ランタン，イットリウム，セリウム入り各タングステン電極によるアーク特性の比較研究

—ガス・タングステン・アーク電極の研究(1)—

松田福久**, 牛尾誠夫**, 熊谷達也***

Comparative Study on Fundamental Arc Characteristics with La-, Y-, Ce-Oxide Tungsten Electrodes —Study on GTA Cathode (1)—

by Fukuhisa Matsuda**, Masao Ushio**, Tatsuya Kumagai***

A comparative study has been made of characteristics of gas-tungsten-arc (GTA) cathodes, consisting of tungsten mixed with a small quantity of lanthanum-, yttrium-, cerium-, thorium-, zirconium- and magnesium-oxides respectively and pure tungsten. Arc starting performance, arc pressure, change in shape due to heavy loading are compared in DCEN polarity, and it is shown the superiority of La-oxide, Y-oxide and Ce-oxide electrodes in above characteristics.

Key Words: Tungsten, Tungsten oxide electrode, GTA welding, Refractory metal, Non-consumable electrode

1. 緒 論

ティグ溶接やプラズマ溶接にもちいられる，いわゆる，ガス・タングステン・アーク（GTA）では，タングステン電極の形状や材質，および，その近傍のアーク電流分布がアークの電気的特性や，陽極あるいは母材への熱輸送特性などに強い影響を与える。

従来，このタングステン電極としては，酸化トリウム（トリウム； ThO_2 ）を数%含有させたタングステンが広く用いられてきた。これは，タングステンにトリウムを添加することによって，電極からの熱電子放出特性を良好にし，アーク放電電極としての性能の向上を図ったものである。

しかしながら，近年，ロボット溶接に代表されるような溶接の自動化や，高度に精密な溶接の要求が高まるにつれて，トリウム入りタングステン電極の性能一とくに，安定性や耐消耗性一では不十分になりつつあり，より優れた性能を有する電極の開発が期待されている。

また，トリウム（Th）は放射性物質であり，その取り扱いには法的規制をうける。その管理のわずらわしさのため，国内でのトリウム入りタングステン電極の生産は次第に積極性を失いつつある。

このような背景のもとに，著者らは，昭和58年末より新しいタングステン電極の開発準備を始め，昭和60，61年度の文部省科学研究補助金を得て，種々の酸化物を添加したタングステン電極を試作し，その特性を調査・検討するとともに，さらに優れた性能をもつ新しい電極の開発を目的として研究を進めている。本報告は，現在までの研究によってえられた，試作タングステン電極を対象とした種々の実験結果とその検討，および，得られた新しい知見について述べる。

トリウム入りタングステン電極の開発は真空管のフィラ

メント陰極としてのトリウム入りタングステンの発明¹⁾から来るとされているが，アーク放電用陰極は真空管用電子放出材料と比較すると次のような点でその使用状況が異なっている。すなわち，(1)アーク放電用電極は10 eV程度の運動エネルギーのイオン衝撃を受ける。(2)一般的に大電流（数 A—数 kA），大電流密度（ $10^6 \sim 10^8 \text{ A/m}^2$ ）で用いられる。(3)かなりの高温（2000 K—3500 K）になる。(4)酸化性雰囲気中で用いられることもある。

トリウム入りタングステン電極がアーク放電に初めて適用され，その結果が公表されたのは1951年である²⁾。米国 GE 社では，純タングステン電極をもちいたアークの起動性および維持安定性を改善するためタングステンとトリウムの混合焼結電極を試作しその性能を実験検討した。添加されたトリウムの量は1～50%であった。アークの起動時の挙動を観察した結果15%以上を混入しても，ほとんど結果に差が生じないこと，1%ではトリウムの蒸発消散が起ること，5%程度の添加がその起動性改善における効果を最も表わすこと，などが示された³⁾。

我が国におけるアーク放電用電極の研究は安藤，西川等によるもの以外には殆どない。彼らはアーク放電中の写真撮影を行ない，乾板の黒化度から電極表面温度を推定した⁴⁾。しかし，この測定では電極先端を覆うアーク光の影響はさけられない。とくにその影響を除去する工夫はされておらず，この結果にたいする信頼度は低いと考えられる。

2. アーク放電用電極に要求される条件と試作電極

アーク放電を構成する要素は，電極（物質，形状），作動ガス（組成，圧力），幾何学的配置，電源系であり，これら四種の要素が，アークプラズマの温度場，流体場，熱輸送に支配的なパラメータを決定する。特に，電極は，電流の連続性を条件として，固体とプラズマ気体が接する領域であり，プラズマの性質に強く影響をあたえる。アークの安定性は，アークの電極領域の物理的・化学的現象の安定性と，電極およびその近傍のアーク電流が

