

Research State of the Ruthenium-Based Thick Film Resistor Conduction Model

DING Peng, MA Yi-wu, LI Min-qiang

(Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratories of Transducer of Technology, Hefei 230031, China)

Abstract: We introduced three kinds of thick film resistor(TFR) conductive model. These models all give out satisfactory loading curves. Some defects are found. The relation of the resistivity with shape and size of the conductive phase particles is not consistent with the experimental fact. Many influencing facts in the sintering of TFR can't be shown in the effective medium mode. Many parameters in the percolation model are obtained only from the empirical formulas. The percolation model can reflect more influencing facts and interpret the relation of the sheet resistivity and the granularity of conductive phase, as well as the relation of the sheet resistivity and the peak firing temperature.

Key words: thick film resistor; chain model; percolation model; effective medium model

EEACC: 2220G

钌基厚膜电阻传导模型初探

丁 鹏, 马以武, 李民强

(中国科学院合肥智能机械研究所, 传感器技术国家重点实验室, 合肥 230031)

摘要:介绍钌基厚膜电阻的三种传导模型。三种模型都可以得到较满意的 R-V 曲线, 不足处是链模型得出电阻率和导电相粒子形状及尺寸的关系和实验事实不符; 有效介质模型不能反映厚膜电阻形成过程中众多因素的影响; 渗透模型很多参数的获得有赖经验公式。渗透模型能反映烧结过程中更多因素的影响, 并可解释方阻与导电相粒度及峰值温度的变化关系。

关键词:厚膜电阻; 链模型; 渗透模型; 有效介质模型

中图分类号: TB241; TM2

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2003)04-0375-04

厚膜压力传感器是一种新型电阻应变式压力传感器, 具有蠕变小、耐腐蚀、工作温度范围宽、性价比高等一系列优点。在工业自动化过程控制、机电一体化有着广阔的市场前景^[1]。

厚膜应变电阻是其核心器件。目前厚膜压力传感器的应变电阻主要采用钌基厚膜电阻。钌基厚膜电阻具有精度高、稳定性好、耐高温、工艺重复性好等特点, 在厚膜压力传感器的研究和开发中得到广

泛应用^[2]。

钌基厚膜电阻的传导模型是将厚膜电阻作为一个体系进行研究, 得到的阻值(R)随导电相含量(V)变化的数学模型。电阻值作为厚膜电阻最重要的电特征量, 其与导电相含量间的关系一直就是研究的热点。

由于厚膜电阻为多相体, 相结构复杂, 且粒子数巨大。一般对传导模型的研究都不涉及微观粒子间

收稿日期: 2003-06-05

作者简介: 丁鹏(1978-9-27), 男, 现于中国科学院合肥智能机械研究所攻读硕士学位, Pding@iim.ac.cn;

马以武, 男, 研究员; 李民强, 男, 副研究员, 主要从事厚膜力敏传感器。

的导电机理,而只是在宏观上对厚膜电阻的体系进行研究。认为钉基厚膜应变电阻的电行为在统计上符合一定的规律或具有一定的特征,并通过对这些规律或特征的研究建立传导模型。国外在上个世纪60年代就已开始研究,先后产生过多种模型,这些模型基本可分为三类:链模型、渗透模型、有效介质模型;国内对厚膜电阻的研究主要集中在导电机理方面,到目前为止尚未见到传导模型方面的文献报道。本文对三类模型分别进行介绍。

1 链模型(Chain Model)

链模型认为厚膜电阻的传导过程是通过导电链进行的。导电链的形成和分布可以用概率进行解释。其中较有代表性的是 Kusy 提出的链模型^[3]。

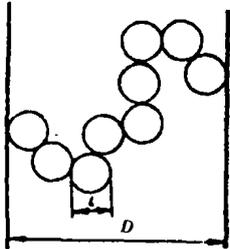


图1 链状结构单元

Kusy 认为,厚膜电阻中存在大量链状的结构单元,见图1。厚膜体系的导电可简化为结构单元内部的导电概率问题。图1所示的结构单元必须满足以下三个条件才可以导电:

- ① 随机选定的点是导电相;
- ② 单元内有足够多的导电粒子,并连接成链;
- ③ 导电链必须连接到结构单元相对的两端。

其中,条件1出现的概率 P_1 ,即为导电相的含量 V ;

条件2出现的概率 P_2 与导电粒子的形状有关,计算如下:

