



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 99815095.9

[43] 授权公告日 2003 年 4 月 23 日

[11] 授权公告号 CN 1106319C

[22] 申请日 1999.10.26 [21] 申请号 99815095.9

[30] 优先权

[32] 1998.10.27 [33] US [31] 60/105,782

[86] 国际申请 PCT/US99/25124 1999.10.26

[87] 国际公布 WO00/24634 英 2000.5.4

[85] 进入国家阶段日期 2001.6.26

[71] 专利权人 达特茅斯学院理事会

地址 美国新罕布什尔

[72] 发明人 维克托·彼德连科

[56] 参考文献

USA2870311 1959.01.20

USA4330703 1982.05.18 H05B3/12

USA4897597 1990.01.30 G01R27/02

USA5398547 1995.03.21 B64D15/20

USA5551288 1996.09.03

审查员 严勇刚

[74] 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司

代理人 蹇 炜

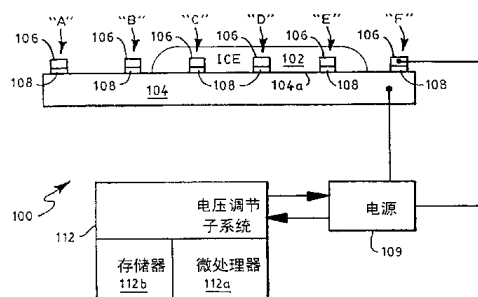
权利要求书 2 页 说明书 30 页 附图 9 页

[54] 发明名称 改变冰附着强度的系统

[57] 摘要

本发明包括一种用来在物体表面结冰时改变冰附着强度的系统。该系统包括：一个与物体绝缘的电极；一个连接到物体和电极上的直流电源（例如，蓄电池）。在冰接通电路时，直流电源在冰和物体之间的界面上产生直流偏压。这个物体是导体或掺杂半导体，从而，与零偏压下相比，在冰和物体之间的界面上施加非零偏压能够有选择性地改变冰附着强度。相对于静态（即，不施加偏压的状态）来说，冰附着强度能够被提高或降低。这样，就能够便于除冰（例如，飞机机翼上的冰）。系统中的物体和电极之间最好设置绝缘材料；而且绝缘材料的形状大体上与物体及电极相同。就大多数应用场合而言，电极包括外形与物体表面一致的栅状电极，而且栅状电极的每一个点均和电源接通。相应地，物体和栅状电极之间通常也设置有栅状电极绝缘材料。本发明的一个实施例使用了多孔渗透材

料来有选择性地给物体表面上的冰释放添加剂；另一个实施例使用了自组装单层来降低冰和金属之间的氢键键合强度。在一个实施例中，本发明还提供了其特性随温度变化的输电线涂层，使输电线的涂层能够在结冰条件下融化线路上的冰雪。



1. 一种用来在物体表面结冰时改变冰附着强度的系统，包括：一个与物体绝缘的电极；一个直流电源，连接到物体和电极上，以便在冰和物体之间的界面上产生直流偏压；电极具有多孔材料，用来给冰掺入添加剂，以提高冰的导电性；直流偏压具有一个电压，该电压与零偏压相比，能够有选择性地改变冰的附着强度。

2. 根据权利要求 1 所述的系统，进一步包括：绝缘材料，位于物体和电极之间，绝缘材料的形状与电极基本上相同。

3. 根据权利要求 1 所述的系统，其中，电极包括栅状电极，其形状与物体的表面一致，栅状电极的每一个点均和电源接通。

4. 根据权利要求 3 所述的系统，进一步包括：栅状绝缘材料，位于物体和栅状电极之间。

5. 根据权利要求 1 所述的系统，进一步包括：一个直流电流表，该直流电流表连接在具有电极和电源的电路中，用来测量冰的直流导电性。

6. 根据权利要求 5 所述的系统，进一步包括：一个交流电源和一个交流电流表，连接在具有电极和电源的电路中，用来测量冰的交流导电性。

7. 根据权利要求 6 所述的系统，其中，交流电源产生一种或多种在大约 10kHz ~100kHz 之间的频率。

8. 根据权利要求 6 所述的系统，进一步包括：一个电流比较器，该电流比较器连接直流电流表和交流电流表，用来产生一个代表直流导电性与交流导电性之比的信号。

9. 根据权利要求 8 所述的系统，进一步包括：一个反馈子系统，用来评定信号，并确定是水还是冰引起电极和物体短路。

10. 根据权利要求 9 所述的系统，进一步包括：一个温度传感

器，用来测量冰的温度，并将代表冰的温度的信号传送给反馈子系统。

11. 根据权利要求 9 所述的系统，进一步包括：一个结冰报警子系统，该子系统根据冰的交流导电性与直流导电性之比的预定数值来探测物体表面的结冰，一旦探测到结冰，该报警子系统即启动系统。

12. 一种用来在物体表面结冰时改变冰附着强度的系统，包括：一个与物体绝缘的电极；一个直流电源，连接到物体和电极上，在冰和物体之间的界面上产生直流偏压；一种多孔材料，位于物体的至少一部分上，用来提高冰的导电性；直流偏压具有一个电压，该电压与零偏压相比，能够有选择性地改变冰的附着强度。

13 根据权利要求 1 或 12 所述的系统，其中，物体有一个自组装单层，该自组装单层具有不同的疏水性和亲水性，以改变冰的附着强度。

改变冰附着强度的系统

本发明所属技术领域

本发明涉及改变冰和所选材料之间的冰附着强度的设备，特别是涉及在冰和所选材料之间的界面上施加电能，根据需要来提高或降低冰附着强度的系统。

背景技术

冰附着于某些表面会引发许多问题。例如，冰在飞机机翼上积聚过多会危及飞机及乘客的安全。船体上结冰会造成航行困难，消耗更多能量，并产生某些不安全因素。刮除汽车风挡玻璃上的结冰，被大多数成年人视为一件烦人的重复性杂务；任何残留的冰都会影响驾驶员的能见距离及安全性。

直升机螺旋桨叶和公路路面的结冰以及冰附着现象也会引发问题。在冰和雪的清除和控制方面，花费高达数十亿美元。另外，冰还能够附着于金属、塑料及陶瓷材料上，造成其他各种日常困难。

输电线路的结冰也会引发问题。结冰会增加输电线路的重量，造成线路中断而断电，其直接和间接经济损失也高达数十亿美元。

就现有技术而言，虽然处理冰附着的方法有多种，但大多数方法均涉及到某种形式的刮除、熔化或打碎。例如，航空界使用除冰溶液（例如，乙二醇）来熔化飞机机翼上的积冰。虽然这种方法费用昂贵，而且对环境有害，但是，机翼积冰会危及乘客的安全使得有理由使用这种除冰方法。另外，有的飞机是利用沿着机翼前缘布置的橡皮管，通过定时给橡皮管充气来破坏在机翼上的积冰；还有的飞机是通过将喷气发动机的热量改道到机翼上来熔化机翼上的积

冰。

但是，这些现有技术的方法有其局限性，并会引发一些问题。第一，螺旋桨飞机没有喷气发动机。第二，机翼前缘的橡皮管对飞机的气动力特性有不良影响。第三，除冰费用极为昂贵，每次除冰的费用大约为 2500 美元~3500 美元，而对某些飞机而言，每天需要除冰 10 次。

上述问题通常起因于冰形成并附着于各种表面。但是，冰还会因其摩擦系数极低而引发问题。例如，公路路面上的结冰每年都会引发为数众多的交通事故，造成人员的伤亡和财产的巨大损失。如果汽车轮胎能够更为有效地抓紧冰面，则就可以降低此类交通事故的数量。

因此，本发明的目的是提供用来有益地改变冰附着强度的系统。

本发明的另一个目的是提供用来降低交通工具表面（例如，飞机机翼、船体及汽车风挡玻璃）上冰附着强度以便于除冰的系统。

本发明的又一个目的是提供用来提高结冰道路与车辆轮胎之间、冰面与其他物体（例如，鞋底和越野雪橇）之间摩擦系数的系统。

上述目的及其它目的将通过下面的描述变得明显、易懂。

本发明的概述

如果降低冰和结冰表面之间的冰附着强度，就能够缓解前面所提到过的一些问题。例如，如果充分地降低冰和机翼之间的冰附着强度，则风压、振动或不费力的人工刷扫，即可将冰从机翼上除去。同样，如果降低冰和汽车风挡玻璃之间的冰附着强度，则刮除汽车风挡玻璃上的冰也就容易得多。

如果提高冰和其所接触的表面之间的冰附着强度，就能够缓解

前面所提到过的其他问题。例如，如果提高汽车轮胎和结冰路面之间的冰附着强度，就能够减少车轮打滑和减少交通事故。

冰具有某些物理特性，这些特性使本发明能够有选择地改变冰对导体（及半导体）表面之间的冰附着强度。首先，冰是一种质子半导体，质子半导体属于半导体中的一小类，其载流子是质子而不是电子。这种现象起因于冰内的氢键键合。氢键键合的发生，是因为冰内水分子的氢原子和氧原子共用其电子。因此，水分子的原子核-----一个质子-----保持与相邻水分子的键合。

与典型的电子半导体相似，冰也具有导电性。尽管冰的导电性通常较弱，但是，通过加入化学添加剂-----可以额外捐献或收受载流子（就冰而言，载流子为质子）的化学添加剂，可以改变冰的导电性。

冰的另一项物理特性是其蒸发性。物质的蒸发性随物质表面的蒸气压力而变化。就大多数材料而言，在液态——固态界面，蒸气压力迅速下降。但是，对冰来说，在液态——固态界面，其蒸发性实际上没有变化。这是因为冰面上覆盖有一个液状层（LLL）。

液状层（LLL）还是冰附着强度的一个重要影响因素。例如，如果将冰的平滑表面与飞机机翼的平滑表面相接触，两个表面之间的实际接触面积大约为两个表面之间总交界面积的千分之一。液状层在两个表面之间充当润湿材料（几乎所有粘合剂的主要成分），从而大大提高了表面间的有效接触面积。接触面积的提高对冰附着强度有着很大影响。

冰具有半导体特性，再加上冰面上覆盖有一个液状层，使人们能够有选择地控制冰和其他表面之间的冰附着强度。总体上讲，冰块内的水分子是无规则取向的。但是，在冰的表面，水分子具有明显的同一方向的取向性，或者朝内或者朝外。因此，其所有的质子或者朝内或者朝外，从而所有的正电荷或者朝内或者朝外。

尽管确切的机理尚不清楚，但很可能是因为在冰块内水分子为无规则取向，而在液状层内，则转变为规则取向。规则取向的实际结果是，在冰面出现较高密度的电荷（或正或负）。因此，如果在与冰接触的表面上产生电荷，就能够有选择性地改变在两个表面之间的附着力。正像同性相斥、异性相吸那样，通过从外部在冰与其他表面之间施加偏压，就能够降低或提高冰面与其他表面之间的附着力。

一方面，本发明利用电源，在冰和结冰表面之间的界面两端施加直流电压。例如，导体表面可以是机翼或船体（甚至是机翼或船体的涂料）。第一电极与导体表面相连；用不导电材料或绝缘材料在导体表面上形成栅格；第二电极通过在绝缘材料表面上涂敷导电材料而形成，例如，涂敷导电涂料，但并不与导体表面相接触。第二电极的表面面积，与系统所保护的整个表面区域相比，应当很小。例如，受保护区域（即要设法实现无冰的区域）的表面面积应当至少比第二电极的表面面积大 10 倍。

