



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104736648 A

(43) 申请公布日 2015. 06. 24

(21) 申请号 201380055359. 2

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2013. 09. 27

*C09D 127/18*(2006. 01)

*C08K 3/04*(2006. 01)

(30) 优先权数据

20126014 2012. 09. 28 FI

61/706, 890 2012. 09. 28 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2015. 04. 23

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/FI2013/050943 2013. 09. 27

(87) PCT国际申请的公布数据

W02014/049211 EN 2014. 04. 03

(71) 申请人 卡尔博迪昂有限公司

地址 芬兰万塔

(72) 发明人 V·梅里马吉 P·瑞因塔拉

(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 11038

代理人 汪宇伟

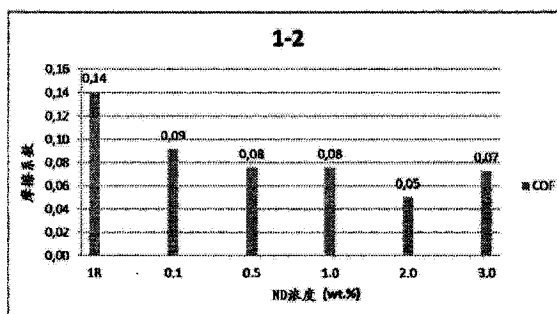
权利要求书1页 说明书15页 附图6页

(54) 发明名称

含氟聚合物涂层

(57) 摘要

本发明涉及一种具有改进的摩擦学性能的含氟聚合物涂层, 该涂层包含浓度为 0. 01wt% -5wt% 的纳米金刚石颗粒, 其中所述含氟聚合物涂层通过干燥和固化包含所述含氟聚合物和所述纳米金刚石颗粒的浆料组合物来获得, 其中该纳米金刚石颗粒的  $\zeta$  电位在高于 8 的 pH 时超过 -30mV。本发明还涉及能够用于生产所述含氟聚合物涂层的浆料组合物。



1. 浆料组合物,其包含含氟聚合物和纳米金刚石颗粒,条件是满足以下条款:
  - i) 该浆料的 pH 值处于碱性区域内,
  - ii) 该纳米金刚石颗粒的  $\zeta$  电位在 pH 值高于 8 时超过  $-30\text{mV}$ 。
2. 根据权利要求 1 所述的浆料组合物,其中该浆料的 pH 值是至少 8,优选 9-11,更优选 9-10。
3. 根据权利要求 1 或 2 所述的浆料组合物,其中该纳米金刚石颗粒的  $\zeta$  电位在 pH 值高于 8 时超过  $-40\text{mV}$ 。
4. 根据权利要求 1-3 中任一项所述的浆料组合物,其中该浆料包含作为液体介质的水、有机溶剂、水和有机溶剂的混合物或者有机溶剂的混合物。
5. 根据权利要求 1-4 中任一项所述的浆料组合物,其中该纳米金刚石颗粒以悬浮体或分散体的形式包含在该浆料中,其中该纳米颗粒的浓度是至多 5 重量%,优选 0.01 重量% -5 重量%,由该浆料组合物干燥材料含量来计算。
6. 根据权利要求 1-5 中任一项所述的浆料组合物,其中该含氟聚合物包括聚氟乙烯、聚偏氟乙烯、聚四氟乙烯、聚氯三氟乙烯、全氟烷氧基聚合物、氟化乙烯-丙烯、聚乙烯四氟乙烯、聚乙烯氯三氟乙烯、全氟弹性体、碳氟化合物、全氟聚醚、全氟磺酸、氟化聚酰亚胺或全氟聚氧杂环丁烷或者这些聚合物中两种或更多种的混合物。
7. 根据权利要求 1-6 中任一项所述的浆料组合物的用途,用于生产含氟聚合物涂层。
8. 含氟聚合物涂层,其包含浓度为 0.01 重量% -5 重量%的纳米金刚石颗粒,其中所述含氟聚合物涂层通过干燥和固化包含所述含氟聚合物和纳米金刚石颗粒的浆料组合物来获得,其中该纳米金刚石颗粒的  $\zeta$  电位在 pH 值高于 8 时超过  $-30\text{mV}$ 。
9. 根据权利要求 8 所述的含氟聚合物涂层,其中该纳米金刚石的浓度是 0.1 重量% -4 重量%,优选 0.1 重量% -3 重量%,更优选 1 重量% -3 重量%。
10. 根据权利要求 8 或 9 所述的含氟聚合物涂层,其中该含氟聚合物包括聚氟乙烯、聚偏氟乙烯、聚四氟乙烯、聚氯三氟乙烯、全氟烷氧基聚合物、氟化乙烯-丙烯、聚乙烯四氟乙烯、聚乙烯氯三氟乙烯、全氟弹性体、碳氟化合物、全氟聚醚、全氟磺酸、氟化聚酰亚胺或全氟聚氧杂环丁烷或者这些聚合物中两种或更多种的混合物。
11. 根据权利要求 8-10 中任一项所述的含氟聚合物涂层,其中该涂层包含聚四氟乙烯,并且所述摩擦系数是至多 0.08,优选至多 0.07。
12. 根据权利要求 8-11 中任一项所述的含氟聚合物涂层,其中所述涂层与没有添加任何纳米金刚石的参比样品相比,表现出降低了至少 10%,更优选至少 25%的磨损,磨损在室温测量。
13. 根据权利要求 8-12 中任一项所述的含氟聚合物涂层,其中该浆料的 pH 值处于碱性区域内,优选是至少 8,更优选是 9-11,和最优选是 9-10。
14. 根据权利要求 8-13 中任一项所述的含氟聚合物涂层,其中该纳米金刚石颗粒的  $\zeta$  电位在 pH 值高于 8 时超过  $-40\text{mV}$ 。

## 含氟聚合物涂层

### 技术领域

[0001] 本发明涉及用纳米金刚石增强的含氟聚合物涂层,和涉及可以用于生产所述含氟聚合物涂层的浆料组合物。

[0002] 发明背景

[0003] 含氟聚合物 (FP) 银它们的高耐化学品性而知名。同样在聚合物中,它们具有耐高温性和耐磨性。最公知的含氟聚合物是具有式  $-(F_2C - CF_2)_n-$  的聚四氟乙烯 (PTFE)。含氟聚合物广泛地用于苛刻条件中。它们被用于防腐蚀密封,化学管道和阀门以及轴承中。另一应用范围是防粘结。同样含氟聚合物被用于高温电子零件中。

[0004] 摩擦学是相对运动中相互作用表面的科学和工程。它包括研究和应用摩擦、润滑和磨损的原理。摩擦学是机械工程的一个分支。用于摩擦学的材料必须提供低的摩擦和磨损速率和传导摩擦热。同样它们必须携带大的法向应力和甚至在某些应用中携带电子。聚四氟乙烯的主要缺点是它的低的耐磨性和热导率,不过它具有非常低的摩擦系数。PTFE 的低摩擦系数归因于它的分子结构。它具有未支化的链状分子结构。该链仅通过弱的范德华力连接。因此该链容易滑过彼此。这导致了转移膜 (transfer film) 形成。但是,当连续重复形成和除去循环时,磨损速率增加,并且该程序导致了 PTFE 典型的高磨损速率。

[0005] 其他常用的含氟聚合物包括聚(偏氟乙烯)(PVDF)、六氟丙烯(HFP)、氟化乙烯丙烯(FEP)、全氟烷氧基(PFA)、氟化聚酰亚胺(FPI)及其他。

[0006] 纳米金刚石 (ND),也称作超纳米结晶金刚石或超分散金刚石 (UDD),是一种独特的纳米材料,其能够通过爆轰合成而以数百公斤容易地生产。还存在着用于生产纳米金刚石的其他可选的合成方法。

[0007] 纳米金刚石可以通过三硝基甲苯 (TNT) 和环三次甲基三硝基胺 (RDX, 皇家拆除炸药 (royal demolition explosive)) 的爆轰方法来生产。该爆轰在钢腔室中进行。纳米金刚石在爆轰的高压和高温中形成。爆轰后将该腔室快速冷却。该爆轰产生了金刚石共混物 (DB),其包含纳米金刚石、无定形碳、石墨状结构和金属杂质。纳米金刚石在金刚石共混物中的含量典型地是 30-75 重量%。通过化学纯化方法提取纯的纳米金刚石。市售纳米金刚石的直径是约 4-5nm。另外,该纳米金刚石具有聚集的倾向,并且聚集体的直径可以是几微米。

[0008] 纳米金刚石或纳米金刚石组合物可以用于例如油、润滑剂、研磨剂、涂料、清洁剂等中。

[0009] 已经建议了如果几种因素叠加,则低负载量的纳米颗粒会影响 PTFE 磨损。首先,纳米颗粒改变了聚合物的结晶形态。传统的填料仅会在机械上增强聚合物。传统填料的增强会包括支持负荷,引起裂纹和中断裂纹的传播。但是,纳米颗粒是聚合物薄片尺寸。因此,聚合物的结晶度会通过添加而改变,因此改变了几个其他物理性能。其次,添加纳米颗粒会降低磨损。该磨损低于传统的纤维添加剂或微粒。纳米填料抛光了粗糙表面,同时除去了很少量的材料和因此制备了用于转移膜的表面。第三,纳米添加剂填充的氟化聚合物会形成稳定的转移膜。当表面下损坏较低和没有大的研磨剂颗粒干扰膜的形成时,形成了这些

膜。膜是良好粘附的,它们保护了聚合物防止配合端面磨损,还保护该配合端面防止研磨剂磨损。该膜是具有低剪切强度的界面。填料的分解会在填料和 PTFE 之间产生反应产物,该产物能够改进转移膜的结合性。