假设导电相粒子的粒径在 x, y, z 三个方向的分量分别为 x, ky, mz (k, m 是常数),则等效粒径

$$l^2 = \frac{x^2 + y^2 + z^2}{3} \quad (1)$$

结构单元内的导电粒子数^[4]

$$n = D^2/l^2 \quad (2)$$

其中, D 是结构单元的尺寸,可表示为

$$D = \frac{(xyz)^{1/3}}{V^{1/3}} \quad (3)$$

将 D^2, l^2 代入式(2)得到 n 的表达式

$$n = 3 \frac{(km)^{2/3}}{1 + k^2 + m^2} V^{-2/3} \quad (4)$$

因为 $P_2 = V^n$,进一步可求出 P_2 的表达式

$$P_2 = V^{3\phi(k,m)} V^{-2/3} \quad (5)$$

其中 ϕ 是导电相粒子的形状因素对电阻率的影响。

$$\phi(k, m) = 3 \frac{(km)^{2/3}}{1 + k^2 + m^2} \quad (6)$$

条件3出现的概率 P_3 , Kusy 是以经验公式:

$$P_3 = L^2 \quad (7)$$

给出的。其中 L 满足

$$3L^2 + 2L^3 = V \quad (8)$$

厚膜体系的电阻率可表示如下:

$$\rho = \frac{\rho_c}{P_1 P_2 P_3} \quad (9)$$

其中 ρ_c 是导电相的电阻率。

将得到的 P_1, P_2, P_3 代入(9),即可得到厚膜电阻的电阻率。

Kusy 分别选择 $\phi(k, m)$ 和 ρ_c 对烧结峰值温度分别为 875℃ 和 800℃ 的两个钉酸铋体系的 $R-V$ 曲线进行拟合,发现在 $V > 0.07$ 时,这两个体系的 $R-V$ 曲线计算值和实际值都很接近。

在链模型中 $\phi(k, m)$ 是作为一个重要的参变量给出的, $\phi(k, m)$ 对 $R-V$ 曲线的计算值有很大影响, Kusy 认为可以通过调整 $\phi(k, m)$ 的值使得计算值和实际值更加符合。但是 $\phi(k, m)$ 的物理意义是导电相粒子形状对电阻率的影响,而实际中导电相粒子形状对电阻率的影响很小,以至于我们很少考虑形状因素;另外,由式(4)和式(5)也可以推出,电阻率与导电相粒子的大小无关,这也和实验事实相矛盾,我们的实验结果是电阻随导电相粒径的增大而增大^[5]。

2 渗透模型(Percolation Model)

渗透理论^[6]是用来描述非均相介质或多孔介质中的传递特性,将该理论应用于厚膜电阻就产生了渗透模型。该模型认为厚膜体系的电行为符合渗透过程的基本公式 $R \propto (V - V_c)^{-\mu}$, V 是导电相的含量, V_c 为渗透常数(Percolation constant), μ 为临界指数(critical exponent), V_c, μ 都是由厚膜体系决定的常数。

其中较有代表性的是 1991 年 Robert. W. Vest 提出的渗透模型^[7]。

Robert. W. Vest 认为在 RuO₂ 厚膜电阻中, RuO₂ 是以环状集块的形式存在, RuO₂ 环连接成链, 对应不同组份存在多种微结构, 并给出了导电相含量(V) 在 0.032 ~ 0.24 范围内的方阻与粒子尺寸和组份的关系。

Vest 认为实测的电阻率 ρ_m 可通过对理想模型的修正得到, 如下式。

$$\rho_m = \rho_{ch} / GP_1 P_2 P_3 \quad (10)$$

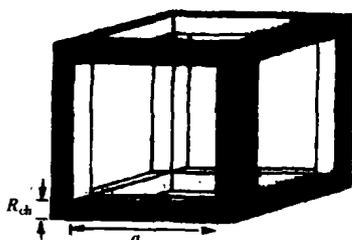


图 2 环状结构单元

ρ_{ch} 是简化的理想模型的电阻率; 模型的结构单元见图 2; G 为几何因子, 引入 G 是考虑到电阻沿电流传导方向的截面积包括绝缘玻璃和导电链; P_1 表示结构单元两个相对的面连续的概率; P_2 表示某一链段导电的概率; P_3 是 RuO₂ 环不被玻璃包围, 成为链段一部分的概率。