利用线路将第二电极和电源连接起来，同时利用线路将第一电极和电源连接起来。当受保护的表面和第二电极（导电栅状电极）被冰所覆盖时，即接通电路。届时，有选择性地给电路加上电压，就可以控制改变冰与其他表面之间的冰附着强度。

另外，最好还给电路连接一个电压调节子系统，以便能够调节控制施加到界面两端的电压，实现对冰附着强度的控制。例如，就离子浓度不同的冰而言，将冰附着强度降低到最小所需要的最佳电压，也会发生变化；电压调节子系统即提供了一种能够有选择地改变最佳电压的装置。

最好还给电路连接其他一些子系统，以使系统具备一些特性，例如，可以探测出电路接通是起因于水还是冰。一方面，电源是一个直流电源（例如，蓄电池），它给电路提供电压并和除冰电极相连。

给电路连接一个直流电流表，用来测量冰的直流导电性（即当受保护表面结冰且导电栅状电极任何一部分被冰所覆盖时，“短路”两个电极的半导体层的直流导电性）。另一方面，给电路连接一个交流电源，用来有选择地产生 10kHz~100 kHz 的交流电压。给电路连接一个交流电流表，用来测量冰在 10~100 kHz 范围内的交流导电性。另外，利用电流比较器来比较冰的直流导电性和交流导电性。

这样就提供了一个电路，它能够区分出表面上所形成的半导体层是冰，还是表面上的水。水的交流导电性（在前面所提到过的范围内）和水的直流导电性大体上相同。但是，对冰来说，其交流导电性和直流导电性要相差 2~3 个数量级。这种导电性差异能够通过直流电流表和交流电流表测量出来，并在电流比较器内进行比较。当导电性的差异高于预定值时，电流比较器即发出结冰报警信号。此时，电压调节子系统可给电路（也就是界面）施加一个直流偏压，以所希望的场强度来充分地降低冰的附着强度。根据本发明，当探测到机翼上结冰时，结冰报警信号还将启动系统内的反馈电路：（1）测量冰的导电性；（2）确定可将冰附着强度降低到最小（或接近最小）的适当偏压；（3）在冰—机翼的界面上施加偏压，以便于除冰。

该领域的普通技术人员应当知道，前面所描述的系统适用于许多种表面（例如，汽车风挡玻璃、船体及输电线路），用来降低冰的附着强度。就降低冰附着强度而言，如果表面材料具有弱的导电性，最好是给表面材料“掺杂”，以使其具有足够的导电性。掺杂技术是本领域的普通技术人员所熟知的技术。例如，汽车轮胎就能够通过掺入碘来使橡胶具有导电性。同样，汽车玻璃也能够通过掺入 ITO 或掺杂氟化物的 S_nO_2 ，使风挡玻璃成为可接受的半导体。

但另一方面，前面所描述的系统 and 电路也适用于希望提高冰附着强度的场合。就提高冰附着强度而言，例如，当结冰报警探测到结冰时，系统启动反馈电路来调节施加给界面的直流电压，以提高

冰的附着强度。例如，能够从这种系统获益的应用场合和表面包括鞋子的鞋底和汽车的轮胎。

另外，本发明还能够包括一个可变冰附着强度/电压控制子系统，它能够有选择性地提高和降低在冰和其所接触表面之间的冰附着强度。例如，越野雪橇（或旋转雪橇）理想的是：在爬坡时（或在某些情况下，下坡时），具有较高的摩擦力；在下坡时，具有较低的摩擦力。根据本发明，这里所描述的冰附着强度控制系统及电路能够与雪橇的电路相连，从而使滑雪者能够有选择性地调节控制雪橇的摩擦力。

对本发明有用的其他背景材料可以从下述文章中找到，这些文章均被本文引用为参考资料：Petrenko 的论文“冰摩擦的静止场效应”，《应用物理》杂志 (J. Appl. Phys.) 76 (2)，1216-1219 (1994)；Petrenko 的论文“冰、雪摩擦中电场的产生”，《应用物理》杂志 (J. Appl. Phys.) 77 (9)，4518-4521 (1995)；Khusnatdinov 等人的论文“冰/固体界面的电特性”，《基础物理化学》杂志 (J. Phys. Chem. B)，101, 6212-6214 (1997)；Petrenko 的论文“利用扫描力显微术对冰面、冰/固体界面及冰/液体界面的研究”，《基础物理化学》杂志 (J. Phys. Chem. B)，101, 6276-6281 (1997)；Petrenko 等人的论文“冰面层的载流子表面状态及电特性”，《基础物理化学》杂志 (J. Phys. Chem. B)，101, 6285-6289 (1997)；以及，Ryzhkin 等人的论文“冰附着的物理机理”，《基础物理化学》杂志 (J. Phys. Chem. B)，101, 6267-6270 (1997)。

下面将结合最佳实施例对本发明进行说明，显然，该领域的普通技术人员能够在不偏离本发明范围的情况下，进行各式各样的增加、减少或改进。

附图的简要说明

通过参看附图，可以对本发明有更为透彻的了解。

图 1A-1C 表示直流偏压对冰附着于液态金属（汞）的影响，接触角 Θ 越小，表明附着强度越高；

图 2 表示用于测定图 1A-1C 所示的冰-汞界面能量的冰测压计；

图 3 表示在使用 0.5%NaCl 掺杂冰、 $T = -10^{\circ}\text{C}$ 的条件下，直流偏压对冰-汞界面能量的试验结果；

图 4 表示如何在冰/金属界面产生气泡，来起到界面裂纹的作用，以降低界面附着强度；

图 5 表示根据本发明设计的一种用来改变冰对普通导体（或半导体）材料的附着强度的系统；

图 6 为图 5 所示系统的剖视图（未按比例绘制）；

图 7 表示本发明的一种用来减少飞机机翼上结冰的系统；

图 8 表示本发明的一种通过在输电线上涂敷涂层而去除输电线上的冰和雪的系统；

图 9 表示根据本发明在非活性表面上涂敷铁电材料涂层来进行除冰。

图 10 表示根据本发明设计的用于给冰释放离子以便于降低冰附着强度的渗透层。

图 11 表示根据本发明设计的输电线。

图 12 表示根据本发明设计的用于降低冰附着强度的自组装单层。

附图的详细说明

本发明包括用来改变冰附着强度的系统和方法，该系统和方法通过在冰和其所附着材料（例如，金属和半导体）的界面之间施加直流偏压而改变冰的附着强度。因此，本发明能够用来减轻（在某

些情况下消除)冰在这些材料上的附着。

在具体的实施例中,本发明改变了冰和金属形成粘接的静电相互作用。通过在冰和金属之间施加一个小的直流偏压,即能够有效地改变静电相互作用。

试验和理论计算表明,冰表面的电荷密度高达 10^{-2}C/m^2 到 $3 \cdot 10^{-2}\text{C/m}^2$ 。参看: Petrenko 的论文“冰、雪摩擦中电场的产生”,《应用物理》杂志(J. Appl. Phys.), 77(9), 4518-21(1995); Petrenko 的论文“利用扫描力显微术对冰面、冰/固体界面及冰/液体界面的研究”,《基础物理化学》杂志(J. Phys. Chem. B), 101, 6276(1997); 以及 Dosch 等人的“表面科学”(Surface Science), 366, 43(1996)。这些文章在此均被引用为参考资料。这种电荷密度起因于冰表面下层内的水分子的强烈极化作用。

冰面电荷与固体材料内感应电荷之间的相互作用,影响着冰—固体材料界面的强度。两个平面电荷的静电吸引力(负压 P_{el})利用如下公式进行估算:

$$P_{el} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} \quad (1)$$

其中, ϵ_0 为真空介电常数, E 为电荷之间的空间电场强度。由于电荷分布决定着两种材料的接触电位 V_c , 因此, 我们可以将 E 估算为 V_c/L , L 是位于冰和固体材料内的平面电荷之间的距离。冰—金属界面的 V_c 从十分之几伏到大约 1 伏不等。参看: Buser 等人的论文“金属上冰粒子碰撞造成电荷分离: 电子表面态”,《冰川》杂志(Journal of Glaciology), 21(85); 547-57(1978)。

取 $L \approx 1\text{nm}$ (前面所描述的掺杂冰内的主隔离(screening)长度), $\epsilon = 3.2$ (冰的高频介电常数), $V_c = 0.5\text{V}$ (接触电位的常用数值), 利用等式(1)可计算出 $P_{el} \approx 3.3\text{Mpa}$, 这个数值与冰的 1.5Mpa 的宏

观抗拉强度具有可比性，但是超过了冰的 1.5Mpa 的宏观抗拉强度。

参看：Schulson 等人的论文“在拉伸下冰的脆性—延性变化”，《自然科学》杂志（Phil. Mag.），49, 35363（1984），这篇文章在此被引用为参考资料。

后面更为精密地计算了在冰面电荷与金属之间的静电相互作用能量，计算中利用了实际空间电荷分布和电荷弛豫（relaxation）计算结果。特别是，后面还指出了在温度为 -10°C 时，静电相互作用能量为 $0.01\text{J/m}^2 \sim 0.5\text{J/m}^2$ 。下限 0.01J/m^2 对应于纯净冰；上限 0.5J/m^2 对应于重掺杂冰。这些数值和下面所介绍的利用扫描力显微术（SFM）所获得的试验结果相比，具有可比性。扫描力显微术的试验结果确定了静电相互作用能量为 $0.08 \pm 0.012\text{J/m}^2$ ；而对于冰/汞界面的试验，因为冰/金属的静电粘接，回到了 $0.150 \pm 0.015\text{J/m}^2$ 。

因为静电相互作用影响着冰的附着，因此，冰和导电材料（例如，金属或半导体）之间的附着强度，能够通过对冰—导电材料的界面施加外部直流偏压来改变。

为了确定直流偏压对冰附着强度的影响，建立了界面模型，即液态材料—固态材料的界面模型而不是固态材料—固态材料的界面模型。的确，当一种材料是液态材料而另一种材料是固态材料时（例如，水—金属），可利用接触角试验可靠地测定决定附着强度的界面能。因此，如果金属是处于液相的话，就能够对冰—金属界面使用类似的技术。例如，汞（熔点 -38.83°C 、化学活性低、表面易于清洁），非常适用于验证这个模型；图 1A-1C 表示小的直流偏压对冰-汞界面的附着力的影响。

图 1A，表示汞 18 附着于冰 20 的原始状态，附着强度用 Θ_0 表示。 Θ_0 代表在没有施加电压（即， $V = 0$ ）时的附着强度。图 1B 表示在直流电源 22 施加 -1.75V 电压时的合成附着强度 Θ_1 。例如，电源 22 可以是蓄电池或其他直流电源。线路 24 将电源 22 接到汞 18

和冰 20 上, 构成电路。图 1C, 表示在直流电源 22 施加-5V 电压时的合成附着强度 Θ_2 。虽然施加的电压是从 0V (图 1A) 到-1.75V (图 1B) 到-5V (图 1C) 各不相同, 但值得注意的是 $\Theta_2 < \Theta_0 < \Theta_1$, 这表明负电压的小范围变动会造成附着强度发生明显的变化。与附着强度 Θ_2 甚至是附着强度 Θ_1 相比, 附着强度 Θ_1 较弱。与附着强度 Θ_1 甚至是附着强度 Θ_0 相比, 附着强度 Θ_2 较强。

