トリウム-タンゲステン繊維の炭化に関する研究 (第2報)炭化度と電気抵抗及び作用温度との関係*

川 上 陸 水** 小笠原 直 幸***

M. Kawakami and N. Ogasawara : Study on Carburization of Th-W Filament (2nd Report) Cold Electric Resistance and Operating Temperature by Carburization. From the result in the 1st report, we found that it was suitable to adopt the range of 2.45~3.16% as the carbon content in the carbide layer. Theoretically, we led the following formula representing the relation between the degree of carburization (S) and the ratio of increase in cold electric resistance (λ),

$$\lambda = \frac{1}{1 - S \left(1 - \frac{\rho_W}{\rho_{W_2C}} \right)} \dots \dots \dots (1)$$

where ρ_W and ρ_{W_2C} are the cold electric specific resistances in the uncarburized core and the carburized sheath.

If the carbide layer is all of W_2C composition, the value of ρ_W/ρ_{W_2C} is 0.07, but ρ_W/ρ_{W_2C} is experimentally about 0.3. The operating temperature of the carburized filament is not directly

** 東光電気株式会社研究室

*** 東京都立大学工学部

* 昭和24年11月本會名古屋大會に發表

determined, because the total emissivity of W_2C has not been correctly found heretofore, so that using the actual data in the transmitting tube working, the following formula was theoretically determined.

$$R_{\theta} = f_{\theta} \frac{1 - S \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_{W_2C}} \right)}{1 - S \left(1 - \frac{\rho_{W_2C}(T)}{\rho_{W_2C}(T)} \right)} \quad (2)$$

where R_{θ} f_{θ} is either the ratio of the hot-to-cold electric resistance in a Th-W filament carburized, or not respectively, and $\rho_{W_2C}(T)$, ρ_{W_2C} is ρ_w, ρ_{W_2C} at operating temperature T respectively. At any time, the degree of carburization is obtained from the formula (1) by measuring the cold electric resistance and the operating temperature of the carburized Th-W filament is known from the formula (2). The expansion of filament by carburization is increasing as ThO_2 content in W is decreasing, but the amount is negligibly small.

(Received December 10, 1949)

(1) 常温抵抗増加率と炭化度との関係

炭化した Th-W の炭化度は常温抵抗増加率で表わすのが普通であるが、この値が冶金學的に見て果して如何様な意味を持つているのか、又これを基として計算した諸量の精度はどの程度のものか等を次に論ずる。既に第1報で定義したように炭化度 S は次式で表はされる。

$$S = \frac{s_{W_2C}}{A} \quad (1)$$

但し s_{W_2C} : 横断面における炭化層の面積

A : 横断面における總面積

今炭化部分および Th-W の常温抵抗を夫々 ρ_{W_2C} および ρ_w , 又炭化前後の単位長さ當りの抵抗を夫々 λ_w および λ_{W_2C+W} とすると次式が得られる。

$$\lambda_w = \rho_w \frac{1}{A} \quad (2)$$

$$\lambda_{W_2C+W} = \frac{1}{\frac{s_{W_2C}}{\rho_{W_2C}} + \frac{A - s_{W_2C}}{\rho_w}} \quad (3)$$

今炭化前後の常温抵抗増加率を λ とすると

$$\lambda = \frac{\lambda_{W_2C+W}}{\lambda_w} = \frac{A}{\rho_w} \cdot \frac{\rho_w \rho_{W_2C}}{\rho_{W_2C}(A - s_{W_2C}) + \rho_w s_{W_2C}} \quad (4)$$

(4) 式に (1) 式を代入して

$$\lambda = \frac{1}{1 - S \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_{W_2C}} \right)} \quad (5)$$

$$1 - \frac{\rho_w}{\rho_{W_2C}} = f \text{ と置けば}$$

$$\lambda = \frac{1}{1 - Sf} \quad (6)$$

$$\text{又は } S = \frac{1}{f} \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (7)$$

