多余的硅烷成为朦胧的薄膜沉积下来，这种薄膜难于除掉，需要费相当大的精力才能消除。

优选的全氟烷基烷基硅烷的通式为 $R_mR'_nSiX_{4-m-n}$ ，其中 R 为一全氟烷基烷基基团；m 通常为 1；n 通常为 0 或 1；m+n 不大于 3；R' 为乙烯基或烷基，优选甲基、乙基或丙基；X 最好是诸如卤素、酰氧基和/或烷氧基的基团。优选的全氟烷基烷基基团包括 CF_3 至 $C_{30}F_{61}$ 的全氟烷基部分，优选 C_6F_{13} 至 $C_{16}F_{33}$ ，更优选 C_8F_{17} 至 $C_{10}F_{21}$ 。全氟烷基烷基的烷基部分最好是乙基。优选的 X 包括氯、溴、碘、甲氧基、乙氧基和乙酰氧基。优选的本发明全氟烷基乙基硅烷包括全氟烷基乙基三氯硅烷、全氟烷基乙基三甲氧基硅烷、全氟烷基乙基三乙酰氧基硅烷、全氟烷基乙基二氯（甲基）硅烷和全氟烷基乙基二乙氧基（甲基）硅烷。

这些全氟烷基乙基硅烷似乎在分子基础上在基体表面与结合点反应。全氟烷基乙基硅烷的强表面结合力产生经久耐用的基体表面，此表面与水滴呈现的大接触角指明它有高的排水性。全氟烷基烷基硅烷组合物可进一步包括能水解缩合形成硅胶的可水解硅烷，这种硅胶起作整体底涂层的作用。优选的可水解硅烷包括可完全水解的有机硅烷，诸如四卤硅烷，特别是四氯硅烷 - $SiCl_4$ 。

适合的溶剂包括那些沸点相对高的（最好是高于 65 °C）、表面张力比用全氟烷基烷基硅烷处理的基体表面的表面自由能至少大 5 达因/厘米的溶剂。溶剂可以是单一溶剂或混合溶剂，包括至少一种全氟烷基烷基硅烷的溶剂和至少一种具有上述性质的溶剂。适合的溶剂混合物还有至少一个组分是高沸点的，并且每一组分的表面张力都比用全氟烷基烷基硅烷处理过的基体表面的表面自由能至少大 5 达因/厘米或在基体表面处理过程中经选择性蒸发，流体表面张力发生变化，直至表面张力比用全氟烷基烷基硅烷处理过的基体表面的表面自由能至少大 5 达因/厘米的混合溶剂。优选的溶剂和溶剂体系包括非质子传递溶剂，即没有 - OH、- NH 或 - SH（它们能与全氟烷基烷基硅烷的可水解基团反应）的溶剂，并且溶剂或经选择性蒸发形成的溶剂体系的表面张力比经表面处理过的表面的表面自由能大。

适合的包括高沸点、高表面张力的溶剂有下面几组：正、环和异构石蜡烃、诸如己烷、庚烷、环己烷、辛烷、十六烷和混合溶剂，诸如矿油精和 Isopar 溶剂（Exxon 公司产品）；烯烃，诸如苈烯；芳烃，诸如甲苯和二甲苯；高沸点醚，诸如正丁醚；酮，诸如环戊酮、环己酮和甲基异丁基酮；卤代烃，诸如三氯乙烷和氯苯。适合的溶剂，特别是用于溶剂混合物的溶剂，可包括异丙醇、乙醇、己烷、庚烷、矿油精、丙酮、甲苯和石脑油。优选的溶剂是高沸点烷烃，诸如辛烷、癸烷和十二烷以及它们的混合物；卤代烃溶剂，诸如三氯三氟乙烷、二氯甲烷；全氟有机化合物，诸如全氟化碳。从运输考虑的优选溶剂是那些无闪点或闪点高于 140 °F（60 °C）的溶剂，包括 1, 1, 1 - 三氯乙烷、诸如十二烷和十六烷的烷烃和市