为了测定图 1 所示的冰-汞界面 16 的表面引力, 使用了冰测压计 26 (图 2 为其示意图)。直流电源 22' 被用作图 1 所示的直流电源 22。直流电流表 28 设置在测压电路 26 之内, 用来测量电流。直流电源 22' 接到汞 18' 和网状电极 30 上, 网状电极 30 与冰 20' 接合。因此, 电路 26 被接通, 电流流过汞 18' 和冰 20'。冰 20' 和汞 18' 通过选定直径的毛细管 32 相互连通。当直流偏压发生变化时, 汞 18' 和冰 20' 之间的冰附着强度也将发生变化, 重力将会调整在冰 20' 内的汞 18' 的高度“h” (即, 向上伸入冰 20' 的毛细管 32 内的汞柱高度)。

具体地讲, 汞 18' 在毛细管 32 内的平衡位置 h 是:

$$h \cong 2 \cdot (W_{i/a} - W_{i/Hg}) / g r \rho \quad (2)$$

公式中, g 为重力加速度, r 为毛细管半径, ρ 为汞的比重, $W_{i/a}$ 为冰-空气界面的界面能, $W_{i/Hg}$ 为冰-汞界面的界面能。当 h 被测定时, 等式 (2) 用来计算 $W_{i/a}$, 由此, 可计算出冰对液态金属 (汞) 的附着强度。在测试中, 图 2 所示的毛细管的半径 r 为 0.25mm 或 0.5mm。

按照图 1 和图 2 所示的结构形式进行多项试验, 其中包括利用纯度为 99.9998% 的电子级汞和下述各种水制成的多晶冰: 非常纯净的去离子水; 蒸馏水; 未经处理的自来水; 去除离子的含有低浓度

NaCl 或 KOH 或 HF 的水。试验的温度范围为 $(-20^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}) \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，其中大部分试验时的温度为 -10°C 、相对湿度为 89~91%。需要指出的是，对掺杂的冰来说，直流偏压对冰—汞的界面会有较大的影响。能量变化 $\Delta(W_{i/a} - W_{i/Hg})$ 的大小和符号，不仅取决于偏压极性及偏压大小，还取决于掺杂剂的类型和浓度。例如，图 3 是在温度为 -10°C 、0.5%NaCl 掺杂冰的条件下测定的 $\Delta(W_{i/a} - W_{i/Hg})$ 与偏压 V 的关系曲线图。从图可以看出，偏压能够降低或提高冰对汞的附着强度：偏压约为 -1.75V 时，附着强度最小；而偏压在 -2V 到 -6V 的范围内，附着强度迅速提高。NaCl 的浓度高于 0.05% 时，偏压对界面能的影响较为明显。

对低浓度 NaCl 掺杂的冰或利用自来水制作的冰来说，当施加低的直流偏压时，附着强度的变化极小，而且再现性差。相反，使用 0.5%NaCl 掺杂的冰，施加偏压后，汞马上就会移动；而且过程完全是可逆的，即在断开偏压之后， $W_{i/Hg}$ 可恢复。这些结果是可以重现的，而且易于观察到。对于半径 $r=0.25\text{mm}$ 的毛细管来说， h 的最大变动量是 12mm。

电流—电压特性的测量结果还表明，上述附着强度的变化是由电压而不是由电流引起的。例如，典型试验产生几十个 μA 的电流强度；而且估算的温度变化速度低于 $10^{-6}^{\circ}\text{C/s}$ 。就掺杂 KOH 或 HF 的冰来说，施加直流偏压会引起 $W_{i/Hg}$ 出现几乎对称的降低，与 NaCl 掺杂冰相比，在数值上具有可比性。施加振幅高达 40V、频率范围为 10Hz~100Hz 的交流电压，不会引起 $W_{i/Hg}$ 任何明显的变化。就纯净水或蒸馏水来说，施加 40V 的直流偏压也不引起 $W_{i/Hg}$ 的明显变化。要改变非常纯净的冰对金属的附着强度，需要施加高达 1kV~3kV 的电压。纯净冰和掺杂冰对直流偏压的不同反应，是因为其隔离长度和电子弛豫时间不同。

上述试验证明了在冰附着的状态下，冰—金属界面上的双电荷

层对冰附着强度所起到的重要作用。虽然对固态汞来说, W_{iHg} 绝对数值与液态汞稍有不同, 但不论对液态汞还是固态汞来说, 其静电相互作用基本相同。试验结果还表明, 通过在冰和金属之间施加一个小的电位差, 即能够有效地改变冰对金属的附着强度。在施加相同直流偏压的情况下, 冰内杂质不同, 固态金属不同, 温度不同, 附着强度也会发生变化。

发明者还根据冰面上质子载流子的表面态, 研究建立了冰附着强度的静电模型。在大于分子间距的距离上, 该模型给出的静电附着力, 远远大于化学键力(chemical bonding energy)和范德华(van der Waals)力。另外, 该模型还使人们能够理解与时间和温度有关的一些现象, 这些现象能够解释: 冰和水的附着特性的不同; 冰和其他固体材料粘接的物理机理; 在冰和不同固体材料之间, 分子键合的本质及强度。

粘接机理可合理地分为三类: 共价键合或化学键合机理(化学键力); 电磁相互作用的扩散或波动(范德华力); 直接静电相互作用(静电力)。例如, 参看 Israelachvili 的论文“分子间力和表面力”, 第2版, 学报(Academic Press): 伦敦, 第2章(1991), 这篇文章在此被引用为参考文献。化学键合机理对应于化学反应和形成界面复合物。就共价键合或化学键合而言, 附着力的产生是由于: 交互作用固体材料的波动函数的重叠, 造成系统量子力学能的降低。这种相互作用实际上仅存在于大约 0.1nm~0.2nm 的距离上。另外, 这种类型的附着力还对固体材料的化学特性非常敏感。在充分接触的情况下, 化学键合机理能够提供的附着力 $\leq 0.5 \text{ J/m}^2$, 在化学键力、范德华力和静电力中, 化学键力被视为最小。

与化学键力相比, 范德华力是远距离的, 而且作用在所有物质之间。范德华力只决定于固体材料的宏观特性(不同频率下的介电常数), 因此, 范德华力相当不易受试验条件的影响。例如, 参看

Mahanty 等人的论文“扩散力”，学报 (Academic Press)，伦敦，第 9 章(1976)；及 Barash 等人的论文“凝结系统的介电功能”，由 Keldysh 等人编辑，Elsiever 科学 (Elsiever Science)，阿姆斯特丹，第 9 章 (1989)，这两篇文章在此被引用为参考资料。

除了化学键力和范德华力之外，含有非补偿电荷或空间分离电荷的两种固体材料还会产生静电力。最近，静电力对附着强度的重要性已得以重新发现。参看 Stoneham 等人的文章“固态物理”，《物理化学》杂志 (J. Phys. C: Solid State Physics)，18，L543 (1985)；及 Hays 的文章“附着原理”，编辑 Lee. Lee, Plenum 学报，纽约，第 8 章 (1991)，这两篇文章在此被引用为参考资料。

冰附着特性的模型

下面建立一个用来描述冰面电特性的模型。该模型揭示了冰附着特性与冰的其他特性之间的关系。将该模型与范德华力机理、化学键合机理及试验结果进行比较。

该模型的主要结论是静电相互作用在冰附着中起重要作用（要不然就是主要作用）。模型的一个重要参数是：靠近冰—固体材料界面的水分子的有序性，或换句话说，质子载流子的表面态。这就将问题简化为一个模拟固体材料表面水分子状态的问题。不过，下面的描述将假定存在着能够被质子点缺陷占有的表面态。表面态的占有率，取决于俘获载流子的库仑能量与表面态的能量深度之间的相互关系。因此，表面态（在非平衡情况下）的占有率或表面态的能量深度，将被取作为参数。

冰含有有极水分子，它们能够与任何介电常数不同于冰的固体材料发生强烈的相互作用。另外，还有理论和试验证据可以证明冰存在着表面电荷。这种表面电荷也能够与固体材料发生相互作用。这里，我们假定表面电荷是因冰面俘获质子载流子而产生。俘获的

缺陷假定为 D 缺陷、 H_3O^+ 离子或质子。正离子的尺寸小于负离子，原因是正离子的电子较少或根本就没有电子，并以质子的形式存在。因此，对于较小的距离，我们能够应用镜像电荷原理，在较小的距离上，电荷及其镜像电荷的势能可能小于冰内的电荷能量。对于尺寸较大的负离子来说，则难以达到这一点。在热平衡的情况下，表面态的占有率并不理想，因为俘获载流子所引起的能量增益被静电能量的提高所抵偿。但是，由于固体材料内的感应电荷会引起电荷的重新分布，静电能量也能够被大大降低。这会导致理想的表面态占有率和相当高的附着力（接近于静电力）。

下面将描述冰表面下层内的载流子的空间分布。泊松等式可以写成：

$$\boxed{E = \frac{\sigma_0}{\epsilon\epsilon_0} f(v)} \quad (3)$$

公式中，E 和 V 分别是电场强度和静电势能（两者均是空间坐标 z 的函数）； $\sigma_0 = e_B \cdot \lambda \cdot N$ ； e_B 是布杰拉姆（Bjerrum）缺陷的有效电荷；N 是水分子的浓度； λ 是由 $\sqrt{\epsilon\epsilon_0 kT / e_B^2 N}$ 确定的隔离长度； ϵ 和 ϵ_0 分别是冰的介电常数（ ≈ 3.2 ）和真空的介电常数；k 和 T 分别是玻耳兹曼常数和温度。函数 f (V) 由下述列公式确定：

$$f(V) = \sqrt{\ln(a(V) \cdot a(-V) \cdot b^2(V) \cdot b^2(-V))} \quad (4)$$

$$a(V) = \frac{\exp(E_i / 2kT) + (4/3) \exp(e_1 V / kT)}{\exp(E_i / 2kT) + 4/3} \quad (5)$$

$$b(V) = \frac{\exp(E_B / 2kT) + \exp(e_B V / kT)}{\exp(E_B / 2kT) + 1} \quad (6)$$

这里，我们使用布杰拉姆缺陷作为俘获在表面态内的载流子。

等式 (3) 适用于冰晶体内的任何一点。将公式 (3) 应用于冰的表面, 我们得到了表面电荷密度 σ_s 和表面势能 V_s 之间的关系式: $\sigma_s = \sigma_0 f(V_s)$ 。

利用公式 (3) 到公式 (6), 我们能够计算出静电对于冰附着能量的影响。静电能量给出附着能量的上限, 首先, 计算出冰的屏蔽层的静电能量, 静电能量是表面势能的函数。利用静电能量的定义和公式 (3), 我们得到:

$$W(V_s) = \int_0^\infty \frac{\epsilon \epsilon_0}{2} E^2 dx = -\frac{\sigma_0}{2} \cdot \int_0^\infty f(V) \cdot \frac{dV}{dx} dx = \frac{\sigma_0}{2} \cdot \int_0^V f(V) dV \quad (7)$$

现在, 我们考虑在距离冰面为 d 的距离上有 1 块金属板。冰内的非平衡电荷分布, 将在金属上感应出电荷, 从而, 在冰和金属板之间形成电场。系统单位面积的总静电能量可用下面的公式表示:

$$W_e(d, V) = \frac{\sigma_0^2 \cdot d}{2\epsilon \epsilon_0} \cdot \left[f(V) - \frac{\sigma}{\sigma_0} \right]^2 + \frac{\sigma_0}{2} \cdot \int_0^V f(V') dV' \quad (8)$$