*原稿受付 昭和62年5月20日 昭和61年度春季全国大会で発表

**正 員 大阪大学 Member, Osaka University

***学 生 員 大阪大学 Student Member, Osaka University

Fig. 1 Temperature for thermionic emission at various current density levels. Points show boiling point and work function of pure elements

誘起するプラズマ流が担っており、その電極領域の諸現象には、電極物質の高温での挙動あるいは熱的状态が支配的に影響する。したがって安定なアーキ放電を維持するためには、陰極として、比較的広範囲にわたって高温定常状態を形成し、必要とされるだけの電子放出を行なうことのできる、いわゆる、熱陰極が用いられる。

一般に高温の状態におかれた物質からは電子が放出され（熱電子放出）、アーキ放電の熱陰極は高温の状態になった陰極表面からのこのような熱電子放出で電流の連続性を得ている。アーキの熱陰極では通常 $10^6 \sim 10^8$ A/m² の陰極電流密度が必要と考えられているが、この電流密度の殆どを熱電子放出でまかなうとすれば、どのような物質においてそれが可能となるだろうか？

Fig. 1 は、これを相補的に説明する図である。熱陰極から放出される電子放出電流は Richardson-Dashman の式で与えられ次のように表わされる。

$$J = AT^2 \exp\left(\frac{-e\phi}{kT}\right)$$

ただし、 A ：定数、 k ：Boltzman 定数、

J ：放出電流密度、 e ：電子電荷

T ：温度、 ϕ ：仕事関数。

仕事関数-温度面上で、この電流密度をそれぞれ 10^6 、 10^7 、 10^8 A/m² とする三本の曲線を描き、その上に種々の物質の沸点と仕事関数を重ねると Fig. 1 になる。例えば、Cu では、陰極電流密度 10^8 A/m² を得るためには沸点以上の陰極動作温度が必要とされるので、熱陰極にはなり得ないことが推定される。一方、タングステンのような高沸点材料であれば必要な陰極放出電流密度を得るためには融点近傍あるいはそれ以上の温度が必要とされることもわかる。また、仕事関数の低い物質ほど、必要とされる陰極動作温度が低いことが示されている。

アーキ放電の環境は必ずしも真空管のなかのように清

Table 1 Tungsten-oxide electrode produced

Electrode material and oxide content			
Pure - W		(Ternary)	
(Binary)			
ThO ₂ - W	2 (%)	La ₂ O ₃ -Y ₂ O ₃ - W	1 - 1 (%)
MgO - W	2	La ₂ O ₃ -Y ₂ O ₃ - W	1.5-0.5
ZrO - W	2	La ₂ O ₃ -CeO ₂ - W	1 - 1
ThO ₂ - W	2	Y ₂ O ₃ - CeO ₂ - W	1 - 1
La ₂ O ₃ - W	1, 2	Y ₂ O ₃ - CeO ₂ - W	1.5-0.5
Y ₂ O ₃ - W	2, 3	Y ₂ O ₃ - CeO ₂ - W	0.5-1.5
CeO ₂ - W	2		

浄ではない。とくに溶接の場合作動ガスは通常アルゴンやヘリウムのような不活性ガスが用いられるが、しばしば、大気の巻き込みが生じ電極は酸化性のガスにさらされることになる。しかも、アーキ放電の陰極はプラズマイオンの衝撃をうける。

トリウム入りタングステンとは、いわば、タングステン粉末にトリウムの酸化物粉末を混入し作成したものである。その機構は必ずしも明らかではないものの、アーキ放電の陰極としてイオンの衝撃にさらされるような状況の下で実効的な仕事関数が低くその電子放出は純タングステンに比較して極めて安定している。

以上のような状況を考慮すれば、動作中に溶融変形を起こさない、電子放出能力の優れたしかも安定した性能を保持できる電極を構成するには、基本的にタングステンのような高沸点金属をもちい、それに、仕事関数の低く、しかも、酸化されることによって、その性質を大きくは変化させない物質を添加して、実効的な仕事関数の低下が期待されるようにする方法が最も有効な方法であると考えられる。以上のような考察の下に試作した各種タングステン電極を Table 1 に示す。電極径は1.6, 2.4, および、3.2 mm の三種で先端形状は主として45度に研磨して用いている。

3. 特性比較実験

アーキ放電の電極（陰極）として要求される性能は主として次のようなものであろう。

- 1) 点弧容易にして確実なこと。陰極点の這い上がり現象などを生じないこと。
- 2) 動作中の溶融変形や消耗などによるアーキ特性の変化を生じないこと。
- 3) アークの安定性や制御性に優れていること。
- 4) 取り扱いの容易なこと。