售混合物，诸如 Exxon 公司的 L、M、V 级 Isopar 溶剂。在所有情况中，溶剂或溶剂混合物的一组分（浓度至少 1%）的沸点是足够高的，以在涂覆应用的约 1 分钟内不被蒸发掉。

下表列出一些溶剂和它们的表面张力、沸点和闪点。

适合的溶剂	表面张力 (达因/厘米)	沸点或沸程 (℃)	闪点 (F)
己烷	18.4	69	- 10
庚烷	19.7	96	30
环己烷	25.5	81	- 1
辛烷	21.8	126	60
矿油精	25.3	177	~ 135
VM&P 石脑油	22	127	
十二烷	25.4	216	160
十六烷		287	275
Isopar C	21.2	98 - 104	19
Isopar E	22.5	118 - 137	45
Isopar G	23.5	160 - 174	106
Isopar H	24.9	178 - 188	129
Isopar K	25.9	177 - 197	135
Isopar L	25.9	191 - 207	147
Isopar M	26.6	223 - 252	196
Isopar V	30.8	273 - 311	264
苈烯		178	119
甲苯	28.5	110	40

邻二甲苯	30.1	144	90
正丁醚	22.9	142	77
环戊酮		131	87
环己酮	35.2	155	116
甲基异丁基酮	24.5	115	56
1,1,1 - 三氯乙烷	25.8	74	无
氯苯	33.6	132	75

如果全氟烷基烷基硅烷包括可迅速水解的基团，诸如氯，此溶剂最好没有水和乙醇、异丙醇之类的醇，它们能与全氟烷基烷基硅烷反应，使硅烷与基体表面的反应性能减低，对于个别优选的全氟烷基烷基硅烷，诸如全氟烷基烷基二氯硅烷和三氯硅烷，其溶剂或溶剂混合物最好是无水的。可将溶剂通过常规干燥剂，诸如无水硫酸镁或硅胶。各种优选的溶剂（诸如高沸点烷烃）可含有反应性干燥剂（诸如亚硫酸氯）以除去任何痕量的水分，不然它会与全氟烷基烷基硅烷进行反应。

亚硫酸氯（ SOCl_2 ）是反应性干燥剂的一员。大多数干燥剂的工作是与溶剂中的水配合。水仍然存在于靠配合作用的体系中。本发明的反应性干燥剂是与水反应形成不含水的其它化合物的干燥剂，并且最好不产生能与氯硅烷反应的含-OH的部分。其它反应性干燥剂包括一氯化硫（ S_2Cl_2 ）、五氯化磷（ PCl_5 ）、硫酸氯（ SO_2Cl_2 ）和三氯化磷（ PCl_3 ）。

全氟烷基烷基硅烷在溶剂或溶剂混合物中的浓度约 0.005-50%，优选约 0.05-5%。组合物最好用擦拭、浸渍或喷雾法施涂于基体表面，接着当还有一些组合物以被处理表面排斥的形式（由于

剩余的溶剂比被处理表面的表面自由能有较高的表面张力，最好是至少 5 达因/厘米) 留在被处理的表面上，可用吹气、重力滴流或擦拭法将其除去。这种从被处理表面回收溶剂给剩余的组合物提供了容易收集和去除的方法，而没有过剩的全氟烷基烷基硅烷组分的薄膜沉积，这种沉积使基体表面朦胧，对于去除，并且还可能比施涂组合物要求更多的时间和精力。

在任何剩余的溶剂蒸发掉以后，最好索性在环境温度下在空气中进行干燥。可将全氟烷基烷基硅烷进行固化，以形成比较更耐久的涂层。固化最好是将全氟烷基烷基硅烷处理的表面进行加热来完成。一般，优选的固化温度为至少 150 °F (约 66 °C)，特别是大于 200 °F (约 93 °C)。约 200 °F (约 93 °C) 下的固化周期约为 30 分钟是适合的，更高的温度和更短的加热时间可能比较有效。在 400 - 500 °F (约 204 - 260 °C) 下用 2 - 5 分钟的固化周期可以是优选的，特别是在约 470 °F (约 243 °C) 下约 3 分钟。

