

# Preparation of Vanadium Pentoxide Films Derived by Sol-Gel Process and Forecasting Film Thickness

Lan Ma<sup>1, 2</sup>, Shao-li Yang<sup>2</sup>, Shi-zhong Gao<sup>2</sup>

 Biology&Chemistry Engineering College of Panzhihua University, Panzhihua 617000, China
 Sichuan Technology Engineering Research Center for Vanadium & Titanium Materials, Panzhihua 617000, China Email: hudie5656@163.com

**Abstract:** The V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films have been prepared by Sol-Gel process with the V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> as the starting materials in this paper,suitable for the preparation of the technological process and the technological parameters. Through calculation and theoretical analysis of the different coating methods for colloidal stress, obtained V2O5 thin film thickness forecast model. When the colloid viscosity for  $(1.0 \sim 3.0)$  Pa·S, film thickness for $(0.5 \sim 40.0)$  µm, using this model can forecast film thickness.

Keywords: V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;the sol-gel method;viscosity;coating technologies;film thickness

## $V_2O_5$ 溶胶-凝胶薄膜制备及其厚度预报

马兰<sup>1,2</sup>,杨绍利<sup>2</sup>,高仕忠<sup>2</sup>

(1、攀枝花学院,生物与化学工程学院,四川,攀枝花,中国,617000;
 2、四川省钒钛材料工程研究中心,四川,攀枝花,中国,617000)
 Email:hudie5656@163.com

**摘 要:**本文介绍了以 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>溶胶-凝胶为原料制备 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>薄膜的方法,得出了适宜的制备工艺流程及其 工艺参数,通过对不同涂膜方法的胶体受力情况的理论分析和计算,得出了 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>薄膜厚度预报模型。 当胶体粘度为(1.0~3.0) Pa·S、薄膜厚度为(0.5~40.0)µm 时,用此模型可预报薄膜厚度。

关键词: V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 溶胶-凝胶法; 粘度; 涂膜方法; 薄膜厚度

### 1 引言

近年来,作为功能材料的 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>薄膜因其广阔的应 用前景受到广泛的重视<sup>[1~8]</sup>。V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>薄膜的制备方法有多 种。主要有高频磁控溅射法<sup>[7]</sup>,反应蒸发法<sup>[9]</sup>、真空蒸 发法<sup>[1]</sup>,以及溶胶-凝胶法<sup>[1,3]</sup>等。本文采用改进的无 机溶胶—凝胶法将工业 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>制成溶胶-凝胶<sup>[9~13]</sup>,并以 此胶体用不同涂膜方法、在不同衬底上涂制 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>薄膜, 得出适宜的 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>薄膜制备工艺及其工艺参数。

制备 V<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 薄膜的涂膜方法有旋涂法、浸涂法、喷 涂法和刷涂法四种。前三种方法所制备的薄膜表面(宏 观)质量都比较好,刷涂法所制备的薄膜表面质量相 对较差,一般不采用。喷涂法对于凝胶的适用性较差。 当凝胶的粘度较小时(如小于 3.0 Pa·S 时),可以很均 匀地分布在各种材质的衬底上,基本上不受涂膜方法 的限制,而且可以重复涂覆多层,可以选用前述四种 方法当中的任意一种。当凝胶的粘度较大(如 5.0 Pa·S 到几十 Pa·S)时,由于其自身的粘滞力较大,均匀地分 布在各种材质的衬底上,基本上不受涂膜方法的限制, 而且可以重复涂覆多层,可以选用前述四不容易均匀 地分布在衬底上,容易出现"花斑"现象,则不宜选 用喷涂法。所以为了保证涂膜质量,我们选择旋涂法 或浸涂法涂膜。

### 2 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>薄膜

以制备好的 V<sub>2</sub>0<sub>5</sub> 溶胶-凝胶为原料<sup>(13)</sup>,采用旋涂法 或浸涂法涂膜方法、在不同衬底上涂制 V<sub>2</sub>0<sub>5</sub> 薄膜,得 出适宜的 V<sub>2</sub>0<sub>5</sub> 薄膜制备工艺及其工艺参数。

