

丁基橡胶内胎半导体致冷接头机的设计

魏忠宝

(牡丹江市桦林橡胶厂 157032)

摘要 介绍了半导体致冷接头机的工作原理、设计参数和计算方法。丁基橡胶内胎接头冷冻采用半导体致冷接头机具有冷冻速度快、无空气污染、节省电能、无噪音、体积小、操作方便、内胎接头处无熔化和可提高产品质量等优点。可满足丁基橡胶内胎生产工艺的要求,这对橡胶行业开发应用新技术有一定意义。

关键词 半导体致冷,热电致冷,丁基橡胶,内胎接头,冷冻内胎接头机

半导体致冷是一种新型的致冷技术。不需要致冷剂、无机械传动而具有无污染、无噪音、体积小、致冷快、操作方便和节能等优点,尤以节能更为显著。

我厂研制成功丁基橡胶内胎接头用半导体致冷接头机。

1 方案选定

1.1 整体结构

丁基橡胶内胎接头处需要在 4°C 温度下进行冷冻,才能使之定型,以保证内胎的硫化质量。从使用方便考虑,将致冷器带放置于悬臂式托板的中间,制冷面与内胎接头处直接接触,使之局部冷冻至 4°C 以下。托板下面设工作台,便于放半成品及对内胎下半部分起承托作用。将指示信号和控制按钮安装在工作台正面的两侧,以便操作者观察。电源及其它电器都装在电器柜中,置于工作台的下面,以便维修。

冷冻机机体采用薄钢板经机械卷曲加工而成,与工作台、电器柜等组装成一体,力求做到体积小,重量轻,结构简单,维修方便,利于操作。

1.2 电气控制设计要求

电气控制主要设计要求:①三相 380V 交流电源;②控制按钮操作方式,设有高低两档致冷强度,便于冬夏两季选用;③采用仪表与指示灯联合指示工作状态;④对半导体致冷堆的保护,采用微压液流继电器断电、断水及钮扣式热继电器过温断电双重保护方式。

1.3 工艺要求及主要数据

工艺要求及主要数据有:①冷冻工作面尺寸:长 27.5cm、宽 7cm,横向呈圆弧形,以确保与接头胶有良好的接触;②工作环境温度 30°C ;③内胎半成品参数:最大厚度 0.6cm,密度 $1.125\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$,比热容 $2.09\text{J}\cdot(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$,导热系数 $1.33\times 10^{-3}\text{W}\cdot(\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$,初温 30°C ,末温 0°C ,达到致冷所需温度的最长时间 5min;④冷却水温度 $\leq 20^{\circ}\text{C}$ 。

1.4 制冷电偶元件参数

制冷电偶元件参数:①截面 0.25cm^2 ;②长度 0.6cm;③P型电偶臂温差电动势 $200\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$,电导率 $1150(\Omega\cdot\text{cm})^{-1}$,热导率 $15.8\text{mW}\cdot(\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$;④N型电偶臂温差电动势 $-210\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$,电导率 $900(\Omega\cdot\text{cm})^{-1}$,热导率 $16\text{mW}\cdot(\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$ 。

2 致冷电堆的工作原理及计算公式

2.1 工作原理

半导体致冷是“帕尔特效应”在制冷方面的应用,它是由内热电效应比较显著的半导体热电偶构成的,如图1所示。把P,N型半导体元件组成电偶时,当通以直流电后,一端温度下降(吸热)是冷端,另一端温度上升(放热)是热端,借助热交换手段使热端不断散热,保持一定温度,则冷端就吸热降温。将许多个电偶对接起来就组成了一个致冷电堆。