[0010] 根据文献,已经研究了负载有不同物质的 PTFE 复合材料涂层。这样的物质包括二氧化硅、金属纳米颗粒、纳米金刚石、纳米绿坡缕石、氧化镧、二氧化钛、Kevlat 织物、石墨烯、多壁碳纳米管 (MWCNT) 和单壁碳纳米管 (SWCNT)。

[0011] Lee J-Y. 等人, Tribological behavior of PTFE film with nanodiamond. *Surface&Coatings Technology*. 188-189(2004), 第 534-538 页,研究了添加有纳米金刚石的 PTFE 膜的行为。推测纳米金刚石增强了耐磨性,同时保持了 PTFE 的低摩擦系数 (COF)。这归因于纳米级尺寸、良好的机械性能和热导率。纳米金刚石-PTFE 复合浆料由分散在蒸馏水中的纳米金刚石与 PTFE 含水悬浮体来混合。将该浆料喷在铝基底上。该复合材料中纳米金刚石含量是 0-4wt%。对涂层进行热处理。膜厚度是 30  $\mu\text{m}$ 。用球板式 (ball-on-plate) 测试设备检查了该膜的摩擦学性能。磨损通过测量磨损轨迹的宽度来评价。

[0012] 最佳的磨损性能在 2wt% 纳米金刚石含量时实现。该磨损在降低纳米金刚石含量以及在较高含量时都会增加。添加纳米金刚石时, COF 在室温时从 0.21 降低到 0.16 和在 150 $^{\circ}\text{C}$  从 0.12 降低到 0.08。同样 COF 在 2wt% 的纳米金刚石含量时达到它的最佳值。在较高纳米金刚石含量时增加的磨损与纳米金刚石增加的聚集速率相关联。同样 COF 随着较高含量而稍有增加,这会归因于聚集。该复合材料的摩擦学行为受控于薄的转移层的产生。转移层 (其降低了摩擦和磨损) 由从基质上撕掉的 PTFE 和纳米金刚石形成。它提出了纳米金刚石在膜内卷起,因此导致了界面中摩擦力的降低。

[0013] Lee J-Y. 等人, Tribological behavior of PTFE nanocomposite films reinforced with Carbon nanoparticles, *Composites Part B:Engineering*, 38:7(2007), 第 810-816 页,检查了 PTFE-碳纳米颗粒-纳米复合材料的摩擦学性能。PTFE 涂层用洋葱状碳 (OLC) 来增强。OLC 通过将纳米金刚石在 1000-1900 $^{\circ}\text{C}$  的温度退火来生产。观察到纳米金刚石保持它们的结构直到 1000 $^{\circ}\text{C}$ 。当温度达到 1300 $^{\circ}\text{C}$  时,它们开始转化成石墨片。该退火的颗粒通过磨耗研磨来分散。OLC-PTFE 浆料通过混合它们的含水分散体来获得,仅在阴离子表面活性剂中包含 OLC 分散体来改进分散速率。将该浆料涂于铝基底上。涂层厚度是 10  $\mu\text{m}$ 。用球板式测试研究了摩擦学性能。

[0014] 纳米金刚石和碳洋葱本身是固体润滑剂,因此它们不会增加摩擦系数,这通常在填充 PTFE 时发生。最低的摩擦系数用未退火的纳米金刚石来实现,不过退火对于摩擦系数的影响是可忽略的。全部所测量的 COF 值与纯的 PTFE 处于相同水平。该纳米金刚石 (退火前) 已经降低了磨损系数。此外,最低的磨损系数用在 1000 $^{\circ}\text{C}$  处理的碳洋葱来实现。该热处理降低了纳米金刚石颗粒之间的结合强度。特别是在 1000 $^{\circ}\text{C}$ , 观察了降低结合的效应,最小粒度通过这个处理来实现。

[0015] 该纳米颗粒的分散性受到结合强度和表面条件的影响。磨损性能与尺寸效应和表面性能有关。因此,最佳耐磨性用作为填料在 1000 $^{\circ}\text{C}$  热处理的颗粒来实现。这是因为它们具有最小粒度,并且能够良好分散在 PTFE 基质中。磨损表面处的损坏量在 PTFE 复合材料中,添加未处理的纳米金刚石和在 1000 $^{\circ}\text{C}$  处理的纳米金刚石来降低。

[0016] Lai S-Q. 等人, *The Friction and wear properties of*

polytetrafluoroethylene filled with ultrafine diamond, *Wear*, 260:4-5 (2006), 第 462-468 页, 研究了聚四氟乙烯 - 纳米金刚石 - 复合材料的摩擦学性能。纯化用作 PTFE 填料的该纳米金刚石。该纯化的纳米金刚石的平均粒度是 10nm, 不过它们聚集成更大的簇。该 PTFE 处于含水分散体中, 其中机械混合了纳米金刚石。将该复合材料模制成块, 将它通过加热来烧结。纳米金刚石负载量是 0-10wt%。该纳米金刚石在 PTFE 基质中分散不良, 并且聚集成直径为几百纳米到几微米的簇。用块环式 (block-on-ring) 实验装置对该复合材料进行磨损测试。

[0017] 根据 Lai S-Q. 等人, 最低摩擦系数 (0.18) 在 0.5wt% 的纳米金刚石含量实现。磨损随着纳米金刚石含量增加而急剧降低, 但是在纳米金刚石含量超过 3wt% 之后转为稍微降低。当检查磨损表面时, 发现纳米金刚石颗粒聚集到该磨损表面上。在磨损下, 纳米金刚石具有载荷能力。它们也会在摩擦过程下卷起和滑动。因此得出结论, 纯 PTFE 的大分子的滑动摩擦变成了复合材料中滑动和滚动摩擦的混合。在界面中形成转移膜, 并且钢质配合端面没有被复合材料磨损。该复合材料的碎屑小于纯 PTFE 的碎屑, 这表明纳米金刚石添加抑制了较大碎屑颗粒的形成。因此降低了磨损。

[0018] 考虑到上述内容, 存在着对于具有改进性能的含氟聚合物复合材料涂层的需求。本发明的目标是提供具有改进摩擦学性能的含氟聚合物复合材料涂层。

## 发明内容

[0019] 本发明涉及一种含氟聚合物涂层, 其包含浓度为 0.01wt% - 5wt% 的纳米金刚石颗粒, 所述涂层与没有添加任何纳米金刚石的参比样品相比, 摩擦系数降低了至少 25%, 摩擦系数在室温测量。

[0020] 本发明还涉及一种浆料组合物, 其包含含氟聚合物和纳米金刚石颗粒, 条件是满足以下条款中的至少一个:

[0021] i) 该浆料的 pH 值处于碱性区域内,

[0022] ii) 该纳米金刚石颗粒的  $\zeta$  电位在 pH 值高于 8 时是负值,

[0023] iii) 该纳米金刚石颗粒含有来源于该纳米金刚石生产的石墨和无定形碳。

[0024] 这种浆料组合物可以用于生产所述含氟聚合物涂层。

## 附图说明

[0025] 图 1 显示了参比涂层和本发明的复合材料涂层的摩擦系数,

[0026] 图 2 显示了与图 1 相同的涂层的磨损,

[0027] 图 3 显示了参比涂层和本发明的复合材料涂层的磨损,

[0028] 图 4 显示了参比涂层和本发明的复合材料涂层在不同纳米金刚石浓度时的摩擦系数,

[0029] 图 5 显示了参比涂层和本发明的另一复合材料涂层在不同纳米金刚石浓度时的摩擦系数,

[0030] 图 6 显示了参比涂层和本发明的又一复合材料涂层在不同纳米金刚石浓度时的摩擦系数,

[0031] 图 7 显示了参比涂层和本发明的复合材料涂层在不同纳米金刚石浓度时的磨损,

- [0032] 图 8 显示了本发明的复合材料涂层的 SEM 图，
- [0033] 图 9 显示了参比涂层的 SEM 图，
- [0034] 图 10 显示了本发明的另一复合材料涂层的 SEM 图，
- [0035] 图 11 显示了参比涂层和本发明的复合材料涂层在不同纳米金刚石浓度时的磨损，和
- [0036] 图 12 显示了参比涂层和本发明的复合材料涂层在不同纳米金刚石浓度时的磨损。

### 具体实施方式

[0037] 在本发明的第一方面，提供了一种浆料组合物，其包含含氟聚合物和纳米金刚石颗粒，条件是满足以下条款中的至少一个：

- [0038] i) 该浆料的 pH 值处于碱性区域内，
- [0039] ii) 该纳米金刚石颗粒的  $\zeta$  电位在 pH 值高于 8 时是负值，
- [0040] iii) 该纳米金刚石颗粒包含来源于该纳米金刚石生产的石墨和无定形碳。
- [0041] 本发明的一个优选的实施方案提供了一种浆料组合物，其包含含氟聚合物和纳米金刚石颗粒，条件是满足以下规定：

- [0042] i) 该浆料的 pH 值处于碱性区域内，
- [0043] ii) 该纳米金刚石颗粒的  $\zeta$  电位在 pH 值高于 8 时超过  $-30\text{mV}$ ，
- [0044] 该浆料的 pH 值优选是至少 8，更优选 9-11，和最优选 9-10。
- [0045] 该纳米金刚石颗粒的  $\zeta$  电位在 pH 值高于 8 时优选超过  $-30\text{mV}$ ，更优选超过  $-40\text{mV}$ 。
- [0046] 该浆料可以作为液体介质包含水、有机溶剂、水和有机溶剂的混合物或者有机溶剂的混合物。合适的溶剂是例如二甲苯、N-甲基吡咯烷酮 (NMP)、 $\gamma$ -丁内酯和乙苯以及这些溶剂中两种或更多种的混合物。