以上の諸条件にたいする検討、および、生じるアーキの特性についての各種タングステン電極での比較実験を行なった。

3.1 電流電圧特性

測定されたアーキの電流-電圧特性の例を Fig. 2 に示す。陽極は水冷銅板である。

容易に予想されるように純タングステン (P-W) 電極と酸化物入りタングステン電極では明らかに異なっている。P-W 電極は、低電流域で他の電極と比べ非常に高い電圧を有する。一方、他の二元系の酸化物入りタングステン電極は、50 A より高い電流域で P-W 電極より若干低い値を示し、正抵抗特性を示している。また、三元

Fig. 2 Voltage-current characteristics

系電極は、二元系電極と同様の傾向を示している。この測定結果はよく知られているように酸化物入りタングステン電極先端部の溶融変形が P-W 電極に比較してすくないことを示している⁴⁾。

ジルコニア入りタングステン (ZrO_2 -W) や P-W では、測定中の電極の溶融変形が著しく誤差が大きくなる。

3.2 アーク起動性

点弧の容易さを評価する方法として、ここでは高周波点弧による点弧可能な最小の開路電圧 (Open Circuit Voltage, O.C.V., 無負荷電圧) の比較を行なった。

広く一般に使用されている高周波点弧回路の一部を変更して、開路電圧を変化させ、10秒間の高周波印加中に、アークの持続放電に移行するか否かを観察した。

タングステン陰極、水冷銅陽極間にあらかじめ設定する開路電圧を18, 22, 24, 36 V と変化させ、それぞれの設定値でそれぞれ30回の点弧を試み、通常の持続アーク放電に移行したものを Self-sustaining arc, アークに移行しても陰極点の這い上がりが生じたり、消弧したりするものを Non self-sustaining arc, 全くアーク放電に移行しないものを Failure, としてヒストグラムにしたものを Fig. 3 に示す。

これによると、P-W と MgO (2%)-W のアーク起動性が明らかに劣っている。たとえば、O.C.V. が 36 V の時、これら二種の電極ではほとんど正常なアークに移行していないのに対し、それ以外の電極では逆にほとんど正常なアークに移行している。一方、二元系電極の中で最も優れたアーク起動性を持っている電極が La_2O_3 (2%)-W である。O.C.V. が 22 V, 24 V の場合のアーク起動回数を ThO_2 (2%)-W, Y_2O_3 (2%)-W などと比べると、 La_2O_3 (2%)-W は、安定なアークに移行した割合が多いことがわかる。さらに、三元系電極に注目してみると、若干の差はあるもののアーク起動回数は、 La_2O_3 (2%)-W とほぼ同程度であるとみなすことができる。

O.C.V. によるアーク起動性では必ずしも起動しやすさの評価として十分ではないと考えられる。そこで、1秒間の点弧、15秒間の休止というサイクルを100回連続して繰り返し、高周波のスイッチオン後正常アーク放電に移行する迄の時間の測定を行ないその分布を検討した。この測定では、市販のインバータ TIG 電源を用い

Fig. 3 Arc starting characteristics evaluated by U.C.V. test

ており、無負荷電圧 (O.C.V.) は 90 V、アーク電流は 30 A に設定し、1 秒経過してもなお正常アークに移行しない場合は NG として処理してある。Fig. 4 にその結果を示すが、 La_2O_3 - Y_2O_3 -W 系がやや良好な特性をしめしている。しかし、多数回起動にともなうアーク起動性の劣化は全ての電極で多少とも生じており、それらは NG の回数に表われている。

3.3 アーク圧力

各電極について、先端角を45度に研磨し、半導体圧力変換器を 1 mm ϕ の小孔を有する水冷銅陽極に取りつけ、陽極側のアーク圧力を測定した結果を Fig. 5 に示す。

いずれも、ほぼガウス分布に近い曲線を示すが、P-W, ZrO_2 -W が全体的に低い圧力を示す。また、 Y_2O_3 (3%) -W CeO_2 (1%) -W, La_2O_3 (2%) -W は、ほぼ同程度のアーク圧力を示しているが、 ThO_2 (2%) -W は、それらよりやや低い値を示している。さらに、三元系電極のアーク圧力は、 La_2O_3 (2%) -W のものとはほぼ同程度である。

Fig. 6 に電極先端形状とアーク圧力の関係を示す。先端を少し切り落としただけで、アーク圧力が非常に減少することがわかる。たとえば、先端の flat な部分を、1 mm ϕ にするだけで、アーク圧力がおよそ50%減少している。したがって、Fig. 5 で P-W 電極での圧力が低くなるのは、電極先端部の溶融変形によって先端形状が平

坦に近づいたことが主要因であると考えられる。

Fig. 7 に、アーク圧力の電流依存性を示す。さらに、Fig. 5 で示した Y_2O_3 -W, CeO_2 -W, La_2O_3 -W および三元系電極と ThO_2 -W のアーク圧力の差異は、電流値が 150 A 以上ではっきりと認められ、電流値の増加と共に差が広がっている。さらに、P-W 電極は、75 A あたりからすでに酸化物入り電極よりも低い値を示し、300 A では La_2O_3 -W などの電極に比べておよそ半分の圧力値となっている。