となる。(6) または (7) 式より λ と S との関係が得られる筈であるが、Andrews の言う様に炭化層を完全な W_2C layer と考へ Carbon 含有量を 3.16% 即ち $\rho_w/\rho_{W_2C} = 0.07$ 従つて $f=0.93$ を採用するか、最近 Hörsting の指摘した様に脱炭状態にある $C=2.45\%$ として $\rho_w/\rho_{W_2C} = 0.25$ 従つて $f=0.75$ を採用すべきかの問題となる。Fig. 1 で曲線 $f=0.93$ は前者を、 $f=0.75$ は後者を夫々示す。この曲線上に種々の炭化度を得る様に織條を炭化し充分精密

に s_{W_2C} および A を測定してこの曲線上に書込んで見ると、圖より明らかな様に一般には $f=0.75$ の方に多く来る様であるが普通の使用範囲であるところの $\lambda=140\%$ 以上

Fig. 1 Relation between Degree of Carburization (S) and Ratio of Increase in Cold Electric Resistance (λ). (Marks $\odot$ are values measured from microscopic investigation).

のところでは兩曲線の圍む範圍に分布していると考えた方が妥當である。これは前報で指摘した様に織條の不均一炭化の影響も當然考慮しなければならないが、吾々の炭化度を測定した點は織條支持部より 15 mm 乃至 20 mm の距離のところであらう均一炭化領域の始まる部分と考えられる。従つて正確には end cooling の問題があるから、實測値は $f=0.93$ の曲線に近寄るわけである。また一方後に問題となる使用状態において脱炭の問題が大きいから當然 $f=0.75$ の曲線が基準となる。斯様に考えれば吾々はこの炭化度と冷抵抗比との関係はこの兩曲線に圍まれる範圍を指摘することに依つて實驗的にも理論的首肯出来ることになる。従つて不均一炭化の甚しいもの程この曲線の範圍外に出た値を取るようになる。各種炭化條件を調整して炭化した Data の一例を Table 1 に示す。

Table 1

R'_1 (Ω)	E_{f1} (V)	E_{f2} (V)	R_1 (Ω)	E'_{f1} (V)	I'_{f1} (A)	E'_{f2} (V)	I'_{f2} (A)	P_{H_2} (mmHg)	t (sec)	R_2 (Ω)	λ (%)	S (%)
0.123	21	21	0.117	21	17	22.0	16.5	25	10	0.143	122	24.48
0.126	21	21	0.120	21	17	22.0	16.5	25	20	0.158	131	36.80
0.124	21	21	0.117	21	17	23.5	16.0	25	30	0.180	154	49.02
0.115	20	20	0.109	21	17	22.0	16.5	20	10	0.133	122	28.43
0.129	21	21	0.119	21	17	23.0	16.0	20	20	0.150	126	34.45
0.127	21	21	0.121	21	17	24.0	15.8	20	30	0.197	163	51.14
0.117	20	20	0.113	21	17	22.0	16.5	15	10	0.149	132	36.80
0.129	21	21	0.119	21	17	24.0	16.0	15	20	0.170	143	47.15
0.123	21	21	0.115	21	17	25.5	16.0	15	30	0.227	197	66.71

R'_1 & R_1 ; Cold resistances before and after flashing.

E_{f1} & E_{f2} ; 1st & 2nd flashing voltages in 17 Amp. current.

R_1 & R_2 ; Cold resistances before and after carburization.

E'_{f1} & I'_{f1} ; Voltage & current at beginning of carburization.

E'_{f2} & I'_{f2} ; Voltage & current at end of carburization.

P_{H_2} ; Pressure of hydrogen gas during carburization (in mmHg).

t ; Time of carburization in second.

λ ; Increased ratio (%) of cold resistance after carburization.

S ; Degree of carburization in % measured by microscope.

Notes ; Total length of Th-W filament=7 cm.

Diameter of Th-W filament=0.319 mm.

Resistance of supporting material=0.005 Ω .

(2) 炭化による繊維の膨脹

Fig. 2 Radius Expansion on Th-W Filament after Carburization.