[0047] 在一个优选的实施方案中，该纳米金刚石颗粒以悬浮体或分散体的形式包含在该浆料中，其中该金刚石纳米颗粒的浓度至多是 5 重量%，优选 0.01 重量% -5 重量%，由浆料固体物质含量来计算。

[0048] 该悬浮体或分散体中的纳米金刚石颗粒可以基本上处于单位数形式或聚集的形式。单位数形式的 D90 粒度优选是 8nm-30nm，更优选 10nm-20nm。聚集形式的 D90 粒度优选是 30nm-1000nm，更优选 30nm-500nm。

[0049] 用于制备该含氟聚合物的合适单体的例子如下：乙烯 (E)、丙烯 (P)、氟乙烯 (VF1)、偏氟乙烯 (VDF 或者 VF2)、四氟乙烯 (TFE)、六氟丙烯 (HFP)、全氟丙基乙烯基醚 (PPVE)、全氟甲基乙烯基醚 (PMVE) 和氯三氟乙烯 (CTFE)。

[0050] 优选的含氟聚合物的例子如下：PVF(聚氟乙烯)、PVDF(聚偏氟乙烯)、PTFE(聚四氟乙烯)、PCTFE(聚氯三氟乙烯)、PFA(全氟烷氧基聚合物)、FEP(氟化乙烯-丙烯)、ETFE(聚乙烯四氟乙烯)、ECTFE(聚乙烯氯三氟乙烯)、FFPM/FFKM(全氟弹性体)、FPM/FKM(碳氟化合物、例如氯三氟乙烯偏氟乙烯)、PFPE(全氟聚醚)、PFSA(全氟磺酸)、FPI(氟化聚酰亚胺)和全氟聚氧杂环丁烷以及这些聚合物中两种或更多种的混合物。一种特别优选的含氟聚合物是 PTFE。

[0051] 该纳米金刚石颗粒可以是基本上纯的纳米金刚石颗粒，优选纳米金刚石含量是至

少 95 重量%，更优选至少 97 重量%。

[0052] 该纳米金刚石颗粒还可以包含来源于爆轰生产纳米金刚石的石墨和无定形碳，可氧化的碳的含量优选是至少 5 重量%，更优选至少 10 重量%。可氧化的碳的含量还可以是 20 重量%或更高。

[0053] 本发明还涉及所述浆料组合物用于生产含氟聚合物涂层的用途。

[0054] 在本发明的第二方面，提供了一种含氟聚合物涂层，其包含浓度为 0.01wt% -5wt% 的纳米金刚石颗粒，所述涂层与没有添加任何纳米金刚石的参比样品相比，摩擦系数降低了至少 25%，摩擦系数在室温测量。

[0055] 本发明的一个优选的实施方案提供了一种含氟聚合物涂层，其包含浓度为 0.01wt% -5wt% 的纳米金刚石颗粒，其中所述含氟聚合物涂层通过干燥和固化包含所述含氟聚合物和纳米金刚石颗粒的浆料组合物来获得，其中该纳米金刚石颗粒的  $\zeta$  电位在 pH 值高于 8 时超过 -30mV。

[0056] 该纳米金刚石在涂层中的浓度优选是 0.1 重量% -4 重量%，更优选 0.1 重量% -3 重量%，和最优选 1 重量% -3 重量%。

[0057] 该优选的含氟聚合物定义如上。

[0058] 在一个优选的实施方案中，该涂层包含聚四氟乙烯和所述摩擦系数至多是 0.08，优选至多是 0.07。

[0059] 在另一优选的实施方案中，所述涂层表现出与没有添加任何纳米金刚石的参比样品相比，磨损降低了至少 10%，更优选至少 25%，磨损在室温测量。一种优选的涂层是聚四氟乙烯。该磨损测试是根据标准 SFS EN 13523-16 进行的 Taber 磨损测试。

[0060] 本发明的含氟聚合物涂层优选通过干燥和固化包含所述含氟聚合物和纳米金刚石颗粒的浆料组合物来获得。一种优选的浆料组合物定义如上。

[0061] 该浆料的 pH 值优选处于碱性区域中，更优选至少是 8，仍然更优选是 9-11，和最优选 9-10。

[0062] 该纳米金刚石颗粒的  $\zeta$  电位在 pH 值高于 8 时优选超过 -30mV，和最优选超过 -40mV。

[0063] 该纳米金刚石颗粒可以包含来源于该纳米金刚石生产的石墨和无定形碳。

[0064] 所用的纳米金刚石颗粒可以基本上处于单位数形式或者聚集的形式。单位数形式的 D90 粒度优选是 8nm-30nm，更优选 10nm-20nm。聚集形式的 D90 粒度优选是 30nm-1000nm，更优选 30nm-500nm。

[0065] 所用的纳米金刚石颗粒可以基本上是纯的纳米金刚石颗粒，优选纳米金刚石含量是至少 95 重量%，更优选至少 97 重量%。所用的纳米金刚石颗粒还可以包含来源于该纳米金刚石生产的石墨和无定形碳，可氧化的碳的含量优选是至少 5 重量%，更优选至少 10 重量%。可氧化的碳的含量还可以是 20 重量%或者更高。

[0066] 实施例

[0067] 材料

[0068] 实施例中所用的聚合物材料是市售的含氟聚合物浆料，被称作 FP-1、FP-2 和 FP-3。FP-1 是分散在水中的 PTFE 聚合物。FP-2 是分散在水和二甲苯中的 FEP 聚合物。FP-3 是分散在二甲苯、N-甲基吡咯烷酮 (NMP)、 $\gamma$ -丁内酯和乙苯的溶剂混合物中的 FEP 聚合物。

含氟聚合物浆料的性能列于表 1 中。

[0069] 表 1

[0070]

含氟聚合物 (FP-)	pH (基于水)	$\zeta$ 电位 (mV)	D90 (nm)	目视外观
1	10.3	-50.7	373	乳白色浆料
2	9.7	-27.9	303	乳白色浆料
3	-	-	-	黑色浆料

[0071] 这些含氟聚合物是双涂层体系的面涂材料。该双涂层体系还包括底漆聚合物。将面涂聚合物 FP-1、FP-2 和 FP-3 分别喷涂到底漆聚合物 P-1、P-2 和 P-3 的顶上。

[0072] 大部分所用的纳米金刚石是商业等级的，它们被称作 ND-1、ND-1S、ND-1N、ND-2、ND-3、ND-4、ND-5 和 ND-6。将等级为 ND-1、ND-1S、ND-2、ND-3、ND-5 和 ND-6 的纳米金刚石分散在去离子水中。ND-1N 和 ND-4 浆料基于有机溶剂，即 N-甲基吡咯烷酮 (NMP)。纳米金刚石等级 ND-3 和 ND-6 是金刚石混合物，其包含爆轰烟灰 (石墨和无定形碳)。其他等级是纯纳米金刚石。表 2 中列出了材料的纳米金刚石数据，按照原样，未经通过 pH 调整和 / 或超声处理的任何进一步聚集控制。

[0073] 表 2

[0074]

纳米金刚石等级 (ND-)	pH (基于水)	$\zeta$ 电位 (mV)	D90 (nm)	目视外观
1	10.5	-47.7	5610	灰色悬浮体
1S	8.8	-39.9	10.5	黑色分散体
1N	-	-47.7	5610	灰色悬浮体
2	10.4	-52.4	219	黑色悬浮体
3	8.6	19.2	2540	黑色悬浮体

[0075]

4	-	28.7	18.2	黑色分散体
5	4.4	47.8	14.5	黑色分散体
6	7.0	18.9	6060	黑色悬浮体

[0076] ND-1 是在去离子水中聚集的等级 ;ND 含量  $\geq 97\text{wt}\%$

[0077] ND-1S 是在去离子水中的单位数分散体 ;ND 含量  $\geq 97\text{wt}\%$

[0078] ND-1N 是在 NMP 中聚集的等级 (与 ND-1 相同的 ND 产品)

[0079] ND-2 是在去离子水中经 pH 调整的聚集的等级 ;ND 含量  $\geq 97\text{wt}\%$

[0080] ND-3 是在去离子水中聚集的等级,该共混物包含爆轰烟灰 (石墨和无定形碳) ;ND 含量  $\geq 50\text{wt}\%$

[0081] ND-4 是在 NMP 中的单位数分散体 ;ND 含量  $\geq 97\text{wt}\%$

[0082] ND-5 是在去离子水中的单位数分散体 ;ND 含量 ≥ 97wt%

[0083] ND-6 是在去离子水中聚集的等级, 获自与 ND-3 相同的共混物。

[0084] 分散体的 ζ 电位定义为“自由”分散体介质和纳米颗粒表面上流体固定层之间的电势。ζ 电位是分散体的胶体稳定性的度量。ζ 电位的绝对值越高, 分散体的稳定性越高。颗粒的 ζ 电位取决于溶液 pH 值。在低 pH 值时, ζ 电位是正值, 在高 pH 值时, ζ 电位是负值。ζ 电位为零的 pH 值被称作等电点 (IEP)。

[0085] 在该研究中所提出的粒度是 D90 值。这表示样品中 90% 的颗粒的直径小于该 D90 值。

[0086] 在该研究中复合材料涂层作为“数字 - 数字”来标记。第一个数字是含氟聚合物编号 (FP-), 第二个数字指的是纳米金刚石等级 (ND-)。例如, FP-1 和 ND-2 的复合材料被标记为“1-2”。参比样品被称作 1R、2R 和 3R。该研究中所用的浓度以重量百分比提出。所提出的全部百分比是复合材料涂层中纳米金刚石的浓度 :