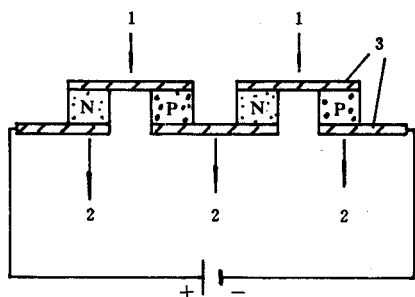


图1 半导体电偶对致冷示意图

1—吸热(冷端); 2—放热(热端);
3—铜电极

2.2 计算公式

2.2.1 一对电偶的产冷量计算

当电偶对通以直流电后,如热端予以散热,并保持一定温度 T_h ,则冷端开始冷却,直到从周围介质传入冷端的热量(制冷量) q_0 与温差电偶的热端沿着电偶臂向冷端传导的热量 q_k 和电流在电偶臂上产生热量的一半传到冷端的热量 q_I 的总和等于帕尔特效应 q_P (在电偶对通直流电两端头外,在1s之内吸收的热量)时,冷端与热端之间就达到了热平衡。设冷端温度为 T_c (绝对温度),则

$$q_P = q_0 + q_k + q_I \quad (1)$$

$$= (\alpha_P - \alpha_N) I T_c$$

式中 α_P ——P型电偶臂的温差电动势, $\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$;

α_N ——N型电偶臂的温差电动势, $\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$;

I ——电流, A。

$$q_k = K(T_h - T_c)$$

$$K = (K_N S_N / L_N) + (K_P S_P / L_P)$$

式中 K ——总热导率, $mW \cdot ^\circ C^{-1}$;

K_N ——N型电偶臂的热导率, $mW \cdot (cm \cdot ^\circ C)^{-1}$;

K_P ——P型电偶臂的热导率, $mW \cdot (cm \cdot ^\circ C)^{-1}$;

S_N ——N型电偶臂的截面积, cm^2 ;

S_P ——P型电偶臂的截面积, cm^2 ;

L_N ——N型电偶臂的长度, cm ;

L_P ——P型电偶臂的长度, cm 。

$$q_I = I^2 R / 2$$

$$R = (L_N / \sigma_N S_N) + (L_P / \sigma_P S_P)$$

式中 R ——电偶臂总电阻, Ω ;

σ_N ——N型电偶臂的电导率, $(\Omega \cdot cm)^{-1}$;

σ_P ——P型电偶臂的电导率, $(\Omega \cdot cm)^{-1}$ 。

以上各式经整理得一对电偶产冷量

$$q_0 = (\alpha_P - \alpha_N) I T_c - (I^2 R / 2) - K(T_h - T_c) \quad (2)$$

2.2.2 一对电偶上的电压

一对热电偶上的电压:

$$V_O = V_R + V_T \quad (3)$$

式中 V_O ——一对电偶上的电压, V;

V_R ——通过电偶的电流在电偶的两端产生的电阻电压降, V;

V_T ——电阻两端温差电动势, V。

$$V_R = IR$$

$$V_T = (\alpha_P - \alpha_N) \Delta T$$

式中 ΔT ——热端与冷端温差, $^\circ C$ 。

$$\Delta T = (T_h - T_c)$$

经整理得

$$V_O = IR + (\alpha_P - \alpha_N)(T_h - T_c) \quad (4)$$

2.2.3 电偶的最佳工作电流

电偶的最佳工作电流如下:

$$I_J = (\alpha_P - \alpha_N) T_c / R \quad (5)$$

式中 I_J ——电偶的最佳工作电流, A。

3 设计计算

3.1 致冷堆冷端温度 T_c 的计算

在内胎接头处完全冷冻到所需温度时(上层表面温度为 0°C),内胎表面与空气的单位面积的换热量 q' (吸热)应与内胎表面与致冷堆表面温差(ΔT)传导的热量相平衡。按导热公式

$$q' = \lambda \Delta T \cdot \delta^{-1} \quad (6)$$

式中 λ ——内胎导热系数 [$1.33 \times 10^{-3} \text{W} \cdot (\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$];