为了确定各参数 G 、 P_1 、 P_2 和 P_3 先介绍结构单元的一些基本数据关系。

$$v_c / v_a = 1 - P_a = 0.63 \quad (11)$$

$$v_{pa} / v_c = P_a / 1 - P_a = 0.59 \quad (12)$$

$$v_a / v_{ch} = 1 - P_{ch} = 0.6 \quad (13)$$

$$v_{pch} / v_a = P_{ch} / 1 - P_{ch} = 0.67 \quad (14)$$

v_c 是集块中导电相的体积, v_a 是集块的体积, v_{pa} 是集块中孔隙的体积, P_a 是集块的孔隙率, 这里取 $P_a = 0.37$, v_{ch} 是烧结中形成的“预链”(prechain) 的体积, v_{pch} 是“预链”中孔隙的体积, P_{ch} 是“预链”中的孔隙率, 这里取 0.4。 P_a , P_{ch} 是根据单粒度的稠密随机压缩理论得到的^[8]。

G 推导如下, 对于图 2 所示的模型

$$v_{ch} = 4R_{ch}^2(2R_{ch} + 3a) = 4R_{ch}^3(2 + 3b) \quad (15)$$

$$v_{gbc} = a^2(a + 6R_{ch}) = a^3(1 + 6/b) \quad (16)$$

$b = a/R_{ch}$, v_{gbc} 是链间玻璃的体积;

由以上关系, 推出导电链的体积比例

$$V_{ch} = v_{ch} / (v_{ch} + v_{gbc}) = 4(2 + 3b) / (2 + b)^3 \quad (17)$$

当把电极放到图 2 中两个相对的面时, 电流沿导电链直接传输, 可得

$$\rho_m = \rho_{ch}(1 + b/2)^2 = \rho_{ch}/G \quad (18)$$

由式(16)、(17)消去 b , 得到

$$V_{ch} = 3G - 2G^{3/2} \quad (19)$$

结合(17)、(18), 得到 V_c 与 G 的关系

$$V_c = 1.134G - 0.756G^{3/2} \quad (20)$$

根据渗透理论, P_1 有如下的形式

$$P_1 = A(P - P_c)^t; \quad (21)$$

t , P_c 及 A 均为常数, 对于图 2 所示的简单立方格, 有 $t = 1.6$, $P_c = 0.25$, A 可通过当 $V_c = 0.24$ 时, 令 $P_1 = 1$, 得出 $A = 2.0$ 。 P 是导电相的有效体积比例, 可通过下式求得

$$P = \frac{v_a}{v_a + v_g \left(\frac{R_a}{R_g} \right)} \quad (22)$$

v_a 是集块的体积, v_g 是玻璃的体积; R_a , R_g 分别为导电相和玻璃的半径, 分别取 $R_a = 0.11 \mu\text{m}$, $R_g = 2 \mu\text{m}$ 。

将各常数和式(22)代入式(21)得到 P_1 的表达式

$$P_1 = A \left[\frac{1.59V_c}{1.59V_c + (1 - V_c) \left(\frac{R_a}{R_g} \right)} - 0.25 \right]^{1.6} \quad (23)$$

P_2 表达式如下:

$$P_2 = (v_{ch} - v_{nc}) / v_{ch}; \quad (24)$$

v_{ch} 定义如前, v_{nc} 为不连链段的体积, 通过两个边界条件 $v_{nc} = 0$, $V_c = 0.24$; $v_{nc} = 0.75v_{ch}$, $V_c = 0.032$, 及认为 v_{ch} 随 V_c 线性变化解出

$$v_{nc} = v_{ch}(0.87 - 3.61V_c) \quad (25)$$

将上式代入(24)得到

$$P_2 = 0.13 + 3.61V_c \quad (26)$$

对于 P_3 , Vest 认为 RuO₂ 集块连接成为链段的过程主要发生在玻璃熔化烧结的阶段, 取决于集块离开链段的速度和邻近的集块连接成链段的速度的对比, P_3 可由导电相的比例及在玻璃中的溶解性决定, 对于 $0.032 < V_c < 0.24$ 的情况, $P_3 = 1$ 。

至此, 可得出渗透模型的电阻率表达式

$$\rho_m = \frac{\rho_{ch}}{AGP_3(0.13 + 3.61V_c) \left[\frac{1.59V_c}{1.59V_c + (1 - V_c) \left(\frac{R_a}{R_b} \right)} - 0.25 \right]^{1.6}} \quad (27)$$