[0087]

$$C_{\text{复合材料}} = \frac{m_{\text{ND}}}{m_{\text{ND}} + m_{\text{FP}}} = \frac{c_{\text{ND悬浮体}} m_{\text{ND悬浮体}}}{c_{\text{ND悬浮体}} m_{\text{ND悬浮体}} + c_{\text{FP浆料}} m_{\text{FP浆料}}} \quad (1)$$

[0088] 其中  $c_{\text{ND悬浮体}}$  和  $m_{\text{ND悬浮体}}$  指的是纳米金刚石等级的参数,  $c_{\text{FP浆料}}$  和  $m_{\text{FP浆料}}$  指的是含氟聚合物浆料的浓度和质量。式 1 中的浓度是纳米金刚石悬浮体 (或分散体) 和含氟聚合物浆料二者中固体的重量百分比。

[0089] 该含氟聚合物固体浓度列于表 3 中。

[0090] 表 3

[0091]

含氟聚合物	FP-1	FP-2	FP-3
浓度(wt%)	58.5-61.5	43.8-46.8	27.27
计算所用浓度(wt%)	60.0	45.3	27.27

[0092] 悬浮体 / 分散体中的纳米金刚石浓度列于表 4 中。

[0093] 表 4

[0094]

纳米金刚石等级(ND-)	1	1S	1N	2	3	4	5	6
浓度(wt%)	5.0	2.9	5.0	4.75	5.0	1.0*	5.0	5.0

[0095] \* 浓度单位 w/V%。

[0096] 实验工作

[0097] 实验工作分为四个不同部分 : 起始材料性能的测量, 含氟聚合物和纳米金刚石的混合测试, 用复合材料浆料的涂覆实验和这些涂层的摩擦学测试。该涂覆实验也分为两组 : 第一组用广范围的不同复合材料来进行。第二组用较少复合材料来进行, 该复合材料基于第一组的结果来选择。在第二组中, 所选复合材料在不同浓度测试, 而在第一组中浓度是固定的。

[0098] 测量起始材料的性能

[0099] 含氟聚合物和纳米金刚石二者的 pH 值用 VWR pHenomenal pH 值测量装置来测量。ζ 电位和粒度测量用 Malvern Zetasizer Nano ZS 来进行,其通过测定电泳迁移率而测量 ζ 电位。电泳迁移率通过施加电场到液体介质中的样品上,并且测量颗粒的速度来测量。颗粒速度通过激光多普勒速度计 (LDV) 测量。ζ 电位通过应用亨利等式 (式 2) 来获自电泳迁移率:

[0100]

$$U_E = \frac{2\epsilon z f(ka)}{3\eta} \quad (2)$$

[0101] 其中  $U_E$  是电泳迁移率,  $z$  是 ζ 电位,  $\epsilon$  是介电常数,  $\eta$  是粘度和  $f(ka)$  是亨利函数。(Malvern Zetasizer Nano ZS 手册)

[0102] Zetasizer 使用动态光散射 (DLS) 来测量粒度。DLS 测量了颗粒的布朗运动,并且将其与颗粒尺寸相关联。通常,由于布朗运动,小颗粒的移动比大颗粒更快。因此可以区分尺寸。应当认识到,该装置能够测量的直径上限是约 5-6 μm,因此某些纳米金刚石等级的聚集体会甚至大于测量显示。(Malvern Zetasizer Nano ZS 手册)

[0103] 混合测试

[0104] 将该含氟聚合物浆料与纳米金刚石等级混合,来观察它们多快一起分散,和更重要地,当将它放置沉降时,该复合材料浆料在混合后如何起作用。该混合测试在室温进行。该聚合物样品的质量是 30g。对于悬浮体来说,该复合材料的纳米金刚石浓度是 0.1、0.5、1.0、2.0 和 3.0/5.0wt%。该分散体以纳米金刚石浓度 0.05、0.1、0.5 和 1.0wt% 来混合。

[0105] 将该纳米金刚石悬浮体用磁性混合器混合 15 分钟 (300rpm),然后用 Hielscher UP400S 超声处理 60 分钟,再将该悬浮体混合 (200rpm),来将所用的聚集的纳米金刚石等级 D90 降低到远低于 1000nm。将该含氟聚合物浆料混合,以出现涡流,然后逐滴添加纳米金刚石悬浮体 / 分散体。该混合测试通过目视观察来评价。

[0106] 涂覆实验

[0107] 制备用于第一组的复合材料浆料全部处于固定浓度,对于纳米金刚石悬浮体来说是 1.0wt% 和对于纳米金刚石分散体来说是 0.1wt%。在第二组中,该复合材料样品包含 0.1、0.5、1.0、2.0 和 3.0wt% 纳米金刚石,其由纳米金刚石悬浮体等级制成。将该分散体等级混合到含氟聚合物,纳米金刚石在复合材料中的浓度是 0.05、0.1、0.25、0.5 和 1.0wt%。在混合该复合材料浆料之前,将该纳米金刚石悬浮体混合 30 分钟 (300rpm) 和用 Hielscher UP 400S 超声处理 60 分钟,再混合该悬浮体 (200rpm)。这在第一组和第二组中都进行。用于该涂层而制备的样品和它们的制备时间 (涂覆前的小时) 可以在表 5 中找到。

[0108] 表 5

[0109]

<b>第一组</b>			
<b>含氟聚合物</b>	<b>复合材料中的 ND 等级(ND-)</b>	<b>浓度设定</b>	<b>制备时间(涂覆前的小时)</b>
<b>FP-1</b>	<b>参比</b>	<b>R</b>	<b>-</b>
	<b>1、2、3</b>	<b>A1</b>	<b>5</b>
	<b>1S、5</b>	<b>B1</b>	<b>4</b>
<b>FP-2</b>	<b>参比</b>	<b>R</b>	<b>-</b>
	<b>1、2、3</b>	<b>A1</b>	<b>7</b>
	<b>1S、5</b>	<b>B1</b>	<b>6</b>
<b>FP-3</b>	<b>参比</b>	<b>R</b>	<b>-</b>
	<b>1N</b>	<b>A1</b>	<b>80</b>
	<b>4</b>	<b>B1</b>	<b>80</b>
<b>第二组</b>			
<b>FP-1</b>	<b>参比</b>	<b>R</b>	<b>-</b>
	<b>1、2、6</b>	<b>A2</b>	<b>20</b>
<b>FP-2</b>	<b>参比</b>	<b>R</b>	<b>-</b>
	<b>2、6</b>	<b>A2</b>	<b>16</b>
	<b>1S</b>	<b>B2</b>	<b>16</b>
<b>FP-3</b>	<b>参比</b>	<b>R</b>	<b>-</b>
	<b>1N</b>	<b>C2</b>	<b>24</b>
<b>浓度设定</b>	<b>浓度(wt%)</b>		
<b>R</b>	<b>0.0</b>		
<b>A1</b>	<b>1.0</b>		
<b>B1</b>	<b>0.1</b>		
<b>A2</b>	<b>0.1、0.5、1.0、2.0、3.0</b>		
<b>B2</b>	<b>0.05、0.1、0.25、0.5、1.0</b>		
<b>C2</b>	<b>0.1、0.5、1.0、2.0、3.0、10.0</b>		

[0110] 涂覆在不锈钢 (EN 1.4301/AISI 304) 基底上进行。该基底是约 100mm×100mm 的正方形板。该板的厚度是 1mm 和 3mm。较薄的样品用于磨损测试,较厚的板用于摩擦测试。在 1mm 厚的基底上钻了 6.5mm 的孔来安装磨损测试仪。将该样品喷砂来确保底漆聚合物良好的附着。该喷砂用 F60 级氧化铝颗粒进行。

[0111] 在喷砂样品的顶上喷涂底漆。将面涂层喷于底漆顶上。该喷涂用重力喷枪在室温进行。底漆和面涂层二者根据表 6,用在第一和第二组二者中相同的程序来干燥和固化。在第一组中,重力进料杯在每次喷涂之后,接下来的复合材料喷涂之前进行清洗。在第二组中,将该复合材料喷涂,因此首先喷涂最低浓度,上移到最高浓度。在一种复合材料的全部

浓度喷涂之后,清洗重力进料杯。

[0112] 表 6

[0113]

聚合物	干燥温度 (°C)	干燥时间 (min)	固化温度 (°C)	固化时间 (min)
<b>P-1</b>	<b>RT</b>	<b>60</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>FP-1</b>	<b>100</b>	<b>10</b>	<b>410</b>	<b>5</b>
<b>P-2</b>	<b>120</b>	<b>10</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>FP-2</b>	<b>100</b>	<b>10</b>	<b>380</b>	<b>20</b>
<b>P-3</b>	<b>110</b>	<b>10</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>FP-3</b>	<b>110</b>	<b>20</b>	<b>240</b>	<b>20</b>

[0114] 厚度和表面粗糙度在涂覆后测量。厚度用 elcometer 456 测量。表面粗糙度用 Ra 测试仪 Taylor Hobson Pneumo Surtronic 10 测试。

[0115] 摩擦学测试

[0116] 含氟聚合物的摩擦用销盘式 (pin-on-disk) 测试方法来测试。该方法基于文献评述来选择。文献中所用的球板式方法具有相同的原理。所选参数与文献中找到的参数处于同一量级。精确的选择与装置有关。选择 Taber 磨损测试,因为含氟聚合物生产商使用它来测试磨损。磨损测试结果和所用参数在生产商提供的数据表中给出。该测试也是标准化的,和由此进行。