等式 (8) 中的 V 是冰的表面势能, 必须根据距离 d 的每一个值的最小能量来求出。表面电荷密度可视为一个常数, 这个常数对应于表面态的非平衡占有率。对 $W_e(d, V)$ 进行最小化计算, 我们推出单位面积的附着能量是距离 d 的函数:

$$W_a(d) = W_{\min}(d) - W_{\min}(\infty) \quad (9)$$

在平衡条件下, 随着距离 d 的减小, 冰表面的电荷密度提高, 这是因为金属板上感应电荷引起冰面电荷的屏蔽。在这种情况下,

俘获载流子的库仑能量降低，从而使较高的占有率成为可能。就这种情况而言，首先必须求出静电能量、因表面态占有率所造成的能量增益、熵（entropy）对表面缺陷的影响这三者的和：

$$F = \frac{d\sigma_0^2}{2\epsilon\epsilon_0} \cdot \left[f(V) - \frac{\sigma}{\sigma_0} \right]^2 + \frac{\sigma_0}{2} \cdot \int_0^V f(V') dV' - \frac{\sigma}{e} \cdot E_0 + \frac{kT}{e} \cdot \left[\sigma \cdot \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right) + (\sigma_m - \sigma) \cdot \ln\left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_m}\right) \right] \quad (10)$$

公式中， E_0 为表面态的能量（假定 $E_0 = -0.5\text{eV}$ ）， $\sigma_m = e/S$ ， S 为水分子的表面面积。自由能 F 是在 V 和 σ 上进行最小化计算得出。此时，还假定冰块的化学势能保持不变且等于零。对每个 d 值都进行这一步计算，我们即可求出作为距离的函数或者平衡附着能量的函数的平衡自由能。

类似的方法使我们能够求出冰的表面态平衡占有率或表面势能，表面态平衡占有率或表面势能是表面态能量 E_0 的函数或温度的函数。让我们假定金属板距离冰面无穷远。这时，为了使公式（8）中的第一个正单元为最小，假定 $\sigma = \sigma_0 f(V)$ 。这样， F 就变为了一个参数 V 或者 σ 的函数。这多少简化了在 V 上进行的最终最小化计算，但也能够以 σ 来重新计算结果。

根据载流子的类型和表面态的能量，附着能量一般为 $1.3 \text{ J/m}^2 \sim 0.08 \text{ J/m}^2$ 。这个数值，与在 -20°C 温度下冰—金属界面附着能量的试验测量结果相比，相差不大，甚至高于试验测定的结果。实际上，静电力和化学键力一样高；但是，与化学键合机理相比，静电机理的有效作用距离较大（约为 $10 \cdot r_{\infty}$ ； $r_{\infty} = 0.276\text{nm}$ ）。因此，在距离大于 r_{∞} 的情况下，静电机理的作用明显大于化学键合机理。从而，在距离大于 r_{∞} 的情况下，如果哈梅克常数等于 $3 \cdot 10^{-20}\text{J}$ ，则静电力超过了范德华力。需要注意的是，最后的这个估算值是涉及冰—冰界面，而不是冰—金属界面。在冰和金属之间相互作用的有效作用距离远的范德华力，也能够被考虑。

在表面电荷密度最大的情况下，即使 $z \approx 90 \cdot r_{\infty}$ ，附着力也等于

0.01J/m^2 ，这表明了远距离特性。非平衡分离试验的附着力，应当高于附着试验的附着力。后者能够通过冰和金属接触时，金属板的静电力的有效屏蔽来解释。从而，也就易于理解在平衡试验中附着力随距离的变化。在较小的距离上，金属板屏蔽静电能量，并因表面态占有率高，而具有较高的静电能量。但是，当距离增大时，静电力也提高，从而造成较低的占有率和较低的表面电荷密度。这些特性曲线说明了自由能随距离的增大而迅速衰减。

另外，对于 D 缺陷的表面态模型，还考虑了到了占有率（表面态能量 E_s 的函数）的特性。当 $E_s \approx 0.1\text{eV}$ 时，占有率接近于零。载流子被俘获到带有正电能量的表面态之内的一个原因，与自由能的熵增益有关。出于同样的原因，冰块内还存在缺陷。值得注意的是，对于冰块的 D 缺陷来说，每个缺陷的“形成能量”等于 0.34eV ，大大高于 0.1eV 。这最终导致了冰块表面态的占有率约为 $3 \cdot 10^{-7}$ 。

冰附着还会出现随时间变化的现象，这些随时间变化的现象为上述模型所固有。为了进入或离开表面态，缺陷必须克服一些静电障碍，这会导致非平衡态和随时间变化的现象。

该模型的一个重要组成部分是冰表面电荷与金属内感应电荷之间的静电吸引，这个机理也适用于冰—绝缘体界面，只是感应电荷的数量不同。冰表面态的电荷 q ，将在金属内感应产生“镜像电荷” $-q$ ；而同样的电荷 q ，将根据下面的关系式在绝缘体内感应产生一个较小的“镜像”电荷 q' ：

$$q' = -q \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \quad (11)$$

公式中， ε 为绝缘体的介电常数。就大多数固体绝缘材料来说， ε 远远大于 1，而且绝缘材料内的感应电荷与金属内的感应电荷具有可比性。 ε 越小，则静电附着力也越小。例如，聚四氟乙烯的介电

常数 $\epsilon = 2.04$ ；而且众所周知，它对冰具有低的附着力。

考虑为什么冰比水的附着力高，是有益处的。由于水中载流子的浓度较高，水中表面电荷（如果存在的话）的屏蔽比冰内表面电荷更为有效（对应的原始静电能量，大大低于冰）。因此，固体材料形成的电场的屏蔽，不能大大削弱静电能量。需要注意的是，当温度接近于冰的熔点时，一个薄的液状层可能出现在冰—固体材料的界面上。参看 Dash 等人，Rep. Prog. Phys. 58. 115 (1995)，这篇文章在此被引用为参考资料。因此，该模型还能够被改进成为包括表面预熔对冰附着强度的影响。

上述冰附着静电模型说明了冰面电特性与冰附着强度之间的相互关系。模型给出了附着能量的正确数量级。在距离大于分子间距的情况下，冰和金属之间的静电相互作用所产生的静电力，大大高于化学键力和范德华力。另外，模型还使人们能够直观地了解随时间和温度变化的、有助于解释冰和水附着特性差异的各种现象。

图 4 表示当界面（在冰 69 和金属 71 之间）被加载而出现界面裂纹时，气泡 67 起到了降低界面附着强度的作用。

图 5（和剖视图 6）表示根据本发明设计的系统 100。系统 100 用来降低在材料 104 的表面 104a 上的结冰 102 的冰附着强度。系统 100 构成一个电路，电路中包含：材料 104、导电格栅 106（包括格栅上的解说点“A”~“F”）、电源 109。导电格栅 106 悬置于表面 104a 的上方，以使导电格栅 106 和材料 104 绝缘。

在本发明的一个最佳实施例中，导电格栅 106 悬置于表面 104a 的上方，可通过在导电格栅 106 与表面 104a 之间使用绝缘格栅 108 来实现。图 6 较为详细地示出了绝缘格栅 108。为了说明绝缘格栅 108 和导电栅格 106 之间的相互关系，图 6 并没有按比例绘制。实际上，导电格栅 106 和绝缘格栅 108 的厚度（就图 6 的轮廓来说），可以远远小于 1 英寸（甚至可以薄到 0.010 英寸~0.020 英寸）；而且

可将其视为“涂层”。例如，绝缘格栅 108 可以利用绝缘涂料薄涂层来制成；导电栅格 106 可以利用导电涂料薄涂层来制成。接通导电栅格 106，使其作为一个电极。这样，材料 104 就成为电路中的一个电极；而导电格栅 106 就成为电路中的另一个电极。

导电格栅 106 和绝缘格栅 108，在表面 104a 上，也可以是柔性成形的格栅，虽然附图所给出的表面 104a 是一个平面，但它可以代表任何形状的表面。例如，材料 104 能够代表飞机或汽车风挡玻璃；导电格栅 106 和绝缘格栅 108 贴合于结构材料 104 上。

当表面 104a 上产生冰 102 时，由于冰是一种半导体（如前所述），系统 100 的电路被接通。当电路接通时，电源 109 即提供一个直流偏压，施加在冰 102 和材料 104 之间的界面上。直流偏压通常小于几伏；因此，蓄电池即可用作电源 109。

偏压的大小，根据系统的使用场合来决定。对汽车风挡玻璃或飞机机翼来说，偏压的选择是以实现最小（或接近最小）的冰附着强度为目标，以便于从材料 104 上除去冰 102。

在系统 100 的电路中，最好还连接一个电压调节子系统 112。正如下面所详细描述的那样，电压调节子系统 112 反馈控制电路及电源，以便最佳地提高或降低直流偏压。例如，电压调节子系统可含有电路和微处理器 112a，以测定来自电路的数据和确定冰 102 的导电性（和/或温度）。这些测量结果被电压调节子系统用来产生能够有效地改变所施加直流偏压大小的信号。具体地说，在一个实施例中，电源 109 对信号做出响应，在冰-金属界面施加正确的电压。直流偏压值可存储在电压调节子系统内的存储器 112b 中，存储器 112b 中存有一个基于试验数据建立的查阅表。例如，导电性为“X”的冰（最好实时地通过子系统来测定）在与导电性为“Y”的材料 104 相接触时（针对指定用途来说，当系统 100 接入材料 104 时，材料 104 的导电性“Y”是一个已知的既定数值），可通过使用存储器 112b

内的查阅表来确定施加到冰—金属界面上的偏压大小。

栅状电极 106 最好是有一定的栅间距，以确保（尽可能地确保）在表面 104a 上形成的冰 102 至少能够接触到栅状电极 106 的一部分。例如，参看图 5，冰 102 接触到了栅状电极 106 的一部分（点“C”~“E”包含在其中）。当冰 102 在栅状电极 106 的一部分和材料电极 104 之间造成“短路”时，系统 100 的电路即被接通。

栅状电极 106 的导电区域（例如，图 5 中的区域 114）之间的栅格间距，应当根据具体使用场合来确定。例如，如果表面 104a 是飞机机翼的表面，则间距可以相对较小，以保证足够的电流密度通过低导电性大气结冰。但对于导电性较高的河冰和海冰，如果需要的话，导电区域 114 可以较大。

图 7 表示根据本发明设计的系统 130。系统 130 的一个电极为飞机机翼 132。飞机机翼 132 连接地线 134。直流电源 136 连接直流电流表 138。直流电流表 138 连接感应器 140。感应器 140 通过线路 141 连接到导电涂料 142（或与机翼整合的其他等效导电材料）上，导电涂料 142（或与机翼整合的其他等效导电材料）涂敷在设置于机翼 132 上的绝缘层 144 的上面。

绝缘层 144 和导电涂料 142 最好像图 5 所示的那样，排列为格栅的型式。根据除冰要求，施加的电压通常被控制在 5V~50V 之间，格栅区域的对应电流从不到 $1\text{A/m}^2 \sim 100\text{A/m}^2$ 。