式中除 V_c 外皆为常数,

Vest 用式(27)对两种 RuO_2 体系的 $R - V$ 曲线进行了拟合。这两种体系的差别仅在于峰值温度时导电相在玻璃相中溶解度的不同。溶解度较小的体系,无论导电相含量高低,其拟合性都很好,而溶解度较大的体系,只有当导电相含量较高时,计算值与实测值才很接近。

此外,用该模型也可定性地解释相关文献中的实验结果:从式(27)可以看出 $\rho_m \propto R_s$,这与文献^[5]观察到的方阻随导电相的粒度增大而增大相符;式(27)中的 P_3 主要反映峰值温度时烧结过程对方阻的影响,是集块离开链段和集块连接成链段这两个互逆的过程相互作用的结果,可以解释方阻与峰值温度的关系曲线存在最小值的实验事实^[2]。

渗透模型较好的表达了导电相和玻璃相的微粒间空隙的影响,体现了导电相和玻璃相的比例、粒径,以及导电相在玻璃相中的溶解性对方阻的影响。不足之处是推导过程中很多参变量的获得有赖于经验公式。

3 有效介质模型(Effective Medium Model)

有效介质理论^[9]是在导通性相同的情况下,用拓扑性质相同的均匀网络近似替代一个非均匀多孔网络的理论。该理论应用于厚膜体系就产生了有效介质模型。该模型认为厚膜体系的电特性由各成分的单体的电特性综合而成,其有效电导 g_m 满足

$$\int_0^\infty f(g) \frac{g_m - g}{g + \left(\frac{1}{2} z - 1 \right) g_m} dg = 0 \quad (28)$$

其中 g 是对应不同接触情况的电导, $f(g)$ 是该接触情况发生的概率, z 是导电相的配位数。Smith D. p. h. and Anderson J. C.^[10] 以及 Yu - Hung^[11] 都提出过能够较好拟合 $R - V$ 曲线的模型,这里简介前者。

S 和 A 认为导电粒子中间分布着玻璃介质层,接触电导 g 存在如下关系

$$g \propto \exp(-r/d) \quad (29)$$

其中 d 是特征隧道距离(characteristic tunneling dis-

tance); r 是玻璃层厚度,在厚膜体系中可视为均匀分布,所以 $\ln g \propto -r$,即 $f(\ln g)$ 满足均匀分布。 G 的概率分布如图 3,其中 β, G 是与分布宽度有关的因子。将 $f(g)$ 代入式(29)得到

$$g_m = \frac{\beta \{ (G - G^{-1}) \exp(x) \}}{(z/2 - 1) \{ \exp(x) - 1 \}} \quad (30)$$

其中, z 是导电相粒子的配位数,针对厚膜体系取 6 是合理的; $x = 2 \ln G / 3p$, p 是导电带出现的概率。对于玻璃相和导电相粒径相同的系统, p 是导电相的含量,对于粒径不同系统,有如下关系:

$$p = \frac{p'}{p' + (1 - p') r_c / r_g} \quad (31)$$

r_c, r_g 分别是导电相和玻璃相的粒径。

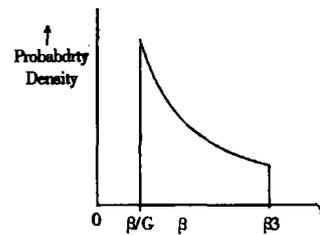


图 3 概率密度

所以对于实际厚膜体系有

$$g_t = g_m \{ p' + (1 - p') r_c / r_g \} \quad (32)$$

对于厚膜体系 r_c / r_g 在 1:7.5 - 1:15 之间, G 取 10^6 。

β 取值的确定通过如下方式:导电相的电阻率 ρ_0 可视为导电相含量为 1 ($p = 1$) 时的厚膜的电阻率,即

$$\rho_0 = 1 / g_m \{ p' + (1 - p') r_c / r_g \} \quad (33)$$

从式(33)中可求出 β 。

S 和 A 通过调整 $G, \rho_0, r_c / r_g$ 对多个厚膜体系^[12-15]的 $R - V$ 曲线进行拟合,都得到了满意的结果,还用该模型解释了 TCR 曲线上存在的最小值。

有效介质模型考虑了导电相比例、粒径比对电阻的影响,在解释 TCR 时也反映出激活能的影响,但厚膜形成过程的众多影响因素,如峰值烧结温度、保温时间等在模型中都未能反映,是该模型的欠缺之处。