[0117] 摩擦测量

[0118] 摩擦系数用销盘式装置来测试。将样品固定到旋转的支架上。钢球在该样品顶上滑动。速度是 3.9cm/s。销负荷是 2.9N。一个测试进行 10 分钟,并且每个涂层用 3 个样品来测试。该研究所提出的结果是三次测试的平均值。该装置测量了侧向力,不过它被转化成到计算机的电压。然后分析该电压曲线来找出测试的静态摩擦区。然后平均该区域的电压结果。通过校正曲线将平均值转化回到侧向力。因此摩擦系数通过式 3 来计算:

[0119]

$$\mu = \frac{F_{\text{侧向}}}{F_{\text{法向}}} \quad (3)$$

[0120] 磨损测试

[0121] 样品的耐磨性用 Taber 5131 Abraser 磨损测试仪来测试。该测试根据标准 SFS EN 13523-16 来进行,具有如下所述的少数例外。Taber 磨损测试的原理很简单:将样品固定到旋转的样品支架上。在样品顶上是两个研磨盘,其随着样品支架的旋转而在样品顶上自由滚动,由此研磨了该样品。在旋转了一定量的周期之后,停止该测试,并且测量质量损失。磨损以使用一定负荷的某些周期来报告(毫克)。将研磨盘每 1000 转用 150 砂度的砂纸重修表面。负荷以每个臂的附加负荷的质量来报告。刻度精确度是 0.1mg。(标准 SFS

EN 13523-16)

[0122] 对各样品持续进行该磨损测试,直到涂层破裂和基底暴露。根据该标准,该测试每 250 或 500 个周期停止,这取决于该复合材料。但是,如果基底已经在 250 个周期露出,则继续该测试到 500 个周期来获得可比较的值。研磨盘也在该测试期间磨损。使得该盘磨损比标准规定更长的时间,达到生产商在盘上所标记的限度,该盘直径是 41.50mm。

[0123] 该测试使用 CS-17 研磨盘,以每个臂 1000g 附加负荷来进行,以提供苛刻的条件。这些条件也用于 FP-2 的生产商所提供的数据表中。该结果在 500 次旋转进行比较。转速是 60rpm。温度是 20°C 和空气湿度是 37%。吸入装置的真空水平是 100%。磨损由每个涂层三个样品来测量,并且该研究所提出的结果是这些结果的平均值。

[0124] 用 SEM 的结构检查

[0125] 涂层结构通过扫描电镜来观察。没有对聚合物结构进行深度分析。SEM 是 Hitachi 4700。SEM 样品用金颗粒溅射,来制造导电样品。各涂层的结构用 SEM 以小的放大倍率来照相。用 SEM 尝试了更高的放大倍率,但是由于样品的带电和加热而发生了问题。

[0126] 结果

[0127] 提出了获自该测试的结果。口头评价了混合实验。摩擦和磨损结果作为图来表示。

[0128] 厚度和表面粗糙度

[0129] 必须考虑厚度来完全理解磨损结果。在第一组中,例如复合材料 1-3 显示了高磨损。但是,将磨损结果与厚度结果比较,很显然复合材料涂层是如此的薄,以至于磨损看起来很高,不过它不可能远高于其他。表面粗糙度 (Ra) 显示了涂层的品质和孔隙率。表面粗糙度越小,涂层孔隙率越小,并且品质越好。

[0130] 表 7 中给出了复合材料 1-1、1-2 和 2-1S 的表面粗糙度 Ra ( $\mu\text{m}$ )。参比样品是 PTFE 聚合物 (FP-1) 和 FEP 聚合物 (FP-2)。将参比样品和复合材料涂覆到 1mm 钢基底上。

[0131] 表 7

[0132]

样品 / 复合材料	纳米金刚石浓度 (wt%)	表面粗糙度 ( $\mu\text{m}$ )
FP-1 (参比)	0	2.7
1-1	0.1	2.7
1-1	0.5	2.3
1-1	1.0	1.4
1-1	2.0	1.3
1-1	3.0	1.0
1-2	0.1	1.4
1-2	0.5	1.3

1-2	1.0	0.8
1-2	2.0	0.9
1-2	3.0	0.9
FP-2(参比)	0	3.3
2-1S	0.05	2.1
2-1S	0.1	0.7
2-1S	0.25	0.5
2-1S	0.5	1.1
2-1S	1.0	0.7

[0133] 从表 7 中可见,当复合材料包含 3wt%的纳米金刚石颗粒(样品 1-1)时,表面粗糙度(Ra)下降了 63%(从 2.7 到 1.0)。样品 1-1 代表了商业纳米金刚石悬浮体 uDiamond Allegro。

[0134] 当复合材料包含 1wt%的纳米金刚石颗粒(样品 1-2)时,表面粗糙度(Ra)下降了 70.4%(从 2.7 到 0.8)。样品 1-2 代表了商业纳米金刚石悬浮体 Allegro,其 pH 值已经调整为约 9。

[0135] 当复合材料包含 0.25wt%的纳米金刚石颗粒(样品 2-1S)时,表面粗糙度(Ra)下降了 85%(从 3.3 到 0.5)。样品 2-1S 代表了商业高  $\zeta$  负值纳米金刚石分散体,其被称作 uDiamond Vox D。

[0136] 第一组的摩擦学结果

[0137] 结果在图(图 1-3)中给出,其包括由一种含氟聚合物制成的复合材料。该纳米金刚石的浓度是纳米金刚石悬浮体等级 1.0wt%和分散体等级 0.1wt%。

[0138] 摩擦

[0139] 复合材料的摩擦通过比较摩擦系数而提出。图 1 显示了来自第一组涂层的摩擦结果。基于水的含氟聚合物 FP-1 的最低摩擦系数用纳米金刚石等级 ND-3 添加来获得。应当注意的是,摩擦系数仅在室温条件测量,并且基于现有技术,可以假定所测量的摩擦系数当在升高的温度如 150°C 测量时将进一步降低。

[0140] 磨损

[0141] 第一组的磨损结果在图 2 和图 3 中给出。最低的磨损用纳米金刚石等级 ND-2(FP-1) 和 ND-5(FP-2) 获得。所述值分别是 14.2mg 和 18.3mg。在图 2 中,复合材料涂层 1-3 的基底已经暴露了 250 个周期。该涂层极度损坏,以至于测试难以继续。

[0142] 第二组的摩擦学结果

[0143] 第二组样品基于第一组的结果。该复合材料基于摩擦学和目视外观二者来选择。

例如,包含纳米金刚石等级 ND-5 的复合材料在进一步的研究中由于它们的目视外观而被排除,不过它们的耐磨性相当好。该纳米金刚石聚集和停留在浆料顶部。它们不能分散到聚合物中。

#### [0144] 摩擦

[0145] 该复合材料的摩擦通过比较摩擦系数来给出。FP-1 复合材料的摩擦系数在图 4-6 中给出。FP-1 复合材料最低摩擦系数用复合材料 1-2(图 5) 获得。当纳米金刚石浓度是 2.0wt% 时,摩擦系数下降到 0.05。

#### [0146] 磨损

[0147] 基于 FP-2 的复合材料的磨损在图 7 中给出。FP-2 复合材料的最佳耐磨性用复合材料 2-1S 获得。该纳米金刚石浓度是 0.25wt%。涂层在 500 个周期的磨损是 17.6mg。

#### [0148] 结构分析

[0149] 结构分析基于摩擦学结果。基于该结果,对一些所生产的复合材料涂层进行该分析。该分析用 SEM 以较低的放大倍率来进行。对于第二组的复合材料 1-2(2.0wt%),也采取了较大放大倍率的图。

#### [0150] 第一组

[0151] 图 8 代表了第一组的 SEM 图。在图 8 中,复合材料 1-2 以 50× 放大倍率绘图。

#### [0152] 第二组

[0153] 在图 9 中,存在 FP-1 参比样品,用于与该复合材料比较。放大倍率是 50×。图 10 中给出的图代表了放大倍率 50× 的复合材料 1-2(2.0wt%)。

#### [0154] 另外的磨损测试

[0155] 在图 11 和 12 中给出了另外的磨损测试。该测试如上所述来进行。

[0156] 在图 11 中,给出了基于 FP-2 和几个纳米金刚石颗粒 (ND-1S') 浓度的涂层复合材料的磨损。该纳米金刚石颗粒 1S' 具有与纳米金刚石颗粒 1S 相同的特征,区别在于 1S' 的  $\zeta$  电位是 -55mV。1S' 较高的负  $\zeta$  电位来源于与纳米金刚石颗粒 1S 相比,纳米金刚石表面上较高度度的羧酸末端。在所研究的纳米金刚石浓度范围内,最佳耐磨性用纳米金刚石浓度 0.25wt% 来获得。该涂层在 500 个周期的磨损是 16.9mg。即,磨损相比于参比样品下降了 34%。

[0157] 在图 12 中,给出了基于 FP-2 和几个纳米金刚石颗粒 (ND-5') 浓度的涂层复合材料的磨损。该纳米金刚石颗粒 5' 的表面主要是氢封端的,这赋予了它比在较前实施例中所应用的纳米金刚石颗粒 5 更高的正  $\zeta$  电位。所应用的氢封端的纳米金刚石颗粒 5' 的  $\zeta$  电位是 +55mV。最佳耐磨性用纳米金刚石浓度 0.25wt% 来获得。该涂层在 500 个周期的磨损是 22.6mg。即,磨损相比于参考物下降了 11.7%。

#### [0158] 讨论

[0159] 进行该述混合测试,以发现 ND 等级混合到含氟聚合物的能力。理论是因为含氟聚合物具有高的负  $\zeta$  电位,所以纳米金刚石的负  $\zeta$  电位越高,在碱性环境中的混合 (ND-1 和 ND-2) 越好。这种假定得到了确认。此外,结论是可以将含有石墨和无定形碳的 ND-3/6 材料有效混合到含氟聚合物中,即使它们具有正  $\zeta$  电位。