δ ——内胎厚度 (0.6cm)。

上式整理得

$$-T_c = q' \delta \lambda^{-1} \quad (7)$$

q' 的计算按对流、辐射计算换热量(单位面积):

$$q' = \alpha_c \cdot \Delta t$$

式中 Δt ——对流辐射物体间温差, $^\circ\text{C}$;

α_c ——总换热系数, $\text{W} \cdot (\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

因为室内空气温度一般为 30°C ,内胎表面温度为 0°C ,故 Δt 为 30°C 。

$$\alpha_c = \alpha_n + \alpha_r$$

式中 α_n ——空气自然对流换热系数

$$[\alpha_n = 0.7 \times 10^{-3} \text{W} \cdot (\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}];$$

α_r ——辐射换热系数

$$\alpha_r = \epsilon X_{1,2} C_0 \psi$$

式中 ϵ ——内胎胶料黑度 (0.95);

$X_{1,2}$ ——平面角系数 (1);

C_0 ——黑体辐射系数 ($5.67 \overline{\text{W}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$);

ψ —— T_1, T_2 温度函数 ($4 \times 10^{-8} \overline{T^3}$)。

$$\overline{T} = (T_1 + T_2) / 2$$

$$T_1 = 273 + 30 = 303 \text{K}$$

$$T_2 = 273 + 0 = 273 \text{K}$$

由此可求出 $\overline{T} = 288 \text{K}$; $\psi = 0.956$; $\alpha_c = 0.515 \times 10^{-3} \text{W} \cdot (\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$; $q' = 36.45 \times 10^{-3} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。考虑到热交换率一般按 80% 计算,则 q' 为 $45.56 \times 10^{-3} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。将 q', δ ,

λ 值代入式 (7), 可得 $T_c = -20.6^\circ\text{C}$ 。

计算得的 T_c 温度是内胎下表面的温度,而致冷堆表面温度应低于此温度,一般考虑约差 3°C ,故致冷堆的温度应为 -24°C ,亦等于 249K 。

3.2 计算电偶工作电流 I

电偶最佳工作电流公式 (5)

$$T_j = (\alpha_p - \alpha_n) T_c / R$$

其中 R 值通过计算为 $4.76 \times 10^{-3} \Omega$, 代入式 (5) 可计算得 $I_j \approx 21.4 \text{A}$ 。

考虑到电偶联片的焊接质量和留有调节余量,按 85% 选用工作电流 $I \approx 18.2 \text{A}$ 。

3.3 计算一对电偶产冷量 q_0

按公式 (2) 计算:

$$q_0 = (\alpha_p - \alpha_n) I T_c - I^2 R / 2 - K (T_h - T_c)$$

把 $K = 13.25 \text{mW} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $T_c = 249 \text{K}$, $T_h = 296 \text{K}$, $\alpha_p = 200 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $I = 18.2 \text{A}$, $\alpha_n = 200 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_n = -210 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 代入式中,可计算得 $q_0 = 0.446 \text{W}$ 。

3.4 计算一对电偶电压降 V

按公式 (4) 计算:

$$V_0 = IR + (\alpha_p - \alpha_n) (T_h - T_c)$$

把 3.3 文中已知数字代入式中,可计算得 $V_0 = 0.106 \text{V}$ 。

3.5 计算致冷工作面与空气的换热量 Q

丁基橡胶内胎施工工艺要求致冷堆的致冷工作面在室温(以 30°C 计)条件下表面上结霜不融化。从最为不利的条件考虑,即空气为横向流动,且流速为 $10 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,温度为 30°C ,要使致冷面温度保持在 0°C ,求此时致冷面与空气之间的换热量 Q :

$$Q = \alpha F \Delta t$$

式中 F ——致冷面面积 ($19.25 \times 10^{-3} \text{m}^2$);

Δt ——温差(以 30°C 计);

α ——平均换热系数, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 。

$$\alpha = \lambda N_u L^{-1}$$

式中 N_u ——努谢尔特效数。

$$N_u = 0.664 P_r^{1/3} Re^{1/2}$$

式中 R_e ——雷诺数;