### 2.1 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜制备工艺

### 2.2.1 衬底材质的选择

综合考虑成本及来源等因素,选用普通玻璃和石

资助信息:马兰,女,(1972-),讲师,硕士,主要从事无机功能 材料及钒钛磁铁矿综合利用研究

英玻璃作为衬底。选用普通玻璃作为载体,主要是考 虑其价格低廉、来源广泛,能满足制膜试验要求;选 用石英玻璃作为载体,主要是考虑其光学性能更好些, 特别是对光的透过率较普通玻璃高,虽然价格较普通 玻璃贵一些,但也容易获得,也能较好地满足制膜试 验要求。

### 2.2.2 V2O5 薄膜制备方法

将 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 溶胶-凝胶用旋涂法或浸涂法涂覆在普通 玻璃衬底和石英玻璃衬底(尺寸为:长×宽×厚 = 70 ×17×2 mm)上,在空气中自然干燥即形成 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜。 再将自然干燥后的 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜放在干燥箱中进行烘干 处理,并使之晶化。

### 2.2.3 制备工艺参数

采用改制旋转涂膜装置和台式匀胶机进行了大量 涂膜探索试验,得到适宜的工艺参数,见表1和表2。

Table 1. System resulting data of standard expriment 表 1. 标准试验系统结果数据

胶体粘度	输入电压	旋转时	预涂胶量	涂覆次	
(Pa • S)	(V)	间(S)	(mL/块)	数(次)	
<1.0	$\sim 100$	30~40	5	$1 \sim 4$	
1.0~2.0	135~140	60	5~8	1~4	
2.0~3.0	145~150	120	5~8	1~4	
3.0~4.0	155~160	180	5~8	1~4	
注:长方形衬底尺寸: 长×宽×厚 = 70×17×2 mm; 正方形衬					
底边长=25×25 mm, 40×40 mm;					

 Table.2
 Suitable technology parameter of table spin-coating set

 表 2.
 台式匀胶机旋转涂膜适宜工艺参数

$(r/min \times S)$	(mL	(次)
400×(20~30)	5~10	1~4
560×(20~30)	10~15	1~4
600×(30~40)	10~15	1~4
720×(35~50)	10~15	1~4
茋,边长=25×25∶	mm, $40 \times 40$ mm	; 先低转数再
	(r/min×S) 400×(20~30) 560×(20~30) 600×(30~40) 720×(35~50) 衰,边长= 25×25	(r/min×S)         (mL           400×(20~30)         5~10           560×(20~30)         10~15           600×(30~40)         10~15           720×(35~50)         10~15           素,边长=25×25 mm, 40×40 mm

浸涂法适宜的工艺参数:采用自行设计制做的浸 涂法涂膜试验装置进行了大量的涂膜探索试验。当其 它条件一定时选择提拉速度作为主要工艺参数,得出 适宜的工艺参数,见表 3。

 Table 3.
 Suitable technology parameter of dipping-coating set

 表 3
 浸涂法涂膜适宜工艺参数

胶体粘度 (Pa·S)	提拉速度 (mm/S)	预涂胶量 (mL)	涂覆次数 (次)
<1.0	3.0	5~8(长方形	1~4
1.0~2.0	2.4	对底),	1~4
2.0~3.0	2.0	10~15(正方 平社序)	1~4
3.0~4.0	1.6	尼们成了	1~4

注: 长方形衬底尺寸: 长×宽×厚 = 70×17×2 mm; 正方形衬底, 边长= 25×25 mm, 40×40 mm; 预涂胶量可依衬底尺寸大小而适当增加或减少。

通过采用以上涂膜方法和相应的工艺参数,可以 将 V<sub>2</sub>0<sub>5</sub>薄膜的总厚度控制在(0.5~40.0)μm,均处于从 零点几微米到几十个微米的薄膜厚度范畴之内<sup>114</sup>。

### 3 涂膜作用力分析及模型的建立

涂膜方法不同时,胶体所受的力不同。对于旋涂 法,使胶体均匀分布在衬底上的作用力为离心力,浸 涂法则为胶体自身的重力。采用上述两种涂膜方法时, 衬底表面上胶体的受力分析见图1。



图 1. 衬底上胶体的受力分析

因为所制备的 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>胶体为非牛顿流体,不能用牛顿定律来描述,所以其中胶体微元所受的相邻胶层的剪切力与粘度的关系式,用幂数定律描述<sup>[15]</sup>:

$$\tau = \kappa' \cdot \left(\frac{dV}{dx}\right)^n \quad (n > 1) \qquad (1)$$

式中 *τ*——相邻胶层间的剪切力, N/m<sup>2</sup>;