[0160] 已经发现由使用纳米金刚石材料而形成的摩擦学性能的改进取决于纳米金刚石的性能,该性能是分散速率(聚集体尺寸)和所用的纳米金刚石材料在碱性条件中的  $\zeta$  电

位,这通过使用 ND-2 和 ND-1S 作为纳米金刚石添加剂的明显改进的摩擦学性能来证实。二者都具有高的负  $\zeta$  电位,并且聚集体尺寸小。ND-1S 甚至接近单位数。ND-6 优异的性能非常可能通过粉末中所含的爆轰烟灰形成。片状结构的石墨能够容易地置于平坦的含氟聚合物分子之间,因此改进了转移层形成和结合。第二组显示,最佳结果用具有相容的纳米金刚石悬浮体的 1-2wt% 纳米金刚石含量和具有相容的纳米金刚石分散体的 0.25wt% 含量来获得。

[0161] 该结果显示,影响复合材料的摩擦学性能的关键因素是纳米金刚石在涂料中的分散速率,纳米金刚石的浓度和起始材料的初始性能,性能是  $\zeta$  电位、聚集体粒度和所用的含氟聚合物介质 pH 值。涂料分散速率主要受控于纳米金刚石初级颗粒表面化学,其容易地通过材料区别性的  $\zeta$  电位性能来表征。已经发现,当纳米金刚石材料分散到碱性含氟聚合物悬浮体中时,用具有尽可能高的负  $\zeta$  电位值的纳米金刚石可以获得最佳的聚集控制和因此最佳的含氟聚合物机械性能。同样石墨状颗粒 ND-3 和 ND-6 的平面性改进了分散和因此改进了摩擦学性能。

[0162] 第一组涂层的摩擦学结果显示改进了磨损和摩擦性能二者。第一和第二组涂料的结果在表 7 和 8 中给出。对于分散体和悬浮体等级的 ND,所比较的浓度分别是 0.1 和 1.0wt%。

[0163] 在表 7 中,比较了参比样品,FP-1 和 FP-2 组的样品 1-1、1-2 和 1-6 的摩擦性能。全部所比较的复合材料样品的特点是降低的摩擦性能。FP-1 和 FP-2 参比样品的 COF 保持得相当恒定。

[0164] 表 7

[0165]

	组	
	1	2
<b>1R</b>	<b>0.138</b>	<b>0.141</b>
<b>1-1</b>	<b>0.103</b>	<b>0.071</b>
<b>1-2</b>	<b>0.090</b>	<b>0.075</b>
<b>1-6 (3)</b>	<b>0.087</b>	<b>0.109</b>

[0166] 表 8 比较了所述两组中获得的磨损数据。FP-1 复合材料的磨损性能得以改进。FP-2 复合材料的磨损性能通常表现为在第二组中明显可以再现。

[0167] 表 8

[0168]

	组	
	1	2
<b>1R</b>	<b>16.20</b>	<b>12.00</b>
<b>1-1</b>	<b>15.43</b>	<b>15.27</b>
<b>1-2</b>	<b>14.17</b>	<b>13.63</b>
<b>1-6 (3)</b>	<b>11.17</b>	<b>9.20</b>
<b>2R</b>	<b>27.43</b>	<b>21.65</b>
<b>2-1S</b>	<b>18.57</b>	<b>18.67</b>
<b>2-2</b>	<b>20.10</b>	<b>18.90</b>
<b>2-6 (3)</b>	<b>20.07</b>	<b>17.17</b>

[0169] 相同的原理和参数被用于两组的制备和涂覆实验中。但是，第二组中FP-1和FP-2参比样品与第一组相比明显改进，并且是基于在相同的固化温度中稍长的固化时间。因此，可以预期与在相同的时间沉积和固化和因此通过类似的制造条件的参比样品相比，该纳米金刚石的添加导致含氟聚合物涂层机械性能的一定改进。

[0170] 用SEM获得的结构照片显示了聚合物的基本结构。比较图8、9和10，很显然添加纳米金刚石改变了PTFE的结构。可以看到与代表参比样品的图9的结构相比，在代表本发明的图8和图10中，由于添加纳米金刚石，结构会变化，这样裂缝宽度降低。

[0171] 可以得出结论，添加纳米金刚石改进了含氟聚合物的摩擦学性能：磨损和摩擦二者，并且最佳结果用添加了1.0-2.0wt%的纳米金刚石的复合材料1-2和2-6获得。