P_r ——30℃空气普朗特数(0.701)。

$$R_e = vLv^{-1}$$

式中 v ——空气流速(10m·s⁻¹);

ν ——30℃空气运动粘度(16×10⁻⁶m²·s⁻¹);

L ——致冷面长度(27.5×10⁻³m)。

由此得

$$\begin{aligned}\alpha &= (0.664P_r^{1/3}\lambda/L)(vL/\mu)^{1/2} \\ &= (0.664 \times 701^{1/3} \times 2.67 \times 10^{-2} / 27.5 \\ &\quad \times 10^{-3}) \times (10 \times 27.5 \times 10^{-3} / 16 \\ &\quad \times 10^{-6})^{1/2} = 75.05 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1} \\ Q &= 75.05 \times 19.25 \times 10^{-3} \times 30 \\ &= 43.34 \text{ W}\end{aligned}$$

3.6 计算致冷堆电偶对数 N

3.6.1 致冷面及冷冻内胎面与空气的换热量的比较

当内胎接头处已冷冻到所需温度之后,其表面与空气的换热量 $q' = 45.56 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。这个换热量只是计算在致冷面上的换热量,但也须将内胎胶料的热传导作用导致与致冷面上接触的胶料温度下降而出现的换热量计算在内,故单位面积上总换热量

$$q'_z \approx kq'$$

式中 k ——换热系数 [$k = (2 \times 2\delta + B)/B$
 $= (4 \times 0.6 + 7)/7 = 1.343$]

得

$$\begin{aligned}q'_z &= 1.3434 \times 45.56 \times 10^{-3} \\ &= 61.19 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}\end{aligned}$$

冷冻面与空气的总换热量:

$$\begin{aligned}Q'_z &= q'_z F \\ &= 61.19 \times 10^{-3} \times 192.5 = 11.78 \text{ W}\end{aligned}$$

致冷工作面与空气的换热量

$Q = 43.34 \text{ W}$, 可见 $Q > Q'_z$

3.6.2 确定致冷堆电偶对数 N

由于 Q 大于 Q'_z , 所以应按 Q 确定致冷堆电偶对数。在 3.3 条中已计算得 $q_0 = 0.446 \text{ W}$, 故

$$N = Q/q_0 = 43.34/0.446 \approx 97 \text{ 对}。$$

考虑到致冷堆本体吸热与电偶对数的工艺摆布, 我们取 105 对。

3.7 计算内胎胶料冷冻所需时间 t

为确定致冷堆电偶对数 N' 的产冷量, 将室温下的内胎胶筒放在致冷面上, 计算将其表面冷冻至 0℃ 时所需的时间 t 。

3.7.1 计算 N' 对致冷电偶产冷量 $Q_{\text{冷}}$

$$\begin{aligned}Q_{\text{冷}} &= q_0 N' \\ &= 0.446 \times 105 = 46.83 \text{ W}\end{aligned}$$

3.7.2 内胎接头处降至工作温度所需的制冷量 A

(1) 接头处胶料的吸热量 A_1

$$A_1 = MdC_p \Delta t \quad (8)$$

式中 M ——接头处胶料被冷冻的体积, cm³;

d ——内胎胶料密度, Mg·m⁻³;

C_p ——内胎胶料比热, J·(g·°C)⁻¹;

Δt ——温差(由室温冷冻至 -10.3℃ 时的温差为 40.3℃)。

$$M = BL\delta$$

式中 B ——冷冻胶面宽度, cm;

L ——冷冻胶长度, cm;

δ ——内胎胶厚度, cm。

$$M = 7 \times 27.5 \times 0.6 = 115.5 \text{ cm}^3。$$

把 $M = 115.5 \text{ cm}^3$, $d = 1.125 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $C_p = 2.09 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$, $\Delta t = 40.3^\circ\text{C}$ 代入式(8)中得

$$\begin{aligned}A_1 &= 115.5 \times 1.125 \times 209 \times 40.3 \\ &= 10.94 \times 10^3 \text{ J}\end{aligned}$$