*n* — 大于1的常数,是胶体非牛顿性的 量度,与1相差越多,则非牛顿性行为越明显;
 *V* — 各层移动速度, m/s;

*x*——与移动速度垂直方向上的距离, m。

K'——常数,是胶体稠度的量度,视不同胶体而 异,主要与温度 T、胶体浓度 Ce及放置时间 t 有关,K ′ 值越大表示胶体越粘稠;K′可用下式表示:

$$K' = f(T, Cc, t) \tag{2}$$

### 3.1 旋涂法衬底表面上胶体的受力分析

对于旋涂法,胶体受离心力,在水平放置的衬底 上向远离旋转中心的方向流动。对于胶体中的某一流 层,取微元体 dr、yr,它主要受离心力 fC 和衬底对胶 层的剪切力τ作用,当此二力平衡时,衬底上胶体层 的厚度就是湿薄膜的厚度,见图 2,图中衬底位于旋 转中心。



#### Fig 2. Force analyse of colloids for spin-coating film method 图 2. 旋涂法胶体受力分析

微元体的质量 data为:

$$dm_{r} = \pi \rho_{C} \cdot [(r+dr)^{2} - r^{2}] \cdot y_{r}$$
$$= \pi \rho_{C} \cdot (2r+dr) dr \cdot y_{r}$$
(3)

微元体在水平方向所受的离心力 
$$f_c$$
为:  
 $f_c = dm_r \cdot r \cdot \omega_c^2$   
 $= \pi \rho_c (2r + dr) dr \cdot r \cdot y_r (\frac{2\pi n_c}{60})^2$   
=1.11×10<sup>-3</sup> ·  $\pi^3 \rho_c \cdot (2r + dr) dr \cdot r \cdot y_r \cdot n_c^2$  (4)  
式中  $f_c$ ——胶体单位面积上所受的离心力, N;  
 $\rho_c$ ——胶体密度, kg/m<sup>3</sup>;  
 $y_r$ ——半径  $r$  处的胶体的厚度, m;  
 $r$ ——半径, m;  
 $dm$ ——半径  $r$  处胶体微元的质量, kg:

$$n_c$$
—转盘转数,r/min;  
 $\omega_c$ —转盘旋转角速度,弧度/min。  
平衡时,有:  
 $f_c = \tau \cdot [\pi (2r + dr)dr]$  (5)

即

$$1.11 \times 10^{-3} \pi \cdot \rho_c \cdot n_c^2 \cdot y_r \cdot r(2r+dr)dr = \tau \cdot \pi \cdot (2r+dr)dr$$
(6)

所以

$$y_{r} = \frac{1}{1.11 \times 10^{-3} \pi^{2} \rho_{c} \cdot n_{c}^{2}} \cdot \frac{\tau}{r}$$
$$= \frac{91.37}{\rho_{c} \cdot n_{c}^{2}} \cdot \frac{\tau}{r}$$
(7)

$$\rho_c \cdot n_c^2 \cdot r$$
  
其中胶层中的速度梯度  $D$ 为:

$$D = \frac{dVr}{dr} \tag{9}$$

式中 Vr 为胶体沿半径 r 方向的运动速度。

由式(8)可知:薄膜厚度 y-是胶体密度 ρ 、胶体 稠度 K'、转盘转数 n 、所在旋转半径 r 及速度梯度 D 的函数。薄膜厚度 y-与胶体的密度、转盘转数的平方 及所在半径 r 成反比,与胶体的稠度(粘度)、胶层中 的速度梯度成正比。即距旋转中心越近、转盘转数越 低、胶体的密度越小、胶体的稠度越大、速度梯度越 大,则薄膜的厚度越大,反之则越小。当 r = r<sub>mat</sub>= R<sub>d</sub> 时,薄膜厚度最小。Rd 为衬底的半径或半长。当 r=0 即在旋转中心处,胶体不受离心力作用,所以薄膜厚 度最大,但由于受周围相邻胶体运动的索引作用,该 处的薄膜厚度也不等于转盘未旋转时的预涂胶体厚 度。

当衬底不在转盘的旋转中心时(*r* = *r*<sub>1</sub>~*r*<sub>2</sub>, *r*<sub>1</sub>、 *r*<sub>2</sub>分别为衬底两端所在的半径),也可得出相同的结 果。