本领域的普通技术人员应当知道，市场上有种类繁多的绝缘漆 144' 和导电涂料 142；只有在进行结冰模拟试验之后，才会选定具体品牌的绝缘漆 144' 和导电涂料 142。另外，导电格栅 145 的最佳栅间距（即，图 5 所示的区域 114）也应当根据试验来确定或对具体设计进行分析之后来确定。

进一步参看图 7，直流电流表 138 还可以连接反馈子系统 150。反馈子系统 150 本身又连接到直流电源 136，以便根据冰的导电性

和温度等特性，“控制”施加到冰-机翼界面上的直流偏压。为此，最好给系统 130 连接温度传感器 152，用来测定冰 154 的温度。

系统 130 的进一步的特征包括交流电源 156（工作频率大约在 10 kHz ~100kHz 之间），交流电源 156 连接交流电流表 158，交流电流表 158 连接导电涂料 142。交流电流表 158 和直流电流表 138 均连接到电流比较器 160。

系统 130 还能够引入结冰报警子系统 162。例如，电流比较器 160 可连接到结冰报警子系统 162 和反馈子系统 150 上，以启动某些事件，下面就对这方面的内容进行介绍。

直流电流表 138 能够用来测定电路 130 的直流导电性。直流导电性的测量信号被提供给反馈子系统 150 和电流比较器 160，反馈子系统 150 随后调节由直流电源 136 提供的电流。

交流电流表 158 能够用来测定电路 130 的交流导电性（例如，交流电源的频率范围为 10 kHz ~100kHz）。交流导电性的测量信号被提供给电流比较器 160（并可选择提供给反馈子系统 150，以进行模/数变换和数据处理）。系统 103 利用直流导电性和交流导电性的比较结果，确定出是水还是冰引起的电路“短路”和接通。具体地讲，与水相比，冰的交流导电性与直流导电性之比，要高 2~3 个数量级，从而电流比较器 160 可提供一个易于确定出是冰还是水将电路接通的信号测定结果。

因此，当机翼 132 结冰时，电流比较器 160 给反馈子系统 150 发送信号，反馈子系统 150 随后指示直流电源 136 提高或降低作用在冰-机翼界面上的直流偏压。直流偏压数值的选定（通常为 1V~6V），是以将冰 154 在机翼 132 上的冰附着强度降低到最小为目的。

当机翼 132 上的结冰被除去时，电流比较器 160 接受到的信号差异降低到低于预设数值；而且电流比较器 160 撤销结冰报警 162。

同时，电流比较器 160 给反馈子系统 150 发送信号，反馈子系统 150 随后指示直流电源 136 将偏压降低到原始数值。

总的来说，交流电流表 158 和直流电流表 138 用来确定在栅状电极 142 和机翼 132 之间造成短路的材料的导电性。图 7 中所示的材料是冰 154。系统 130 能够以自动模式区别冰和水。感应器 140 阻止交流电压进入电路的“直流”部分，“直流”部分应当被精确控制，以改变冰的附着强度。反馈子系统 150 可以而且最好具有微处理器和存储器，用来根据反馈数据（例如，冰的温度和导电性和/或纯度），指挥和控制直流电源 136，以提供近乎最佳的直流偏压。反馈电路最好以如下水平来提高或降低直流偏压：在接收到结冰报警子系统 162 的结冰报警信号之后，在冰-机翼的界面上，以电流密度约为 $0.1\text{mA}/\text{cm}^2$ （或约为 $1\text{mA}/\text{in}^2$ ）的水平来提高或降低直流偏压。对于一般的大型飞机来说，对应于 $10\text{A}\sim 30\text{A}$ 左右的电流所需要消耗的总能量约为 100 瓦~500 瓦。

因此，图 7 所示电路中的“直流”部分，主要是用来在冰-机翼界面上提供直流偏压，另外，如果需要的话，还能够用来测定冰 154 的直流导电性。图 7 所示电路中的“交流”部分主要用来测定冰 154 的交流导电性。图 7 所示电路中的其他部分：（a）感应器，用于阻止信号在交流部分和直流部分之间的耦合；（b）反馈、测量及控制电路，根据发现结冰（与水相比）和/或测定的反馈参数（例如，冰的温度及导电性），控制直流偏压。

图 8 表示本发明的一个最佳实施例，用于减少或去除输电线 700 上的冰。图 9 为根据本发明设计的输电线 700 的剖视图。正如本领域的普通技术人员所知道的那样，标准输电线 702 在电场（E-field）非常高（例如，每英寸 10000V）的情况下，传输频率为 60Hz 的交流电。根据本发明，给输电线 702 涂敷厚度为“t”的涂层 704。

在一个实施例中，涂层 704 采用公知的铁电材料。铁电材料实

质上是表现出如下特性的陶瓷材料：在某些条件下，呈现出非常高的介电常数（例如，10000）和非常高的介电损耗（例如， $\tan\delta \cong 10$ ）；而在其他条件下，则呈现出较低的介电常数（3 ~ 5）和较低的介电损耗。温度是能够使介电常数发生变化的一个条件。选择的材料最好是：在冰点温度之上，介电常数低，在冰点温度之下，介电常数高。当环境温度降低到低于冰点温度时，因高介电常数和高介电损耗而产生的交流电场将对涂层进行加热。

本领域的普通技术人员应当知道，上述实施例是能够自调节的，可将涂层温度保持在接近于（或稍高于）冰熔点温度的水平。如果涂层被输电线的电场过分加热，则输电线的电场自动进行从铁电态到标准态的相变换，此时，涂层停止吸收电场能量。因此，通过选择相变换的温度，就能够调整涂层的温度，从而可满足不同用户的需要和环境条件。

涂层 704 在有交流电场的情况下（例如，由线路 702 产生的交流电场），才会产生热量。具体地讲，它表现为在交流周期上产生热量的磁滞现象；涂层产生热量起因于输电线 702 的波动电场。

厚度“t”通常大约为 1mm ~ 10mm，不过，根据采用的材料和希望产生的热量，也可以采用其他的厚度值。例如，通过改变厚度，能够将表面 704a 的温度提高 1°C~10°C 或者更高。厚度“t”的选定，是根据所希望产生的热量值（即，足以熔化输电线 700 的表面 704a 上的冰和雪的热量值）。

当涂层呈现为低的介电常数和低的介电损耗时（即，涂层温度高于冰点温度或所希望的其他某个温度时），涂层 704 所产生的热量大大减小，从而，输电线 702 消耗的能量也大大减少。

涂层 704 还能够使用具有相同或类似效果的铁磁材料。在采用铁磁材料涂层的情况下，涂层吸收由输电线所产生的磁场能量。

更具体地讲，在铁电材料位于波动的交流电场中时，铁电材料

被因介电损耗而产生的交流电场所加热。每立方米的供热能量为：

$$w = \frac{\omega \epsilon' \epsilon_0}{4\pi} \tan \delta (\overline{E^2}) \quad (12)$$

公式中， ϵ' 为相对介电常数（就一般的铁电材料来说， ϵ' 通常约为 10^4 ）， ϵ_0 为自由空间的介电常数（ $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ）， ω 为交流电场的角频率（ $\omega = 2\pi f$ ，其中， f 为输电线中交流电的频率，例如，在传统的输电线中为 60Hz）， $\tan \delta$ 为介电损耗的正切， $(\overline{E^2})$ 为电场的均方。

铁电材料的特性是：在温度低于居里温度（ T_C ）时， ϵ' 的数值和 $\tan \delta$ 的数值非常高；在温度高于居里温度（ T_C ）时， ϵ' 的数值和 $\tan \delta$ 的数值较小。因此，在温度低于和接近 T_C 时，介电损耗（或交流电场的供热能力）非常高；而在温度高于 T_C 时，介电损耗（或交流电场的供热能力）则大大下降（例如，下降 10^6 ）。这就使得居里温度接近或稍高于熔点温度的铁电材料成为了涂层 704 的最佳选择。当外界温度低于熔点温度 T_m 时，这类涂层吸收电能，并被电场加热到高于 T_m 的温度，结果，涂层又转变为常见的绝热体（即，不再大量吸收电场能量）。

因此，在这类涂层位于波动的交流电场中时，铁电材料保持一个接近或稍高于 T_m 的恒定温度。将这种自调节机理应用于防止结冰是非常经济的；另外，还可以通过改变涂层厚度和/或给涂层增加中性（非铁电）绝缘涂料或塑料，提高或降低每米输电线（或每平方米的任何被保护表面）的最大供热能量。根据本发明，适用的铁电材料包括：

表 3：铁电材料

名 称	分 子 式	T _c (绝对温度)
罗谢尔盐	NaKC ₄ H ₄ O ₆ 4H ₂ O	255~297
氘代罗谢尔盐	NaKC ₄ H ₂ D ₂ O ₆ 4H ₂ O	251~308
TGSe	(NH ₂ CH ₂ COOH) ₃ H ₂ Se)4	295
铌钽酸钾	KT _{a2/3} Nb _{b1/3} O ₃	271
硝酸铈	NH ₄ NO ₃	255, 305
	Pb ₃ MgNb ₂ O _g	-273K (0°C)

下面以 Pb₃MgNb₂O_g 为例，计算其供热能力。在这个例子中，中距离输电线 $\sqrt{V^2}=10\text{kV}$ ，电线直径 $1\text{cm} = 2\times\text{半径}$ 。电线表面的电场强度为：

$$E = \frac{V}{\ln\left(\frac{L}{r}\right) * r} \approx 3 \times 10^5 \text{ V/m} \quad (13)$$

或 3kV/cm，公式中，L 为电线间的距离 (L = 1m)。将上述： $\overline{E^2}=3\text{E}5 \text{ V/m}$ ， $\omega = 2\pi \times 60\text{Hz}$ ， $\epsilon' = 104$ ， $\tan\delta = 10$ ，代入公式即可计算出 $W(1\text{mm}, 60\text{Hz}) = 4.5\text{E}5 \text{ W/m}^3$ 。这样，例如，1mm 厚的薄膜即产生 450W/m^2 ，这足以超过一般的除冰要求。

当作用于输电线时，在涂层内消耗的最大能量受到电线之间电容 C₂ 的限制：

$$W_{\max} = \frac{\omega C_2}{2} \cdot \overline{V^2} \quad (14)$$

对于厚度为 2cm、电线间距为 1m 的电线来说, $C_2 \approx 1.21 \text{E-}11 \text{F/m}$ 。在输电线 $V=350 \text{kV}$ 时, $W_{\max} \approx 300 \text{W/m}$, 这个能量足以保证 1m 长的电线不会结冰。

除了铁电材料之外, 几乎任何半导体材料的涂层也能够产生类似的效果。为了获得等式 (24) 的最大性能值, 涂层的介电导电系数 σ 应当满足下面的条件:

$$\sigma \approx \epsilon \epsilon_0 \omega \quad (15)$$

公式中, ϵ 为涂层的介电常数, ϵ_0 为自由空间的介电常数。对于 $\epsilon \approx 10$ 和 60Hz 交流电输电线来说, $\sigma \approx 3.4 \text{E-}8 \text{ (ohm.m)}^{-1}$ 。对于许多非掺杂半导体和低品质绝缘体来说, 这种导电性非常具有代表性。因此, 这种涂层并不贵 (一些涂料符合制作这种涂层的质量要求)。此外, 这种涂层也能够实现如前所述的同样的温度“调谐”, 这是由于半导体材料的导电性很强烈地随温度而变化 (例如, 按指数关系变化)。因此, 根据等式 (22), 最佳条件仅能够在非常小的温度范围内被满足 (例如, $-10^\circ\text{C} \leq T \leq 10^\circ\text{C}$), 在最佳条件下, 涂层将能够把冰融化掉, 另外, 消耗能量也极少。