以上の論議においては炭化に依る半径方向の繊維の膨脹は考慮しなかつたが、膨脹の程度とそれに依る冷抵抗の變化を一應知つて置く必要がある。今

Fig. 2 において r_0 を炭化前の繊維の半径、 r_1 を炭化後の半径、 d を炭化層の厚さとする

$$r_1 = \alpha l + r_0 \dots \dots \dots (8)$$

$$\text{但し } \alpha = 1 - \frac{1}{\frac{\Delta_{Th-W}}{\Delta_{W_2C}}}$$

となる。ここに Δ_{Th-W} および Δ_{W_2C} はそれぞれ Th-W および W_2C の比重を表す。

今膨脹を考慮した時眞の炭化度 S_1 は

$$S_1 = \frac{d}{r_0} \cdot \frac{\frac{d}{r_0} (2\alpha - 1) + 2}{\left(1 + \alpha \cdot \frac{d}{r_0}\right)^2} \dots \dots \dots (9)$$

で表わされ、また膨脹を考えなければ $\alpha = 0$ であるから、このときの炭化度 S_0 はつぎのようになる。

$$S_0 = \frac{d}{r_0} \left(2 - \frac{d}{r_0}\right) \dots \dots \dots (10)$$

偖て膨脹を考慮したときと、しないときでの炭化度の差異を知るため $\frac{d}{r_0} = 0.1$ 即ち炭化度約 19% の時に就いて S_1/S_0 の値を計算してみると Table 2 の様な結果になる。即ち ThO_2 content が増大するにつれて S_1/S_0 の値は 1 に近づく。従つて吾々の場合には膨脹を考慮しなくても差支えないと云える。

Table 2 Expansion of Th-W Filament after Carburization.

Thorium Content (ThO_2 %)	Density of Th-W (Δ_{Th-W})	α	$\left(\frac{S_1/S_0}{r_0} = 0.1\right)$
0	19.06	0.097	0.9909
1.0	18.83	0.087	0.9919
1.5	18.73	0.082	0.9924
2.0	18.47	0.069	0.9934

(3) 高度・常温抵抗比と温度との関係曲線

Th-W の設計圖表は Dailey⁽¹⁾、平島氏⁽²⁾等が提案してゐるが、これはすべて炭化した Th-W の輻射能 δ の値を純 W の 1.2 倍として算出しているのであるが、諸家の論文の炭化 Th-W の δ が純 W の 1 乃至 2 倍に亘つてまちまちであること、また既に吾々が Carbide layer の表面状態が炭化直後においても相當異つていると指摘したこと等から δ をある値に假定して計算するよりむしろ他の適當な方法を考究する必要がある。また前報においても一寸觸れた様に δ の値の正確でないものを如何に精密に温度を實測しても、その温度そのものの精度とは別個に對象物の輻射能から来る制限の爲無意味となる。吾々はこの見地から抵抗比より温度を逆算の方が妥當であり且つ實用的であるとして計算を行つた。既に述べた様に (3) 式を用いて常温抵抗として

$$\lambda_0(W_2C + W) = \frac{\rho_W \rho_{W_2C}}{\rho_{W_2C} \delta_{W_2C} + \rho_{W_2C} (1 - \delta_{W_2C})} \dots \dots \dots (3')$$

同様に炭化 Th-W の高温抵抗値 $\lambda_T (W_2 + W)$ として

(1) W. E. Dailey, Electronics Jan. (1948), 107.

(2) 平島, 電氣學會誌, 昭和 17 年 4 月第 20 回連合大會豫稿, P. 186.

$$\lambda_{T(W_2C+W)} = \frac{\rho_{W(T)} \rho_{W_2C(T)}}{\rho_{W(T)} s_{W_2C} + \rho_{W_2C(T)} (A - s_{W_2C})} \dots (11)$$