所说的接触角是用停滴法测定的，使用 Lord Manufacturing, Inc. 制造的改良的停泡指示器，装有 Gaertner Scientific Goniometer 光学部件。待测表面置于水平位置。面朝上，置于光源前。将一水滴在光源前置于表面之上，这样能看到静止的水滴的轮廓，用装有圆形分度规校准的测角仪伸缩镜头测定接触角。

图 1 显示有很低表面张力的流体，诸如全氟化碳，能够容易地将处理后的表面湿润，甚至是最有排斥力的。用擦拭法施涂全氟烷基乙基三氯硅烷涂层时，表面自由能一般由约 73 达因/厘米 (玻璃表面) 降低至约 12 达因/厘米 (全氟烷基烷基硅烷处理的玻璃表面)。此时，约 20 - 70 达因/厘米恒定表面张力的溶剂体系显示了初始的

表面润湿，在表面已经部分涂布后，接着进行去润湿。图 1 说明，选择一溶剂表面张力并沿 X - 轴向上移动，当施涂涂层并且表面自由能降低后，溶剂在涂层上的接触角增加。

图 2 更清楚地说明，对于作了更有排斥力改进的表面，表面张力大于约 20 达因/厘米的流体被表面排斥，而表面张力约 15 达因/厘米的流体仍然具有低的接触角。由于“成珠”降低了液滴的面积，继而又降低了溶剂的蒸发速率，所以较大的接触角降低了溶剂的蒸发速率。同时，当溶剂形成珠时，表面更排斥溶剂，就能用纸巾将溶剂从表面上清除干净。

用下面具体实施例的描述，本发明将被进一步了解。

实施例 1

第一涂层溶液的制备：含 1.2 % (重量) 全氟烷基乙基三氯硅烷，其中烷基主要包括 C₆ - C₁₈ 链，溶剂体系包括等重量的氟里昂^R TF 三氯三氟乙烷 (氟里昂为 DuPont 公司注册商标) 和十六烷。第二涂层溶液的制备如上，但溶剂组成完全是氟里昂 TF。此二溶液用简单的擦拭过程给予浮法玻璃样品排水性。在使用此二溶液时，擦拭在玻璃表面上的第二涂层溶液似蜡状，留下了过量材料的薄膜；而第一涂层溶液在施涂的短时间内被处理过的表面排斥，足以使溶液“成珠”。十六烷由于有高沸点，不能迅速蒸发，“成珠”的第一溶液用简单的擦拭法迅速将其除去。从第二涂层溶液除去过量的原料要求使用溶剂、额外的纸巾和大量的持久努力。

在克利夫兰凝聚室 (Cleveland Condensing Cabinet(CCC)) 将表面处理过的玻璃试样暴露于凝聚湿度下，在 140 F (60 °C) 下恒定地凝聚水蒸汽。处理效果是用在表面上的水滴形成的接触角来测

定的。结果示于下表。

CCC (小时)	接触角 (°)	
	第一溶液	第二溶液
0	103	105
48	106	103
119	109	107
377	112	110
544	106	107
783	98	102
948	81	89
1138	75	82

表中结果指明，两种配方提供的涂层有类似的耐久性。但第一溶液相当容易施涂，由于低表面张力、低沸点组分（氟里昂 TF）一经蒸发而产生的处理表面的排斥性。

实施例 2

将几个玻璃试样涂覆涂层溶液以使玻璃具有憎水性。每一涂层溶液基于相同的全氟烷基乙基三氯硅烷（如实施例 1 所用），但改变溶剂和浓度。将一些样品于匹兹堡室外作气候耐性试验，与水平倾斜 45° ，面对南方。用各种溶剂在这些处理表面上的接触角评价处理过的玻璃试样。用二碘甲烷和水对每一玻璃表面的接触角计算表面自由能（SFE），如 Owens 和 Wendt 所描述（J.Appl.Poly.Sci. 1969, 13,1741）。最具排斥性的处理表面是那些由低表面自由能（如 12.6 达因/厘米）代表的表面，最具有气候耐性的处理表面具有最高