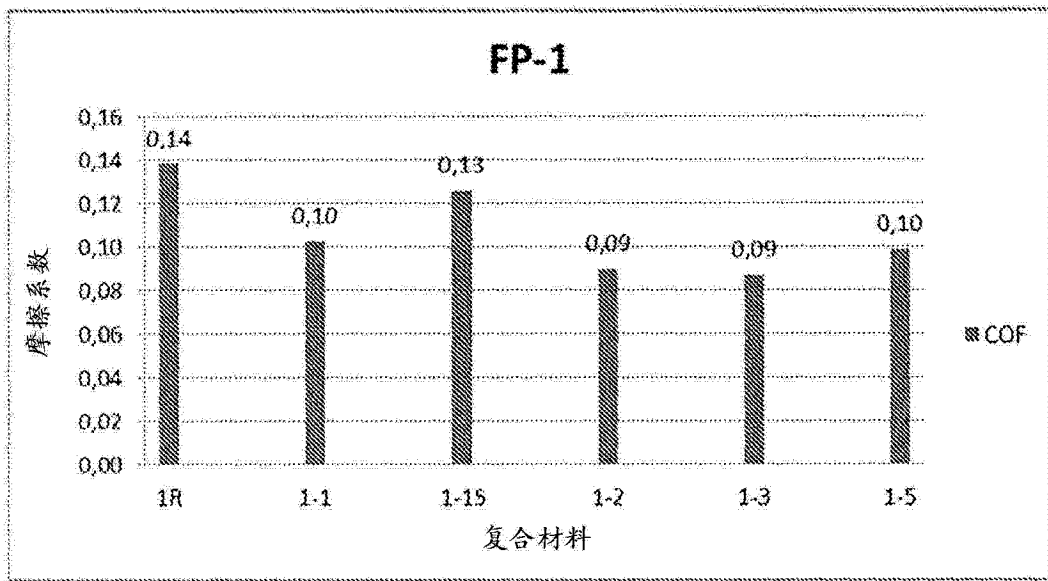


图 1

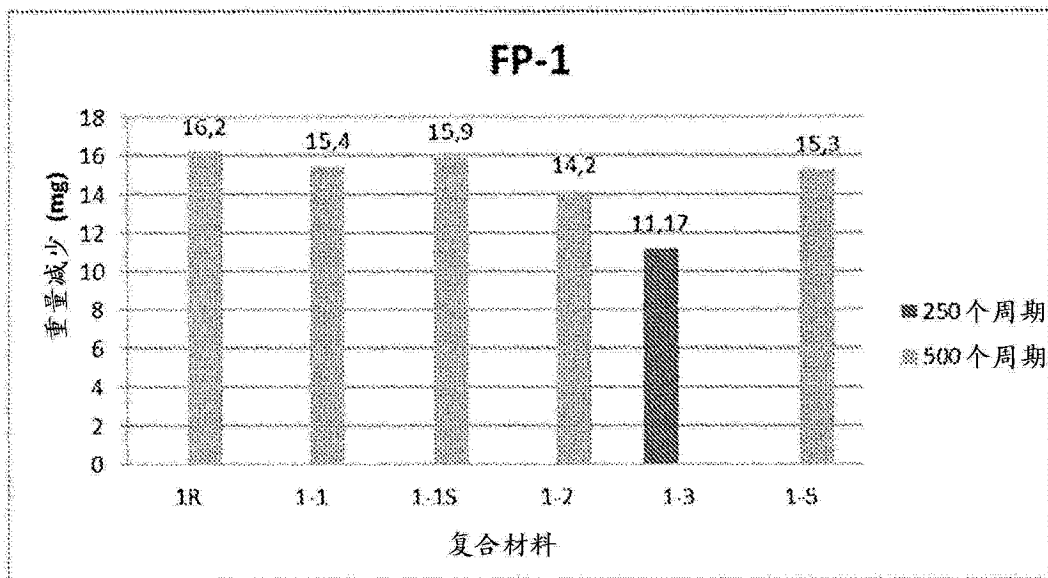


图 2

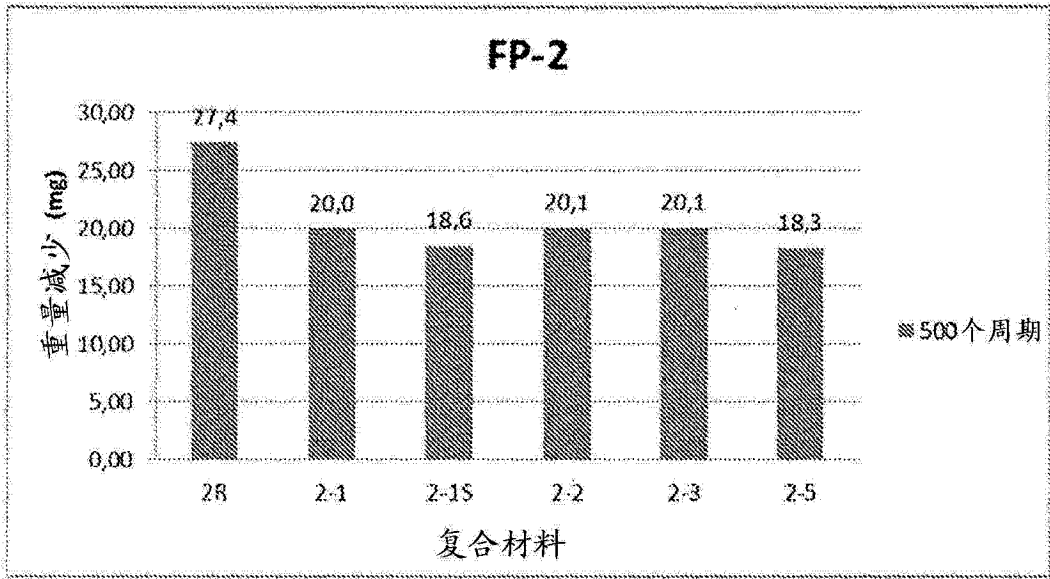


图 3

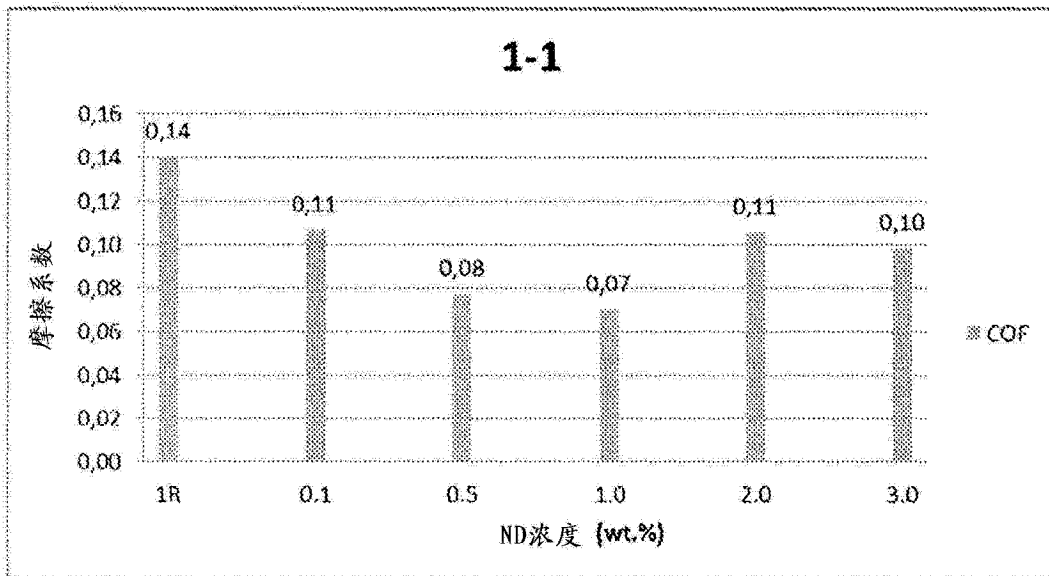


图 4

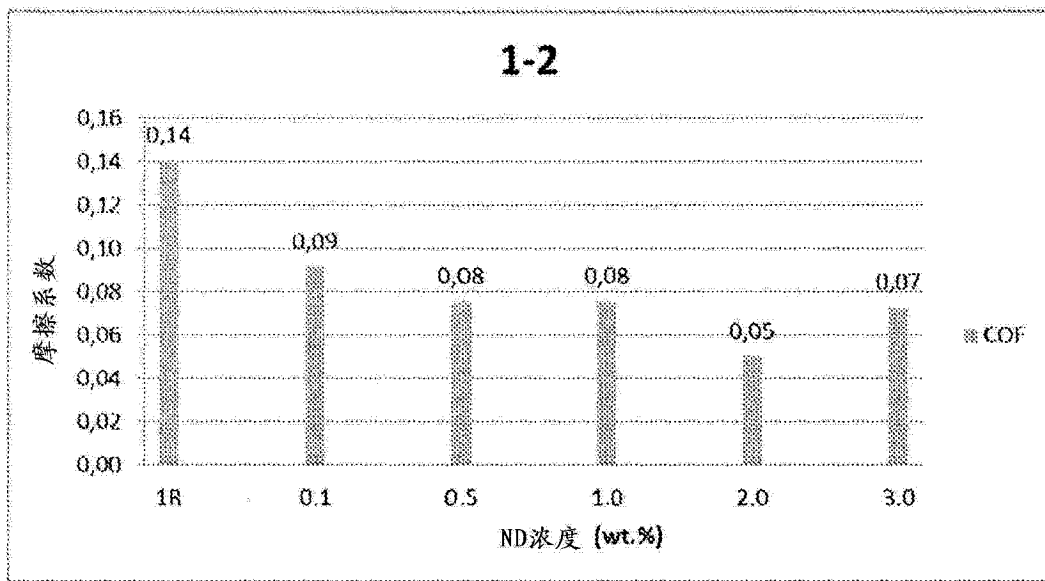


图 5

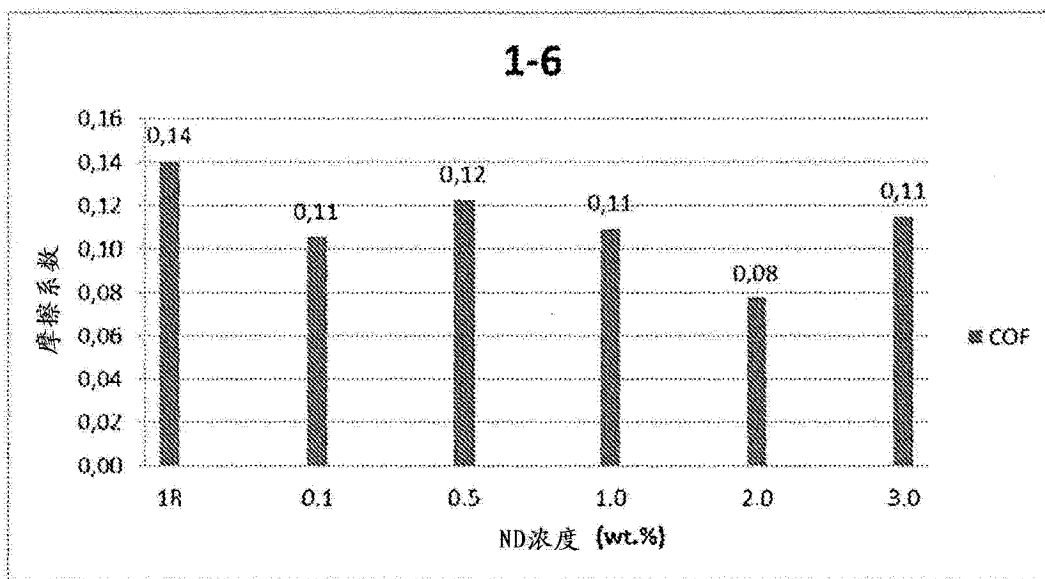


图 6