本领域的普通技术人员应当知道, 其他表面 (例如, 本文中所描述的其他表面) 也能够用这类涂层进行处理。例如, 将这种涂层应用于飞机机翼, 通过给涂层加交流电, 特别是根据等式 (19) 来增加交流电, 也能够使其具备融化冰的能力。以 $\text{Pb}_3\text{MgNb}_2\text{O}_8$ 为例来说, 频率 100Hz 的交流电将能够把 1mm 厚的涂层加热到 $W(1\text{mm}, 100\text{Hz}, 3\text{E}5\text{V/m}) = 750 \text{kW/m}^2$ 。

因此, 本发明能够实现前面陈述的各种目标, 这些目标在前面的描述中一目了然。因为在不偏离本发明的情况下, 能够对前面的设备和方法进行一些改进, 因此, 前面描述的所有内容和附图所示

的内容仅是示例性的说明，并不是狭义的说明。

例如，本领域的普通技术人员应当知道，象图 5 中所示的栅状电极，也能够应用于其他多种表面，包括房屋顶、石油管线、公路及其它易于积冰的表面。

图 10 表示本发明的利用渗透层的一个实施例。渗透材料层 2904 附在表面 2902 上。第一个绝缘层 2906 和第二个绝缘层 2908 附在渗透材料层 2904 上。第一电极 2910 附在第一个绝缘层 2906 上。第二电极 2912 附在第二个绝缘层 2908 上。冰 2914 覆盖了渗透材料层 2904、第一个绝缘层 2906、第二个绝缘层 2908、第一电极 2910 及第二电极 2912。

渗透层 2904 的材料，可以是带有孔隙的可注入添加剂来释放离子进入冰 2914 的任何材料。渗透层 2904 的材料可以是任何一种多孔陶瓷、金属或合金。在一些实施例中，渗透层 2904 可以是非常薄的一层（例如，表面 2902 上的涂层）。渗透层 2904 的材料举例如下：

（1）烧结金属构成的渗透多孔电极；参看 Vilar 等人的论文“烧结金属构成的渗透多孔电极- 流体动力学和质量传递”，加拿大《化学工程》杂志（Canadian Journal Of Chemical Engineering），76：（1）：41-50（1998），这篇文章在此被引用为参考资料；

（2）可充电蓄电池的多孔石墨-夹层系统；参看 Barsukov 的论文“可充电蓄电池的多孔石墨-夹层系统”，《新材料》：共轭双接合系统（New Materials: Conjugated Double Bond Systems），191：265-268（1995），这篇文章在此被引用为参考资料；以及

（3）含有金属添加剂的多孔铁电极；参看 Jayalakshmi 等人的论文“多孔铁电极的电化特性”，《印度科学-化学科学协会论文集》（Proceedings Of The Indian Academy Of Sciences-Chemical Sciene），103：（6）：753-761（1991），这篇文章在此被引用为参考资料。

渗透材料层 2904 浸透有添加剂的水溶液, 以提高导电性。添加剂可以是碱、酸或盐。例如, KOH、HF、NaCl 及 KCl 电解溶液。当渗透材料层 2904 和冰 2914(或过冷水滴)接触时, 渗透材料层 2904 释出少量添加剂给冰。添加剂给冰注入离子。这时, 因添加剂的存在, 冰的导电性提高。在非常寒冷的条件下(例如, 在飞机飞行的高海拔条件下), 冰是非常纯净的和/或非导电的。此时, 可通过使用渗透材料层 2904, 来提高纯净冰的导电性和在极低温度下的冰的导电性。通过给渗透材料层 2904 加注含有添加剂的水溶液, 即可以给渗透材料层 2904 补充添加剂。

第一电极 2910 和第二电极 2912, 在施加偏压时, 对极性没有要求。在本发明的一个实施例中, 第一电极 2910 和第二电极 2912 均为多孔型, 可以像渗透材料层 2904 那样, 释放出少量添加剂给 2914。在本发明的另一个实施例中, 第一电极 2910 和第二电极 2912 可以做成任何形状(例如, 格栅)。为了清晰起见, 这些实施例并没有在图 29 中给出。第一个绝缘层 2906 和第二个绝缘层 2908, 可以是能够阻止电极 2910 和电极 2912 与渗透材料层 2904 短路接通的任何材料。

工作时, 在第一电极 2910 和第二电极 2912 之间施加一个电压。第一个绝缘层 2906 和第二个绝缘层 2908, 阻止第一电极 2910 和第二电极 2912 与渗透材料层 2904 短路接通。在渗透材料层 2904 上开始出现结冰 2914 时, 渗透材料层 2904 释放添加剂给冰 2914, 以提高冰的导电性。第一电极 2910 和第二电极 2912 之间的电压, 将降低冰 2914 的冰附着强度, 并将冰 2914 熔化。

图 11 表示从输电线 3000 上除冰的一个实施例。输电线 3000 悬于地面 3002 之上。输电线 3000 包有铁电材料、铁磁材料或半导体材料涂层, 这些材料的介电损耗或磁损耗与温度具有适当的关系。当温度达到输电线涂层的启动温度时, 输电线 3000 的涂层即通过降

低冰的附着强度来除去冰。

输电线 3000 流过电流，这会产生电场或磁场。当温度达到输电线涂层的启动温度时，输电线 3000 的涂层即对电场或磁场做出响应，除去输电线上的结冰。

图 12 表示本发明利用自组装单层 (SAM) 的一个实施例。铬箔 3104 附在石英基底 3102 上。金箔 3106 附在铬箔 3104 上。自组装单层 3108 附在金箔 3106 上。水滴或冰点 3110 在自组装单层 3108 上。直流电源 3112 连接水滴或冰点 3110 和静电计 3114。静电计 3114 连接金箔 3106。

在直流电源 3112 的直流偏压和自组装单层 3108 的疏水性发生变化时，静电计 3114 以库仑计的工作模式来测定界面电荷密度。在不施加外部直流电压的情况下，水和疏水性自组装单层 3108 之间的接触角在 98° ~ 104° 度之间，水和亲水性自组装单层 3108 之间的接触角为 36° ~ 38° 之间。当自组装单层 3108 的疏水性和亲水性发生变化时，水对自组装单层 3108 的附着强度是从 130mJ/m^2 到 54mJ/m^2 。

当施加 -4.5V 的电压时，水和疏水性自组装单层 3108 之间的接触角为 40° 。水对自组装单层 3108 的附着强度是从 59.5mJ/m^2 到 127mJ/m^2 。

自组装单层 3108 的制备，使用镀金面的光学镜。就疏水性样品而言，通过在 1L 甲醇或乙醇中溶解 $138.8\mu\text{L}$ 的 1-十二烷硫醇 $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{SH}]$ ，配制 1mM 的试剂储备溶液；就亲水性样品而言，通过在 1L 甲醇中溶解 0.2044g μL 的 11-氢硫基-1-十一烷醛 $[\text{HO}(\text{CH}_2)_{11}\text{SH}]$ ，配制 1mM 的试剂储备溶液。为了使自组装单层 3108 具有确定的疏水性和亲水性，要根据需要按照一定比例混合这两种溶液。

为了制备自组装单层 3108，金箔 3106 用乙醇进行漂洗，而后，再用氮气风干。然后，将金箔 3106 放置到前面针对确定疏水性和亲

水性而配制的适当溶液中，浸泡 12 小时~36 小时。将金箔 3106 从溶液中取出，用乙醇漂洗 5~10 次。最后，金箔 3106 用氮气风干 10~15 秒。

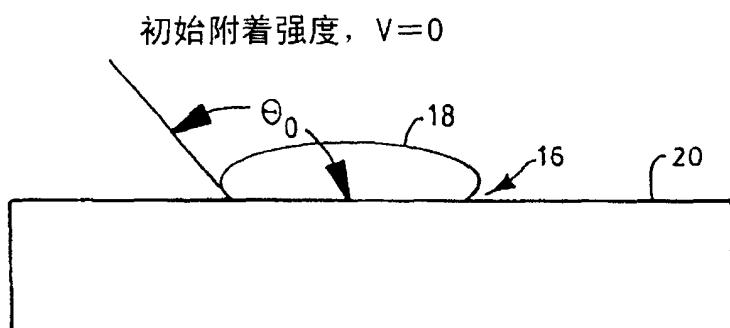


图1A

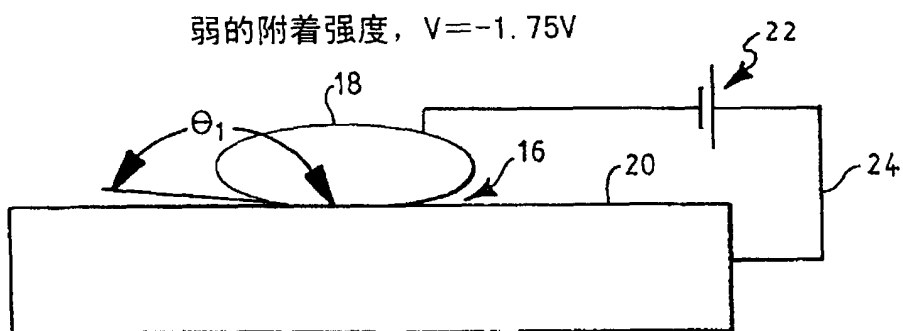
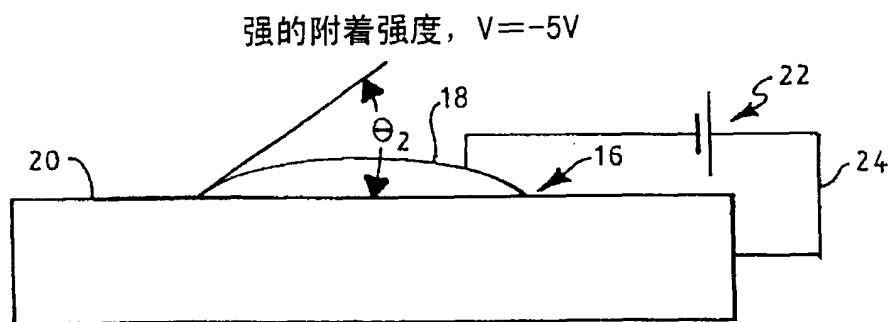