が得られる。但し $\rho_{W(T)} \rho_{W_2C(T)}$ は何れも高温 ($T^\circ K$) におけるそれぞれの比抵抗を示している。

(3)' および (11) 式から高温-常温抵抗比 R_θ は

$$R_\theta = \frac{\lambda_{T(W_2C+W)}}{\lambda_{\theta(W_2C+W)}} = \frac{\rho_{W(T)}}{\rho_W} \cdot \frac{\rho_{W_2C(T)}}{\rho_{W_2C}} \cdot \frac{\rho_{W_2C} s_{W_2C} + \rho_{W_2C} (A - s_{W_2C})}{\rho_{W(T)} s_{W_2C} + \rho_{W_2C(T)} (A - s_{W_2C})} \dots (12)$$

となり更に (12) 式に (1) 式を代入して

$$R_\theta = \frac{\rho_{W(T)}}{\rho_W} \cdot \frac{1 - S \left(1 - \frac{\rho_W}{\rho_{W_2C}} \right)}{1 - S \left(1 - \frac{\rho_{W(T)}}{\rho_{W_2C(T)}} \right)} \dots (13)$$

を得る。次に (13) 式の数値計算であるが $\rho_{W(T)}/\rho_W$ は Langmuir の與えた表より計算できるが ρ_W/ρ_{W_2C} および $\rho_{W(T)}/\rho_{W_2C(T)}$ の値を計算するのに如何なる数値を用いるか、問題である。前に述べた様に炭素含有量 3.16% の時と 2.45% の時に分けて別々に計算した。

例えば温度 2000°K の時、 $C=3.16\%$ とすれば

$$R_{\theta 1} = 10.33 \left(\frac{1 - 0.93S}{1 - 0.5045S} \right) \dots (14)$$

となり $C=2.45\%$ とすれば、 $W-C$ 系においても抵抗とその温度係数との関係が Mathienson の法則に従うものと假定して

$$R_{\theta 2} = 10.33 \left(\frac{1 - 0.75S}{1 - 0.2427S} \right) \dots (15)$$

となり計算出来る。

(14) および (15) 式から

$$\frac{R_{\theta 1} - R_{\theta 2}}{10.33} = P = \frac{S(0.08 - 0.15S)}{(1 - 0.5045S)(1 - 0.2427S)} \dots (16)$$

Fig. 3 Difference between 3.16% and 2.45% C Curves at 2000°K in $R_\theta-T$ Diagram.

として P と S との関係を調べてみると Fig. 3 のごとく炭化度が約 50% のところで $C=3.16\%$ と 2.45% のときの関係が逆になって来る。このことを考慮して、炭化度 S を Parameter とし高温-常温抵抗比と作用温度との関係曲線を求めると Fig. 4 の様になる。既述した $\rho_{W(T)}/\rho_{W_2C(T)}$ の値には Andrews, Dushman, Becker および

Fig. 4 Relation between Ratio of Hot-to-Cold Electric Resistance (R_θ) and Operating Temperature (T) of Carburized Th-W Filament at Various Degrees of Carburization (S).

Barnes⁽³⁾ の論文を参照した。この図表に依つて吾々は實際の作業を行うことが可能である。即ち Fig. 1. に依つて λ の値から S を知り、つぎに Fig. 4 に依つて、この S に就て R_θ の實測から温度を知り、更に進んで繊維の加熱電流、電子放射を豫測し得て、Th-W 繊維の設計が出来るわけである。Fig. 4 の曲線は實測と大體一致するが尙多少温度が低い様な結果になっている。これには二つの原因が考えられる。一つは Carbide layer の抵抗の温度係数の炭素含有量に依る變化には電気抵抗の變化が直線的であるところから Mathienson の法則と同様な假定が成立するとしたこと。他の一つは重要な問題であつて、 R_θ から温度を求める場合、繊維の End cooling を考慮していないことである。この End cooling の補正は式の上からは $\lambda_{\theta(W_2C+W)}$ の値を數%小さくすることになるが、この End cooling が Langmuir が純 W に就て詳細に求めた時と同様な状態になっているかは疑問であるから、更に炭化度の方から見當して完全な $R_\theta-T$ 曲線を得る様研究を進めている。

(3) W. T. Barnes, J. Phys. Chem., **33** (1928) 688.