因此,可以得出旋涂法单层薄膜厚度可操作的控制参数有:胶体密度 ρ 、胶体稠度 K′、转盘转数 n 、 衬底所在的旋转半径 r(至旋转中心的距离)。

### 3.2 浸涂法衬底表面上胶体的受力分析

对于浸涂法,衬底呈竖直方向,选取衬底表面胶 体微元体 dy、x(图 3),在竖直方向受身重力和衬底对 胶层的剪切力作用。

胶体微元所受的重力为 dwy:



$$dW_{y} = \rho_{c} \cdot b \cdot x \cdot dy \tag{10}$$

$$\tau = k' \cdot \left(\frac{dV_y}{dx}\right)^n = k' \cdot D^n \quad (n > 1)$$

(11)



Fig 3. Force analyse of colloids for dipping-coating film method

### 图 3. 浸涂法胶体受力分析

此时

$$D = \frac{dV_y}{dx} \tag{12}$$

所以,当胶体微元受力处于平衡状态时,下式成 立:

$$dw_{v} = \tau \cdot (b \cdot dy) \tag{13}$$

将式(10)代入式(13)中,得:  
$$\rho_c \cdot g \cdot b \cdot x \cdot dy = \tau \cdot (b \cdot dy)$$

即

 $\rho_c \cdot g \cdot x = \tau \tag{14}$ 

所以

$$x = \frac{\tau}{\rho_c \cdot g} \tag{15}$$

将式(11)代入式(15)中得:

$$x = \frac{K' \cdot D^n}{\rho_c \cdot g} \tag{16}$$

由式(16)可知:采用浸涂法涂膜时,单层薄膜厚 度主要与胶体密度、稠度(粘度)、胶层的速度梯度有 关。当其它条件一定时,单层薄膜厚度正比于胶体稠 度(粘度)和胶层速度梯度的 n 次方,反比于胶体密度, 即密度越小、稠度越大,则单层薄膜厚度越大,反之 则越小;薄膜厚度与提拉速度没有直接的关系,因为 提拉速度的影响已经包含在速度梯度 D 中。

### 4 薄膜厚度的计算和测量结果

当胶体粘度较小时,可以视胶体为牛顿流体。由 式(14)可知,浸渍法制备薄膜时其厚度公式相对比 较简单。如果胶体粘度一定,则剪切力 τ 就是定值, 但计算仍然很困难。本文在 SEM 法测试薄膜厚度的基 础上由式(14)反推算出 τ 值。

因为 SEM 法测得的是干燥后的薄膜(干膜)厚度, 而式(14)表示的是湿薄膜(湿膜)厚度,所以需用 下式将干膜厚度换算为湿膜厚度:

$$x_{\widetilde{a}} = \frac{\rho_{V205}}{\rho_C} \cdot x_{\mp} \tag{17}$$

然后再用式(14)计算  $\tau$  值。 $x_{ax}$ 、 $x_{\tau}$ 分别为湿膜厚度 和干膜厚度,  $\rho_{V205}$ 、 $\rho_{C}$ 分别为  $V_2O_5$  晶体和  $V_2O_5$  胶体 的密度。 $V_2O_5$  晶体密度  $\rho_{V205}$  为 3.352 kg/cm<sup>3</sup>。以刚刚 制备好的 2 号、3 号、5 号  $V_2O_5$  胶体为原料涂制  $V_2O_5$ 薄膜,主要参数见表 4。计算结果也列在表 4 中。表 4 中的 SEM 法测量薄膜厚度结果见图 4。

从表 4 中得出: r 值为(0.11~0.13)kg/(m·s<sup>2</sup>),取 r=0.12 kg/(m·s<sup>2</sup>)。在相同的胶体参数条件下,用式(7) 计算旋涂法(采用匀胶机)涂膜时的湿膜厚度,计算 结果列在表 5。湿膜厚度与干膜厚度仍用式(7)换算。 此时转盘旋转时间为 40 S,旋转半径取 r=20 mm。

Table 4. Major parameters of the colloid and thickness of V2O5 thin film

哈什主要会教育 いっ 声呼声声

衣4. 胶体土姜参数和 V2O5 海膜厚度					
		2 号胶	3 号胶	5 号胶	
密度 pC (g/cm <sup>3</sup> )		1.23	1.40	1.19	
粘度 η(Pa・S)		1.8	2.0	1.4	
$\tau$ (kg/(m • s <sup>2</sup> ))		0.12	0.13	0.11	
薄膜厚度 (μm)	干膜(SEM 法测)	3.6	4.0	3.3	
	湿膜(换算)	9.8	9.6	9.3	