3.4 電極溶断現象

アーク電流を非常に大きくするとタングステン電極は陰極部と冷却部 (コレットと接する部分) との中間で溶断する。これは陰極部では電子放出のために冷却効果があり、したがって、両端に冷却部を有する、ジュール加熱されているタングステン棒とおなじ状況が生じるためであると考えられる。したがってこの溶断電流は電極の電気伝導度と融点に最も強く依存するとかんがえられ、電極の最大許容電流値を決定する。1.6 mm ϕ の電極の溶断電流値の測定結果を Table 2 に示す。結果は、190~200 A であり、ほとんど差異がない。これは、これらの電極の高温抵抗に殆ど差異がないためであると思われる。

3.5 アーク放電と電極先端部の変化

電極径 1.6 mm を用いて 180 A、1 時間の放電を行なった後の電極先端の形状の一例を Fig. 8 に示す。この

Fig. 4 Arc starting characteristics evaluated by repetitive arc starting test

Fig. 5 Arc pressure distribution measured at anode

電極径での溶断電流は約 200 A であり、採用した条件はかなり苛酷な条件に相当する。また、Fig. 9 には同様に電極内部の組織変化の一例を示す。

結果は、 La_2O_3 (2%) - W, Y_2O_3 (2%) - W, CeO_2 (1%) - W などに殆ど形状の変化が見られないのに対し、 ThO_2 (2%) - W, ZrO_2 (2%) - W, MgO (2%) - W では先端部の溶融変形や内部の気孔の発生がみられる。また、三元系電極は、先端部の形状の変化もほとんどなく La_2O_3 (2%) - W などと同様の形状を保っていた。

電極の動作温度の差を推定するために、熱電対によ

Table 2 Current carrying capacity in appropriate extension

Electrode material	Current maximum
Pure - W	200 A
ThO_2 (2%)-W	195 A
La_2O_3 (1%)-W	200 A
La_2O_3 (2%)-W	205 A
Y_2O_3 (3%) -W	190-195 A
CeO_2 (1%) -W	200 A
CeO_2 (2%) - W	200 A

Fig. 6 Effect of truncated diameter of electrode on maximum pressure in argon gas

Fig. 7 Relationship between maximum arc pressure and arc current for various electrode

Fig. 8 Appearance of electrode shape after long term operation with high current density

Fig. 9 Change in microstructure of cross-section of electrode after heavy loading

て陰極の近傍の電極温度の測定をおこなった。その結果を Fig. 10 に示す。あきらかに ThO₂-W に比較して他の CeO₂-W, La₂O₃-W, Y₂O₃-W などの電極の温度が低いことがわかる。陰極動作部の温度も同様の傾向を示すものと推定される。この動作温度の差は電極の溶融変形の差異に強い関連をもつものと考えられる。

4. 結 言

酸化物入りタングステン電極を溶接アーキに適用するために純タングステン (P-W)，および数種の酸化物入りタングステン電極 (MgO-W, ZrO₂-W, ThO₂-W, CeO₂-W, Y₂O₃-W, La₂O₃-W, 各 2%，および La₂O₃, Y₂O₃, CeO₂ それぞれの 2 種-各 1%-ずつの

Fig. 10 Electrode temperature measurement by thermocouple

酸化物添加の三元系 W) を試作し、その点弧し易さ、電流電圧特性、アーキ圧力、電極温度、動作中の形状変化と組織変化などを比較して調べ、その結果 La₂O₃ (2%)-W, Y₂O₃ (2%)-W, CeO₂ (2%)-W, 三元系 W の各電極が他の P-W, MgO-W, ZrO₂-W, ThO₂-W 等の各電極よりもかなり優れた性能を有することを明らかにした。さらに、これらの優れた特性に陰極部の動作温度の低いことが強い関連性を有することを示唆した。

引用文献

- 1) 星合正治, 島村道彦, “電子とその作用 (電子工学講座)”, オーム社 (1961).
- 2) Chapin, N. A., Cobine, J. D. and Gallagher, C. J., “Tungsten-Thoria Electrode for Inert Arc Welding”, Welding Journal 30, 529 (1951).
- 3) Winsor, L. P. and Turk, R. R., “A Comparative Study of Thoriated Zirconiated and Pure Tungsten Electrodes”, Welding, Journal 36, 113 s (1957).
- 4) Flemming, D., “Eigenschaften von Wolframelektroden zum WIG-Schweißen”, Schweißen und Schneiden 18, 220 (1966).
- 5) 西川淳; TIG 溶接用タングステン電極のアーキ特性に関する研究, 大阪大学工学博士学位請求論文 (1969).