(2) 接头处胶料在冷冻时的换热量 A_2

$$\begin{aligned}A_2 &= q' Ft \\ &= 45.56 \times 10^{-3} \times 192.5 t = 8.77 t \text{ J}\end{aligned}$$

(3) $A = A_1 + A_2 = 10.94 \times 10^3 \text{ J} + 8.77 t \text{ J}$

(4) 冷冻时间 t 的计算

$$\begin{aligned}Q_{\text{冷}} \cdot t &= A_1 + A_2 \\ t &= 10.94 \times 10^3 / (46.83 - 8.77) \\ &= 287.6 \text{ s} \approx 4.8 \text{ min}\end{aligned}$$

按操作工艺要求内胎接头处冷冻时间应小于 5min, 因此 4.8min 可以满足要求。

4 致冷堆排列及额定数的确定

4.1 冷却水箱尺寸的选择

冷却水箱尺寸(长×宽×高)为 27.5cm×7cm×1.6cm,组成 27.5×7cm² 的致冷工作面。

电偶采用 7 排×15 对串联方式联接,电偶之间采用(长×宽×厚)15mm×7mm×1mm 的紫铜板联接,以达到导电换热的目的。

4.2 电源电压工作电流消耗功率的选择

电源电压 $V = NV_0$

$$= 105 \times 0.106 = 11.13\bar{V}$$

工作电流 $I = 18.2A$

消耗功率 $P = VI$

$$= 11.13 \times 18.2 \approx 203W$$

为考虑因季节性室温的变化、水温变化和节约能源,故将电源电压按强、中、弱分级,分别为 11.5V, 9V, 8V。

5 电路设计

电路设计参见图 2 及附表,主要设计有:

①采有三相 380V 交流电源;②选用 380V/9.5, 7.5, 6.7V/250W 三相变压器;③采用三相全波硅整流;④用改变变压器一次绕组匝数达到强、弱致冷档次;⑤采用微压液流继电器作断水、断电保护器;⑥采用预埋钮扣式热继电器作过温断电保护器。

6 计算冷却水用量

根据热平衡原理,产冷量与冷却水带走的热量相平衡。致冷堆的总产冷量 Q 为 46.83W,折合为 $16.94 \times 10^4 J \cdot h^{-1}$ 。

按出入水温差为 2℃计,则每小时需要的冷却水量为

$$16.94 \times 10^4 (J \cdot h^{-1}) / \{4186 [J_0 (L \cdot ^\circ C)^{-1}] \cdot 2^\circ C\} \approx 20L \cdot h^{-1}$$

附表 电气控制原理图中元件名称与型号

序号	代号	名称	型号	数量
1	LD	致冷堆	特制	1
2	B	整流变压器	380V/9.5, 7.5, 6.7V (400VA)	1
3	D	整流二极管	2CZ50A/100V	6
4	CJ	交流接触器	CJ10-40A	2
5	A	直流电流表	44C ₂ -50A	1
6	V	直流电压表	44C ₂ -20V	1
7	FL	分流器	50A	1
8	QA, TA	控制按钮	LA ₂	1
9	ZD	指示灯	XD-12V(220V)	3
10	RD	螺旋保险器	60A, 15A	5
11	DK	胶盖开关	3P-15A	1
12	BK	钮子开关	KN ₃ -13	1
13	DQ	整流桥堆	ICQ1A/50V	1
14	C	电解电容器	2200μF/16V	1
15	CW, DS	小型继电器	JRX-13F-12V	2
16	DL	交流电铃	Φ51-220V	1
17	YL	液流继电器	特制	1
18	RK	温度继电器	钮扣式	1

7 结论

半导体冷冻机与传统机械制冷机所不同之外,就是前者的致冷方式是靠电子运动来传递能量的。相比之下,有以下优点:

(1)无机机械传动的噪音和机械磨损;

(2)无冷冻传递管路和管路能量损耗,冷冻速度快(约 3—5min,而机械冷冻约 40min 以上),冷冻面无融化水,可提高产品接头质量;

(3)不需冷冻液和压力容器设备,因而无空气污染,生产操作安全有保障;

(4)因采用小面积有效部分致冷,故可单机使用,随用随开,可大量节省电能。

本设计合理、可行,对提高丁基橡胶内胎质量起到了重要作用。

致谢 本设计承蒙桦林橡胶厂许玉琢高级工程师指导,在此特致谢意。

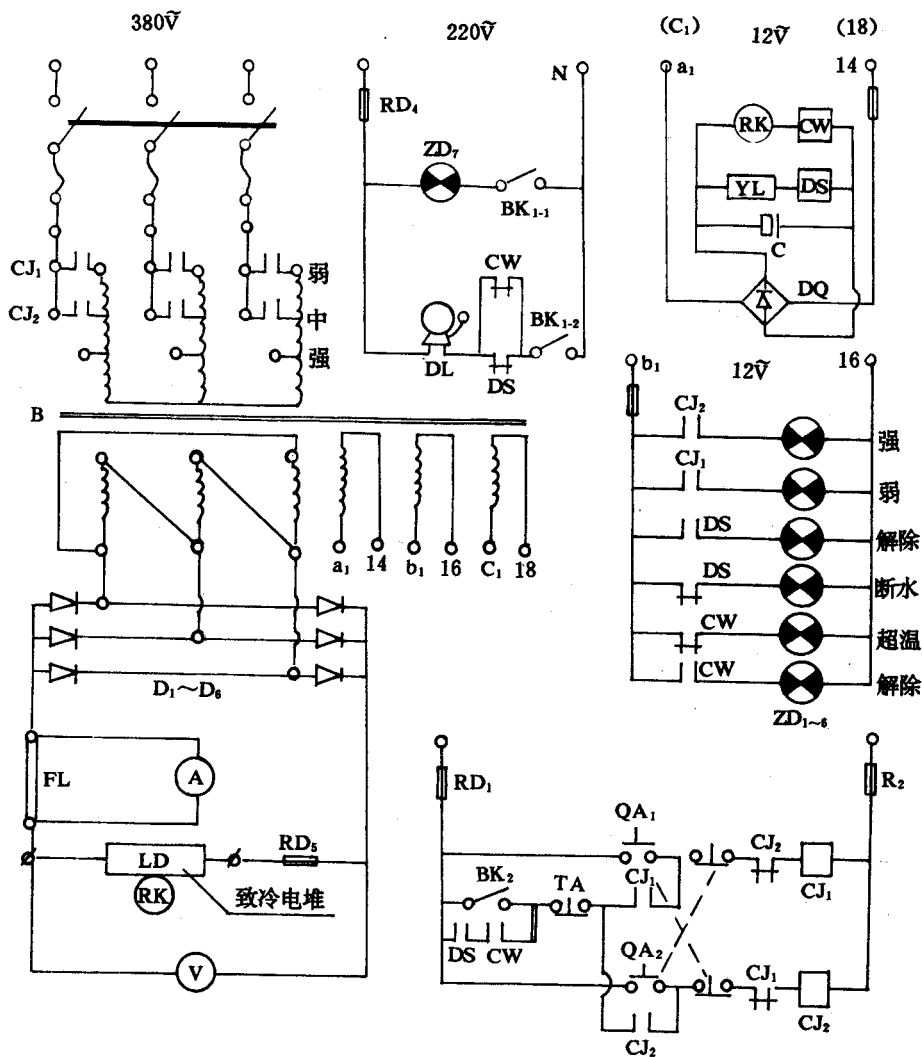


图 2 半导体致冷接头机电气控制原理图

当使用高档电源时将 $a_1, 14$ 与 $c_1, 18$ 调换