的表面自由能 (47.3 达因/厘米)，此处理表面仍对水有相当的排斥性，呈现的接触角为 56° 。接触角数据说明于图 1 和图 2 中。

实施例 3

按下述方法制备 4 种溶液：

溶液 A：将四氯化硅和全氟辛基乙基三氯硅烷各 0.5 % (重量) 溶于 Isopar L 溶剂 (为 Exxon 公司提供的烃混合物，表面张力 25.9 达因/厘米，沸点范围 $191 - 207^{\circ}\text{C}$)。

溶液 B：将四氯化硅和全氟辛基乙基三氯硅烷各 0.5 % (重量) 溶于 Fluorinert FC - 77 (为 3M 公司提供的氟化溶剂，表面张力 15.0 达因/厘米，沸点 97°C)。

溶液 C：将 0.5 % (重量) 全氟辛基乙基三氯硅烷溶于 Isopar L。

溶液 D：将 0.5 % (重量) 全氟辛基乙基三氯硅烷溶于 Fluorinert FC - 77。

将玻璃试样用氧化铝抛光剂抛光以得到清洁的表面，于 63°F (17°C) 和约 70 % 的相对湿度将每一溶液擦拭在玻璃试样上。光雾量用 Pacific Scientific XL 211 Hazegard System 测定。0.0 - 0.1 % 的光雾水平一般用肉眼是观察不一到的，此光雾水平的处理基体对正常的观察目的可考虑为清澈。现将用四种溶液处理的表面的光雾值列于下表：

溶液	SiCl ₄ (重量%)	C ₈ F ₁₇ C ₂ H ₄ SiCl ₃ (重量%)	溶剂 (重量%)	溶剂	光雾值 (%)
A	0.5	0.5	99	Isopar L	0.1
B	0.5	0.5	99	FC-77	8.1
C	0	0.5	99.5	Isopar L	0.0
D	0	0.5	99.5	FC-77	11.8

从上表数据可知，使用低沸点氟化碳溶剂（Fluorinert FC - 77）的溶液 B 和 D 有相当高的光雾水平，而使用高沸点烃溶剂（Isopar L）的溶液 A 和 C 则没有。高沸点和高表面张力的烃溶剂（Isopar L）在光雾值上产生了大的区别。