图1B



$$\theta_2 < \theta_0 < \theta_1$$

图1C

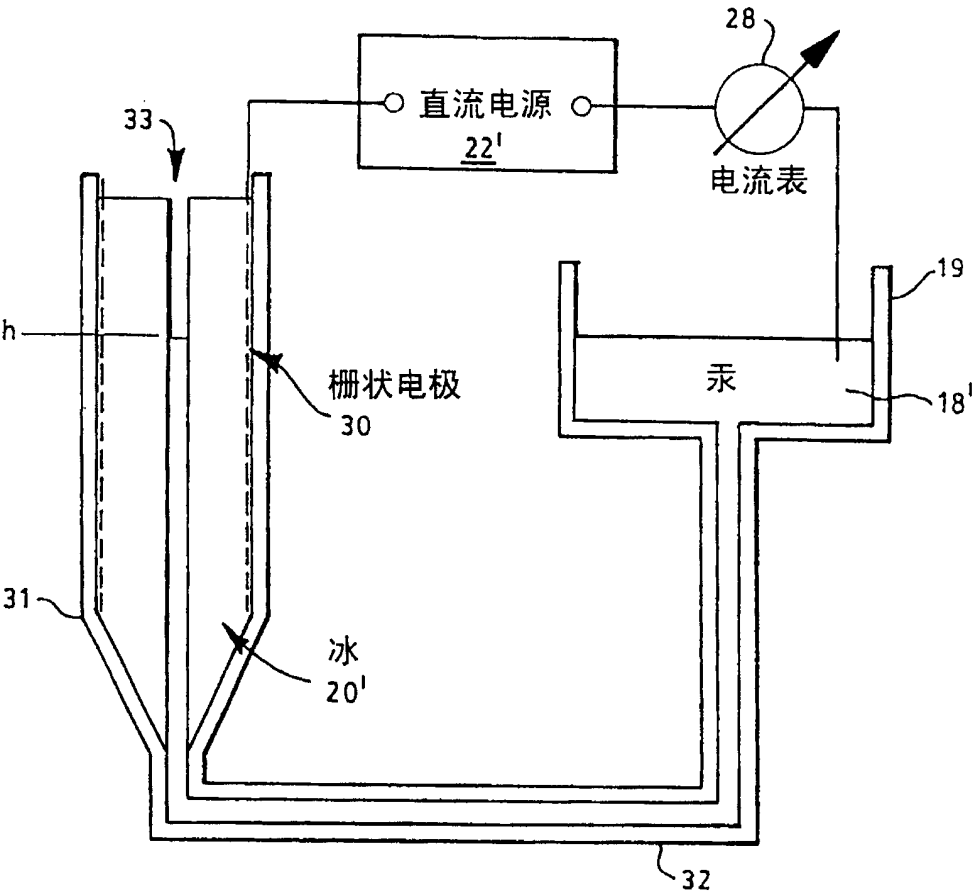


图2

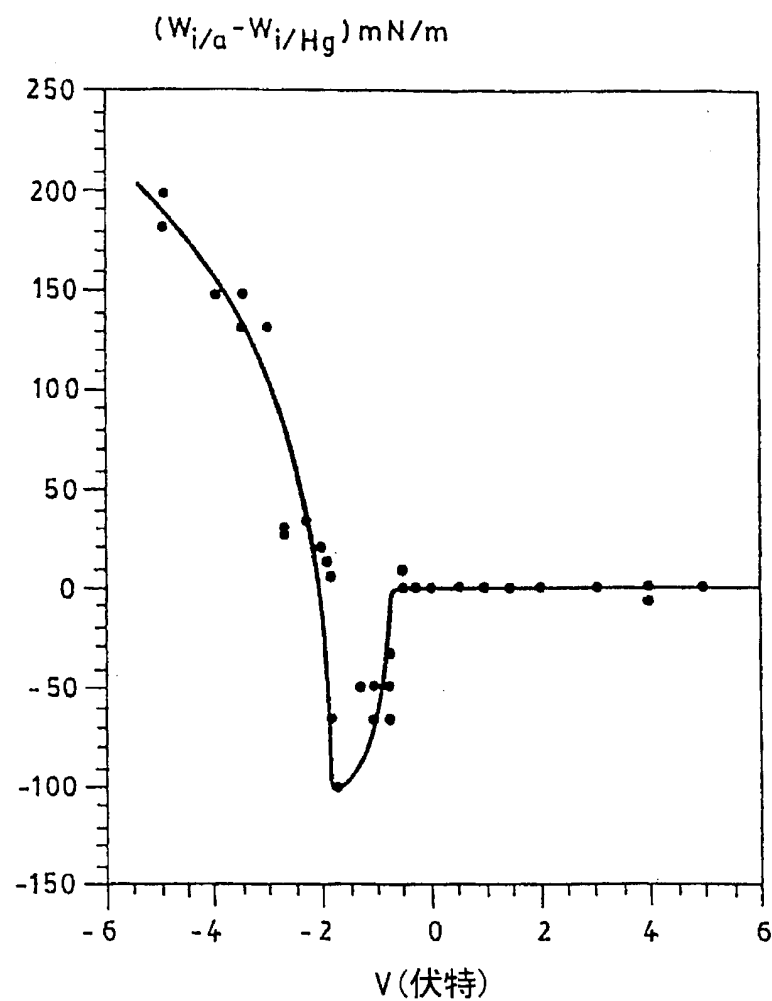


图3

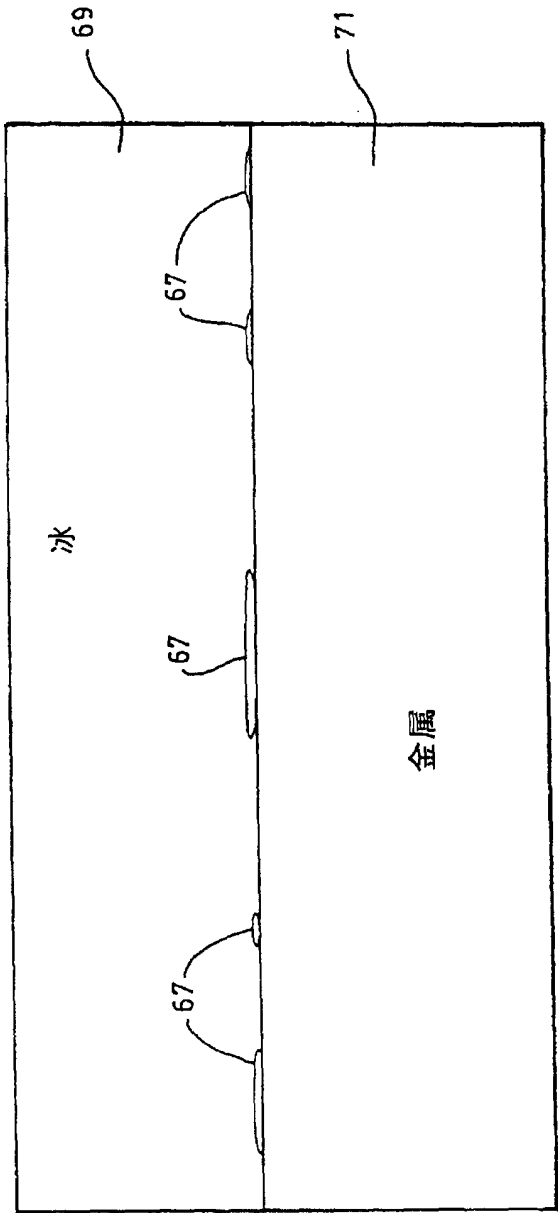


图4

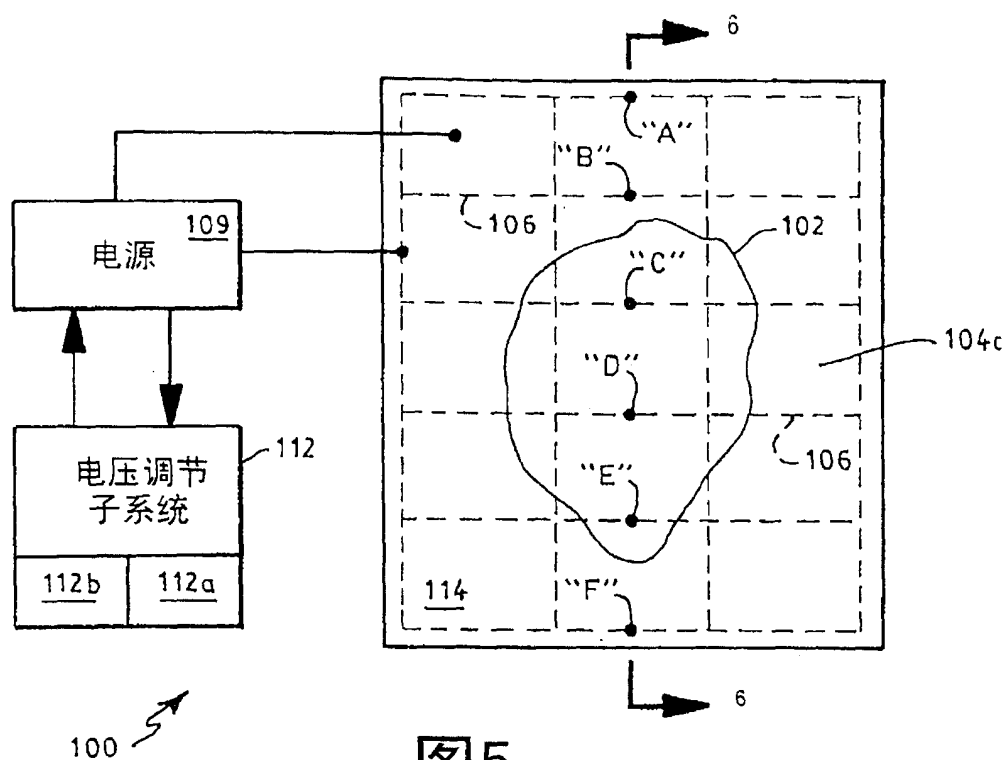


图5

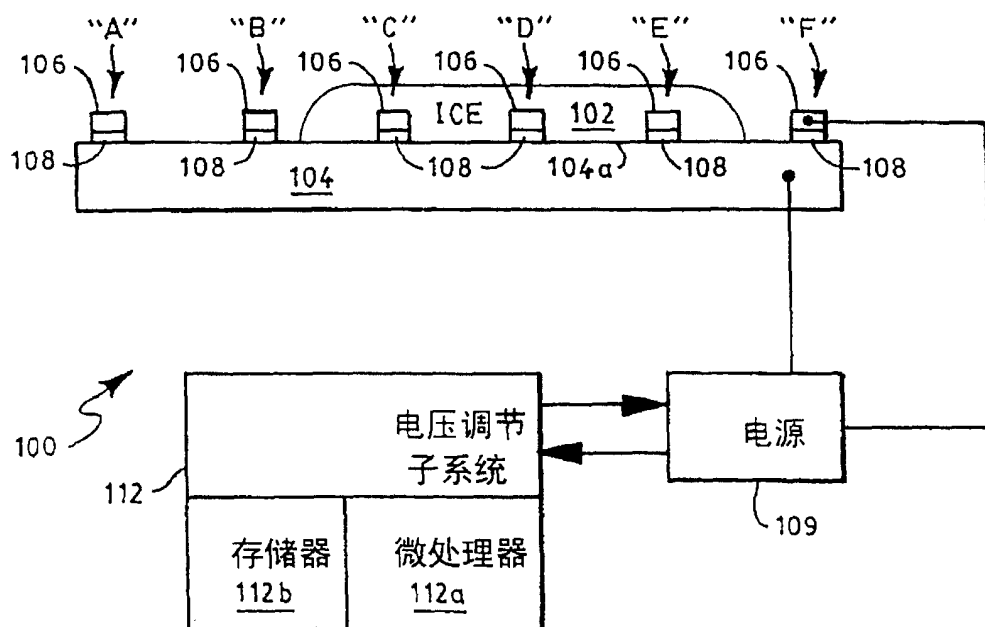