(a)厚度 3.6µm; (b)厚度 4.0µm; (c)厚度 3.3µm

Fig 4. The thickness of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin film by SEM 图 4. SEM 法测量 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>薄膜厚度(1)

Table 5. Thickness of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin film by spinning method 表 5. 旋涂法薄膜厚度(μm)

n <sub>C</sub> (r/min)	2 号胶		3号	3 号胶		5 号胶	
	湿膜	干膜	湿膜	干膜	湿膜	干膜	
600	1.238	0.455	1.088	0.455	1.278	0.470	
500	1.783	0.655	2.566	1.073	1.840	0.672	
400	2.786	1.022	2.447	1.023	2.875	1.049	
300	4.592	1.685	4.351	1.819	5.111	1.820	
200	11.143	4.089	9.793	4.093	11.505	4.096	

图 5 为用 2 号 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>胶体涂制 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>薄膜的湿膜厚

度、换算出的干膜厚度和 SEM 法测得的干膜厚度与转 盘转数  $n_C$ 的关系(在旋转半径  $r = 20 \text{ mm } \mathcal{L}$ )。图 6 为对 应的扫描电镜(SEM)测量的  $V_2O_5$ 薄膜厚度照片。



Fig 5. Relations between thickness of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin film and revolution of turntable 图 5. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜厚度与转盘转数的关系



<sup>(</sup>d)厚度≈1.3µm; (e)厚度≈0.9µm; (f)厚度≈0.7µm

Fig 6. Thickness of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin film by SEM 图 6. SEM 法测量 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>薄膜厚度(2)



从图 5 中可以得出:

①湿膜厚度随转数的增大而减小,并且在 350 r/min 以下时随转数的增大而减小得较快,在 350r/min 以上时则减小得较为缓慢。

②湿膜的厚度大于干膜的厚度。因为湿膜中含有 水份,密度较小,所占体积较大,在相同衬底上当然 厚度较大。同时由式(7)也可得出,因ρ<sub>ν205</sub>大于ρ<sub>c</sub>, 故湿膜厚度大于干膜厚度。

③对于同样的干膜,由 SEM 法测得的厚度略大于 计算得到的厚度,两者的误差在 15%以下,所以由式 (14)和式(7)基本上可以预测出薄膜的厚度。

因为在计算时假设所制胶体为牛顿流体,而实际 上并不是牛顿流体,其粘度随时都是变化的,所以实 测薄膜厚度大于理论计算值。

### 5 结论

(1)通过涂膜时胶体的受力分析,得出了薄膜厚度 与各种因素的关系。旋涂法控制单层薄膜厚度的途径 有:当其它条件一定时,降低转盘转数和使衬底靠近 旋转中心均可增大薄膜厚度;浸涂法控制单层薄膜厚 度的途径有:当其它条件一定时,减小胶体密度、增 大胶体粘度,则可以增大薄膜厚度。反之亦然。

(2)V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜的总厚度可控制在(0.5~40.0)µm, 均处于从零点几微米到几十个微米的薄膜厚度范畴之 内。

(3)胶体粘度对涂膜质量有较大影响。溶胶的粘度 及其变化范围都很小,对涂膜质量的影响较小,可以 很均匀地分布在各种材质的衬底上;凝胶的粘度及其 变化范围相对较大,对涂膜质量有较大影响,涂膜时 最适宜的凝胶粘度为(1.0~3.0) Pa·S。

(4)在胶体粘度为(1.0~3.0) Pa·S 时,可用式(7)来 预测 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>薄膜的厚度。

### References (参考文献)

- Maosong Tong,Guorui Dai.ect.The Application of V<sub>2</sub>O<sub>8</sub> Thin Films Fabricated by Sol-Gel[J]. Technology.Journal of Functional Materials, 2000, 31(3): 230-236 童茂松,戴国瑞等.溶胶-凝胶法制备 V2O5 为基体的薄膜材 料及其应用[J].功能材料, 2000, 31(3): 230-236
- [2] Daoxin Huang.V-recovering Steelmaking[M].Beijing: The Metallurgical Industry Press, 2000. 13-15 黄道鑫. 提钒炼钢[M]. 北京:冶金工业出版社, 2000. 13-15
- [3] Juan Wang, Chen Li, Bo Xu.Basic Principle, Advance and Current Application Situation of Sol-Gel Method[J]. Chemical Industry and Engineering, 2009 26(3): 256-261