3 结束语

本文介绍的三种传导模型分别从不同角度、运用不同的理论研究钉基厚膜电阻的导电特性,各有长处和不足。相比之下渗透模型考虑的影响因素更

(下转第 386 页)

技术自主开发的速度为 10 ~ 100 Mbps 的点对点的高速串行通信系统 PPSeCo(Point to Point High Speed Serial Communication System),这一系统将大量从手指上的 AD7888 所采集的数据实时地在各个模块之间进行传输,使得主处理器能够实现精确的实时控制任务。点对点串行通讯系统较其它各种总线式串行通讯系统有更高的数据吞吐量,更好的实时性及可维护性。PPSeCo 串行通讯系统遵循半双工的工作原理,如图 6 所示,其传输速度可以达到 25Mbps。

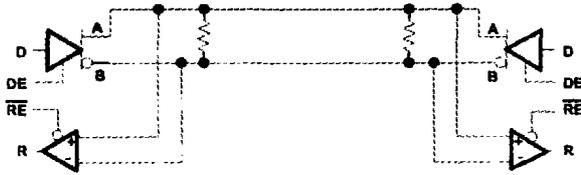


图 6 半双工工作原理

在 PPSeCo 串行通讯系统上使用的主要传输介质为双绞线,对于近距离的传输,则采用了扁平电缆。为 PPSeCo 选用的 LVDS(Low Voltage Differential Signaling)电气接口标准,仅仅使用了 $\pm 350\text{mV}$ 的差分信号,因此具有极小的电磁干扰(EMI, Electro-Magnetic Interference),很强的抗干扰能力。

(上接第 378 页)

全面,可较好地反映厚膜电阻烧结过程中工艺参数对阻值的影响。模型表达式中各参变量的物理意义清楚,对研究厚膜电阻的指导意义较大。

参考文献:

- [1] 马以武,常慧敏,戈俞. 传感器世界[J], 1997,(3):17.
- [2] 陈章其. 电子器件[J], 1995,18(4):239-248.
- [3] Andrzej Kusy, Thin Solid Films[J], 1977,43:243-250.
- [4] Papoulis A. Probability, Random Variables and Stochastic Processes[M]. Tokyo: McGraw-Hill, 1965.
- [5] 马以武,宋箭,常慧敏. 功能材料增刊[J], 1998.10 650-652.
- [6] Staufferd, Aharony A. Introduction to Percolation Theory[M]. London: Taylor and Francis, 1985.
- [7] Robert W. Vest. IEEE Transactions on Components, Hy-

4 结束语

HIT/DLR 灵巧手涵盖数量众多的传感器,并且实现了传感器系统的全数字化、电路的高度集成化和通讯控制系统的高速智能化,为灵巧手感知外部环境,提高多指灵巧手的智能化水平和作业水平打下了良好的基础。

参考文献:

- [1] Liu H. Butterfass J, Grebenstein M, Hirzinger M. DLR Multisensory Articulated Hand I and II. Proceedings of the 2001 International Workshop on Bio-Robotics & Teleoperation [C]. Beijing, China. May 2001,76-83.
- [2] Butterfass J, Hirzinger G, Knoch S, Liu H. DLR's Multisensory Articulated Hand, Part I: Hard- and Software Architecture[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven, Belgium. 1998:2081-2086.
- [3] 姜力等. 新型电子元件在机器人灵巧手微型五维力传感器中的应用[J]. 电子器件, 2000,4.
- [4] 杨磊等. 微型五维力/力矩传感器中的研究[J]. 机器人, 2003,02.

brids, and Manufacturing Technology[J], 1991,14(2).

- [8] Scott G D, Packing of sphere[J]. Nature, 1960,188,908-909.
- [9] Bruggman. Ann, Phs Lpz[J], 1935,24:636.
- [10] Smith D P H and Anderson J C. Thin Solid Films[J]. 1988, 71:79-89.
- [11] Hsieh Yu-Hung and Fu Shen-Li IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology[J], 1994, 17(2):316-318.
- [12] Pike G E and Seager C H. J. Appl. Phs[J], 1977,48(12): 5152-5169.
- [13] Kusy A, Thin Solid Films[J], 1977,37:281.
- [14] Kusy A, Thin Solid Films, 1977[J], 43:243.
- [15] Angus H C and Gainsbury P E, Electron. Components[J], 1968,3:84.