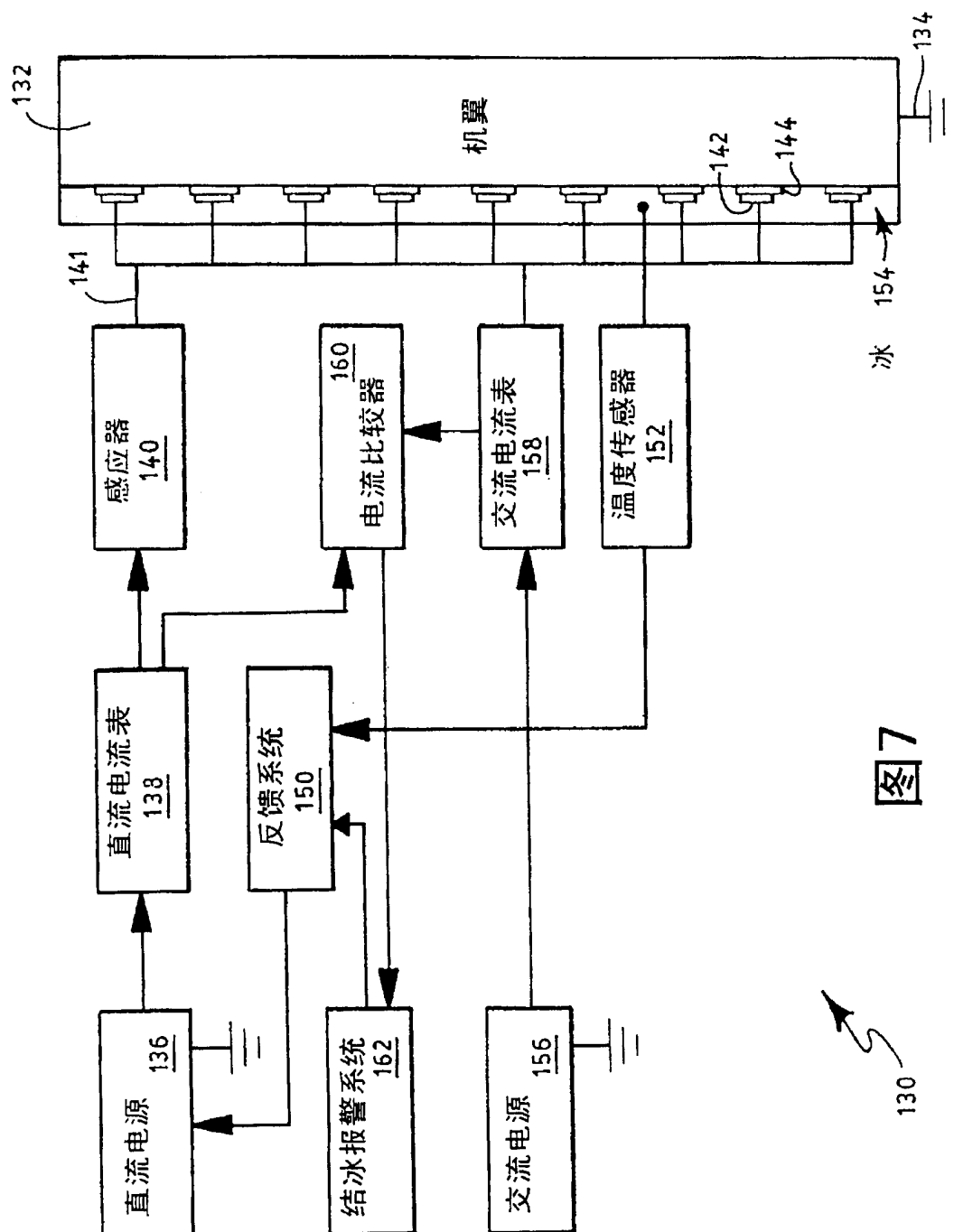


图6



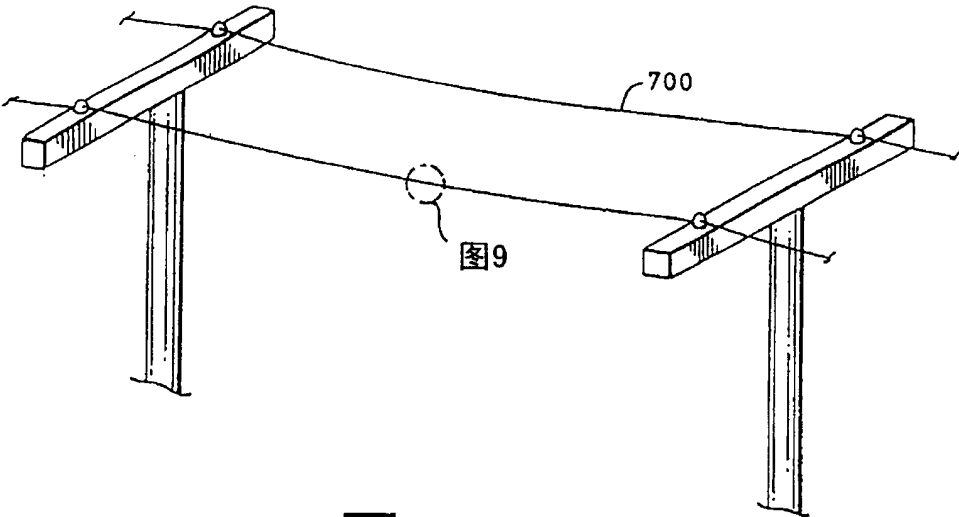


图8

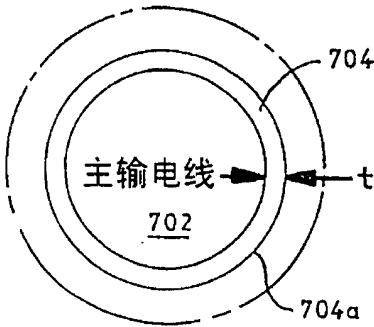


图9

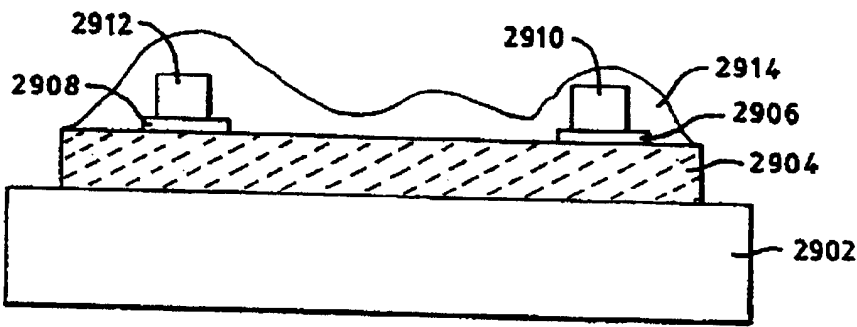


图10

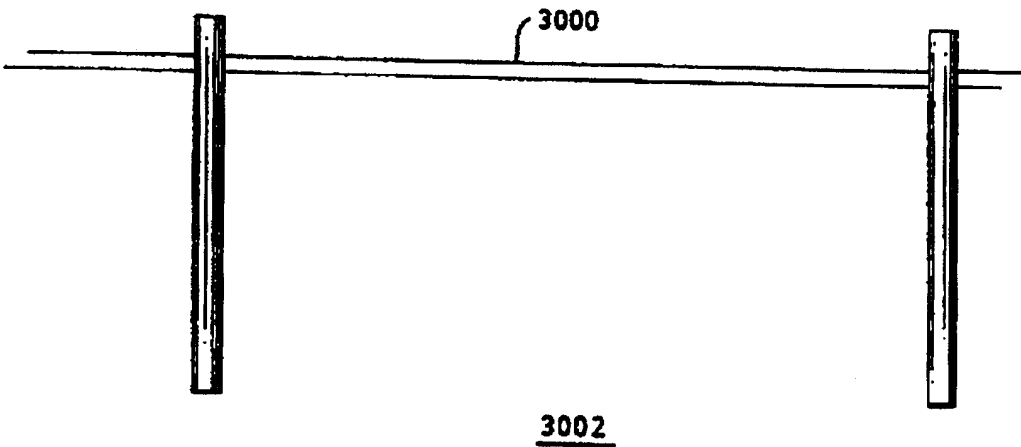


图11

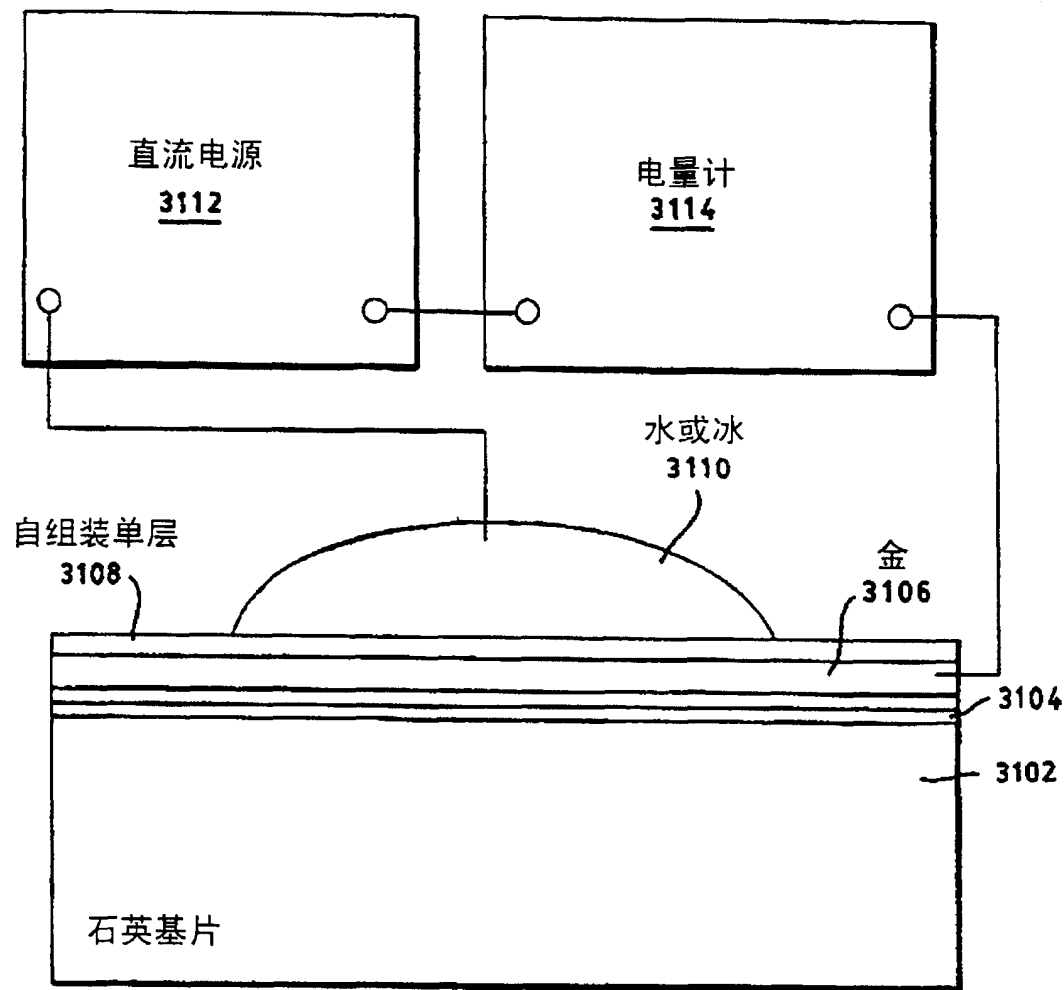


图12