王娟 李晨 徐博. 溶胶-凝胶法的基本原理、发展及应用现状 [J]. 化学工业与工程,2009 26(3): 256-261

- [4] Juan Wang, Chen Li,Bo Xu.Basic Principle, Advance and Current Application Situation of Sol-Gel Method[J]. Chemical Industry and Engineering, 2009 26(3): 256-261
   王娟 李晨 徐博. 溶胶-凝胶法的基本原理、发展及应用现状
   [J]. 化学工业与工程, 2009 26(3): 256-261
- [5] Liqiang Mai, Wen Chen.ect. Preparation and Applications of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Xerogel Thin Films[J]. Materials Review, 2002, 16(6): 39-41 麦立强,陈文等. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 干凝胶薄膜的制备及应用[J].材料导报, 2002, 16(6): 39-41.
- [6] Lili,Maosong Tong,Aihua Weng. Recent progress in research on V2O5 thin-film sensors[J].Journal of Functional Materials, 2005, 10 (36): 1482-1484, 1488
   李莉, 童茂松, 翁爱华. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>薄膜在传感器上的研究进展[J]. 功能材料, 2005, 10 (36): 1482-1484, 1488
- [7] Zhongchun Wang,Xiaofeng Chen, ect. Effects of Total Sputtering Pressure on Structural and Electrochromism of RF Magnetron\_Sputtered Vanadium Oxide Thin Films[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 1999, 27(1): 28-33 王忠春. 陈晓峰等. 溅射总压对氧化钒薄膜的结构及电致变 色性质的影响[J].硅酸盐学报, 1999, 27(1): 28-33.
- [8] Shaoli Yang,Jun Wang,Shizhong Gao,Housheng Chen. The analysis on coating method of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sol-gel and its coating property[J]. New Chemical Materials, 2005, 33 (6): 36-38 杨绍利, 王军, 高仕忠,陈厚生. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 溶胶-凝胶涂膜方法及 涂膜性能分析[J].化工新型材料, 2005, 33 (6): 36-38.
- [9] Dachuan Yin, Niankan Xu, ect. The study on heating process of vanadium pentoxide Gel-film[J]. The theory and application of modern science and technology, 1996, 663-667 尹大川, 许念坎等. 五氧化二钒凝胶薄膜加热过程研究[J].现 代科技理论与应用, 1996, 663-667
- [10] Changsheng Xia,Guangming Wu,Zhangzhi Hua,ect.Preparation and electrochemical properties of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films derived by the sol-gel process[J]. Journal of Functional Materials Contents, 2005, 36 (1): 86-89,92
  夏长生,吴广明,张志华等.溶胶-凝胶 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜的制备及其 电化学特性研究[J].《功能材料》, 2005, 36 (1): 86-89,92
- [11] Dachuan Y, Niankan X, Jingyu Z, et al. High quality vanadium dioxide films prepared by an inorganic sol-gel method[J].Mater. Res. Bull, 1996, 31: 335-340.
- [12] Shifeng Wei, Guiling Ning,Jian Wang,Lin Yuan.Recent progress of research on VO<sub>2</sub> thin film[J]. Chemical Industy and Engineering Progress, 2007, 26 (6): 814-818
  韦世凤, 宁桂玲, 王舰, 林源二氧化钒薄膜制备研究的最新 进展[J].化工进展, 2007, 26 (6): 814-818
- [13] Shaoli Yang, Shaocu Xu, ect. Preparation Technology of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Sol-Gel From Industrial V2O5[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2002, 23(1): 17-20, 25
  杨绍利,徐楚韶等.用工业 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 直接制备溶胶-凝胶[J].钢铁 钒钛, 2002, 23(1): 17-20, 25
- [14] Xuedan Li, Yingchao Wang, Film[J]. Vacuum and Low Temperature. 1992.11(1): 51-54.
   李学丹,万英超.薄膜[J]. 真空与低温. 1992.11(1): 51-54.
- [15] Zhukang Zhou, Renti Gu, ect. Colloid chemistry foundation[M]. Peking University press, 2 edition: 318-322
   周祖康,顾惕人等.胶体化学基础[M].北京大学出版社, 1996, 第2版: 318-322.