实施例 4

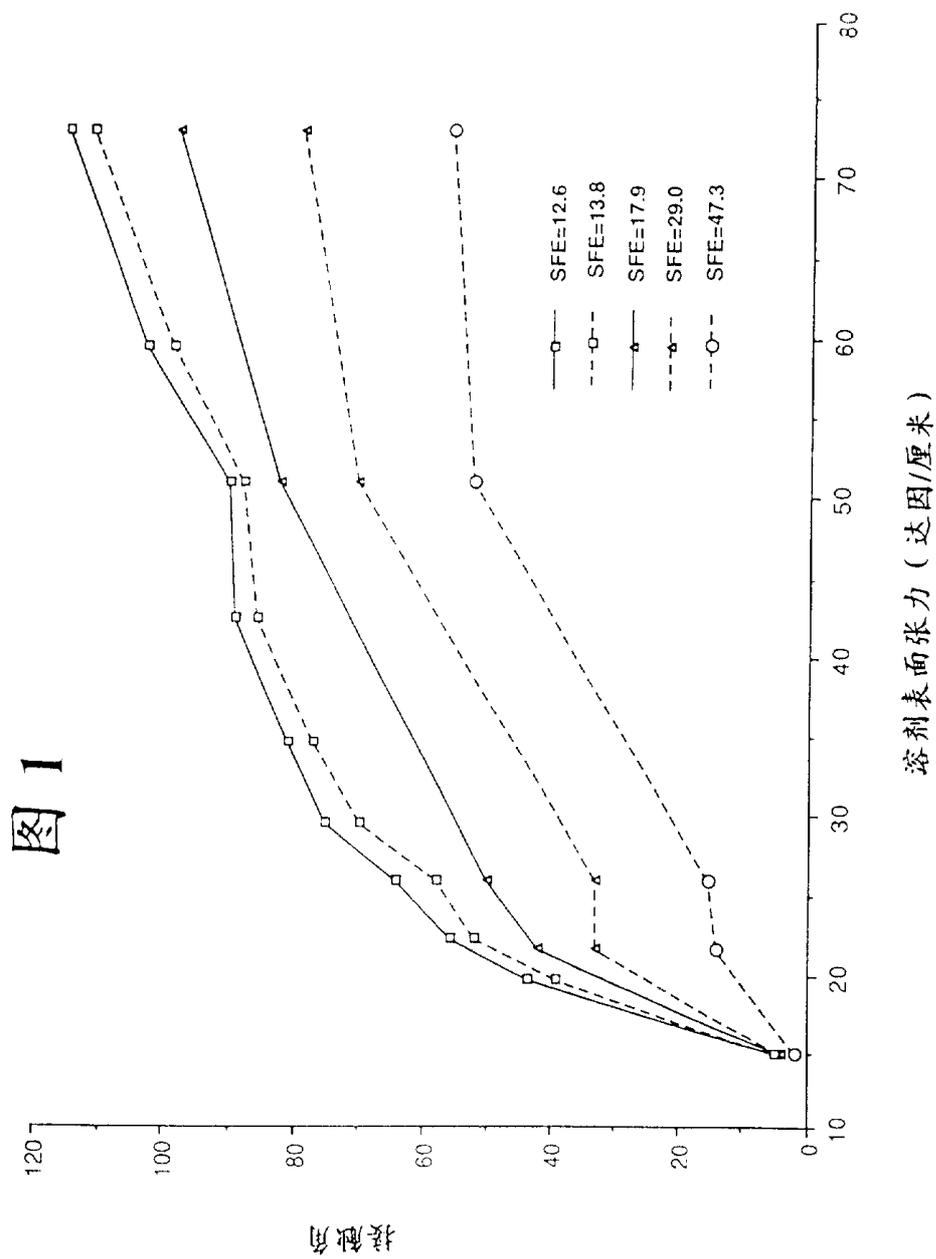
溶液的制备包括 99 克高沸点烃溶剂（Isopar L）、0.5 克亚硫酸氯（SOCl₂）和 0.5 克全氟烷基乙基三氯硅烷，其中全氟烷基部分主要包括 C₆F₁₃ - C₁₈F₃₇。将此溶液用简单的擦拭法使浮法玻璃具有排水性。溶液施涂时，溶液足以被排斥以使溶液“成珠”，并且易于从表面去除，没有可观察得到的过剩的硅氧烷原料的沉积。亚硫酸氯是用来干燥烃溶剂的。将经表面处理的玻璃试样在克利夫兰凝聚室（CCC）中暴露于凝聚湿度，于 140 °F（60 °C）恒定地凝聚水蒸汽，并也在 QUV 试验器中暴露于循环 UV 光和湿度中，在低相对湿度和 65 °C 的黑板温度以 8 小时的 UV 周期，接着在 50 °C 下和接近 100 % 相对湿度暴露 4 小时。全氟烷基烷基硅烷的表面处理效果用处理基体表面上的水滴形成的接触角来测定，其结果示于下表。

CCC 暴露 (小时)	接触角 (°)	
	锡表面	环境表面
0	117	117
188	80	86
355	72	76

CCC 暴露 (小时)	接触角 (°)	
	锡表面	环境表面
0	118	118
185	109	114
351	101	113

上述各实施例是为了说明本发明。各种全氟烷基烷基硅烷、有机硅烷、溶剂和浓度可应用任何常规技术施涂，还可以在适合的温度下固化适当的时间，以在任何种类的玻璃和塑料基体以及其它的无机表面诸如金属、陶瓷、珐琅和金属或金属氧化物膜上提供耐用的不湿性表面。本发明的处理表面是特别适合于汽车和其它载运工具的，包括飞机部件和建筑组件、抗反射镜头和 CRT 盖板。

说 明 书 附 图



流体表面张力 (达因/厘米)

图 2