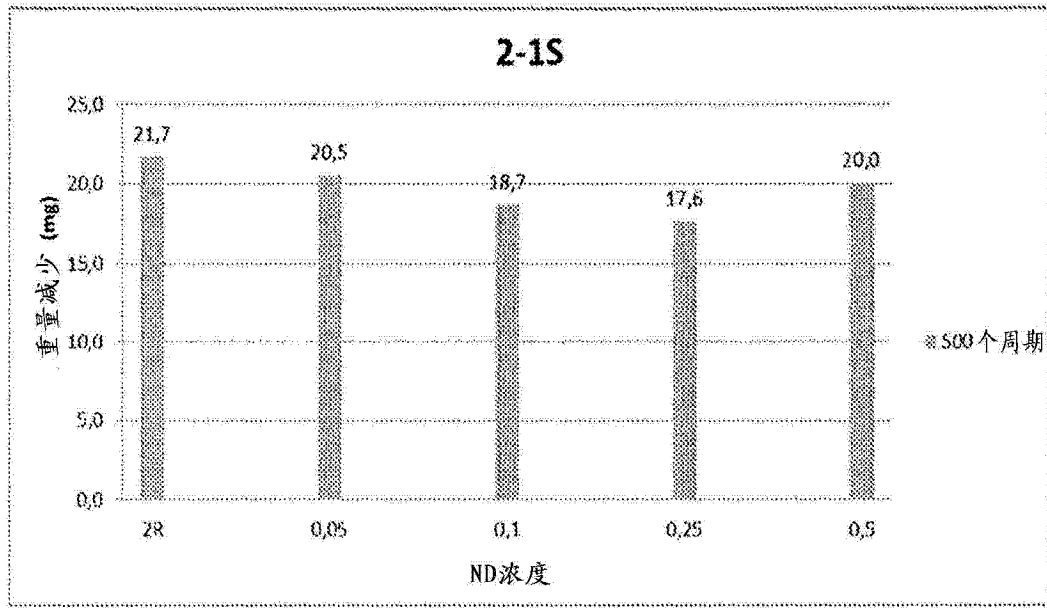


图 7

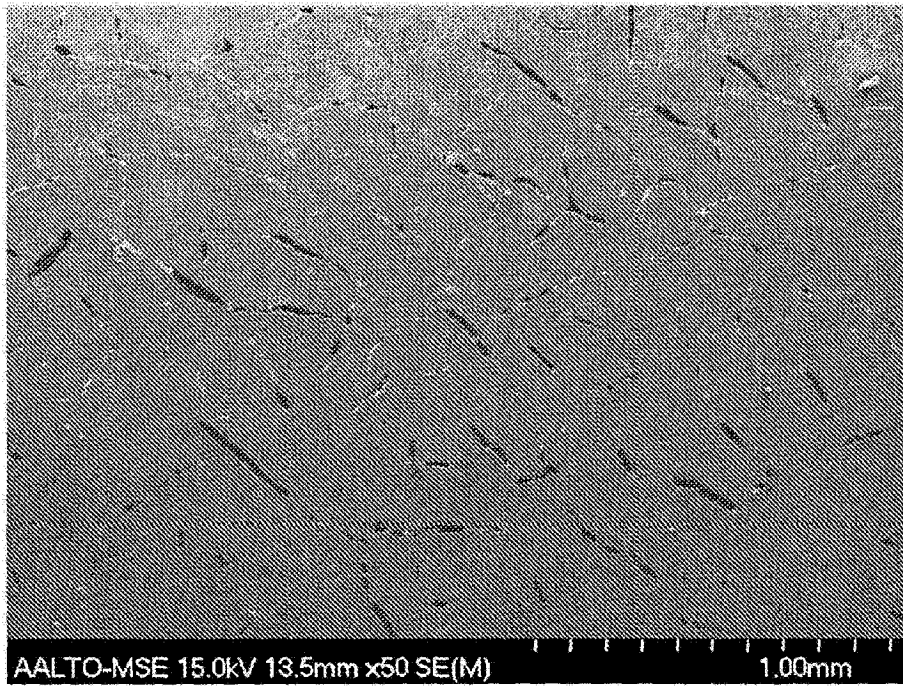


图 8

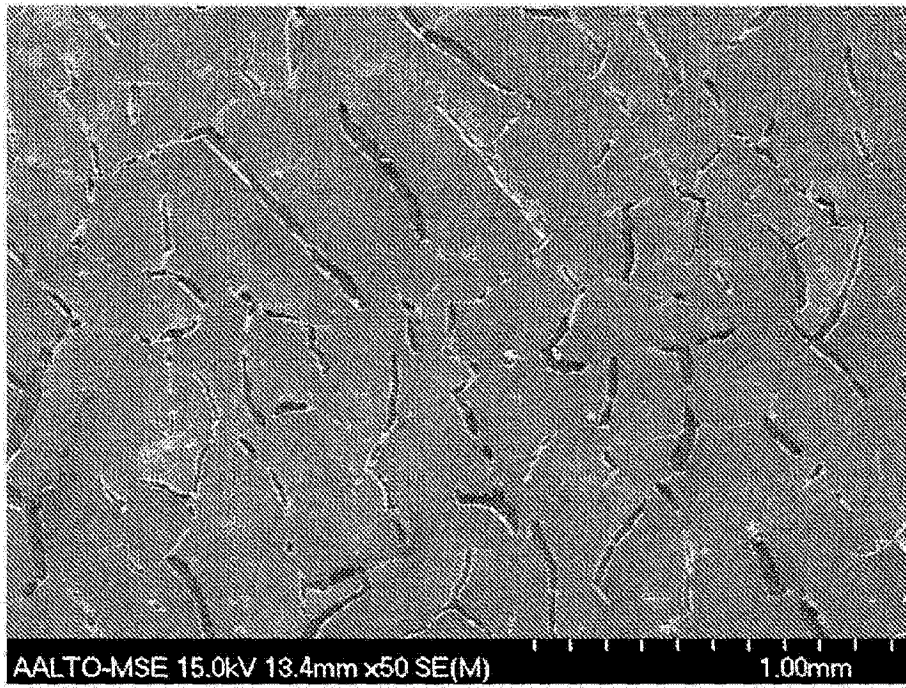


图 9

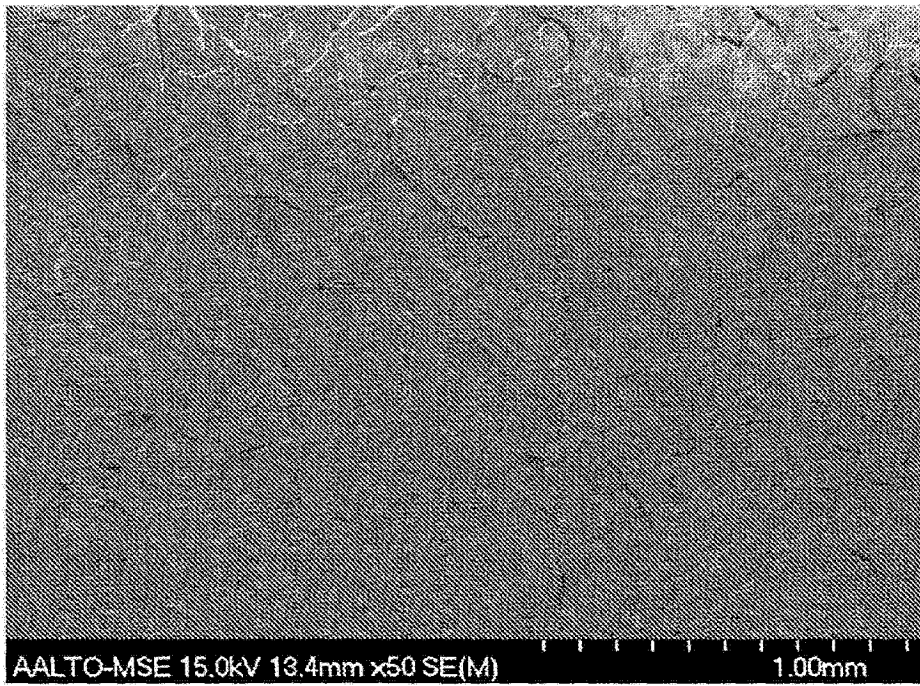


图 10

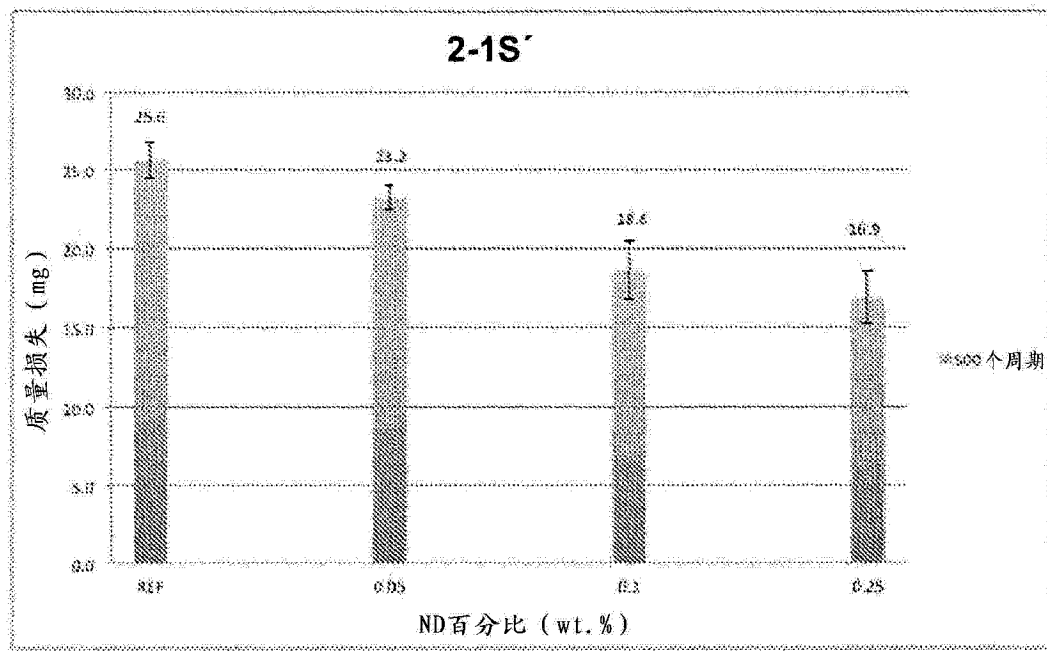


图 11

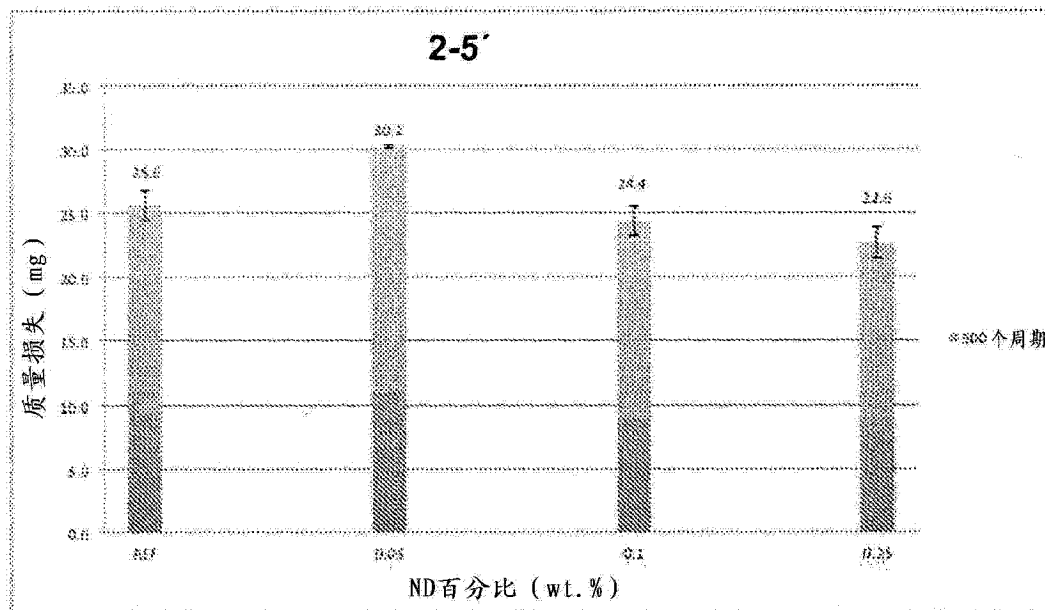


图 12