

エア・プラズマアーク切断用電極の開発研究

群馬大学 工学部 機械システム工学科

講師 楠元一臣

(平成5年度研究開発助成 AF-93013)

1. 緒言

金属の熱切断の分野においては保有エネルギーの比較的に高いプラズマを利用したプラズマ切断が広く用いられている^{1,2)}。

作動ガスに圧縮空気(酸素)を用いた酸化性(エア, 酸素)プラズマアーク切断は、電極(陰極)-母材(又はノズル)間に発生させたプラズマを拘束ノズルと作動ガス気流による熱的ピンチ作用によって生じた緊縮した安定なプラズマ流を熱源とするものである。この作動ガス中の酸素は母材との酸化反応熱によって切断効率をあげると同時に電極の消耗を促進する。

プラズマアーク切断用の電極材質は作動ガスの種類によって異なる。水素や不活性ガスなどの非酸化性ガスを用いる場合には大電流でも電極先端が溶融し難いタングステン(W)電極または熱電子放出能を向上させた酸化物入りW系電極が用いられている。しかし、W系電極を酸化性の作動ガスと共に用いると動作中に蒸気圧の高いタングステン酸化物を生成し、激しく蒸発消耗する。そのため、W系以外の電極材料が検討され、1964年にR. L. O' BRIENらによるジルコニウム(Zr)材を銅製のシースに装填したZr電極が用いられてきた³⁾。その後、1975年にはZr電極に比べて耐久性の良好なハフニウム(Hf)電極がソ連によって開発され⁴⁾、今日のエア・プラズマアーク切断用電極の主流になっている。

しかしながら、近年の産業用ロボットをはじめとする切断システムの自動化や切断面の高品質化などの技術的要求を満足するにはZrやHf電極では耐久性の点で十分とは言えない。そこで、著者らは、耐久性に優れた電極材料の開発と電極の消耗現象についての研究に着手した。本報では酸化性雰囲気における電極材料の選定を動作中のアーク放電機構に基づいて検討を行なった。そして、その結果をもとに試作したIr(イリジウム)-Y₂O₃(酸化イットリウム)系電極の消耗特性についてHf電極と比較検討した。

2. アーク放電機構に基づく電極材料の検討

プラズマアーク電極の消耗とは銅シースなどに装填した電極物質が動作中に種々の要因によって消耗していく現象であり、電極物質や作動ガスの種類および使用電流の大きさなどに関係する。特にプラズ

マ中の酸素分子や原子は電極物質と酸化反応を引き起こし、電極の消耗に強い影響を与えるものと思われる。Fig.1はアーク発生機構から陰極材料として具備すべき諸性質をまとめたものである。

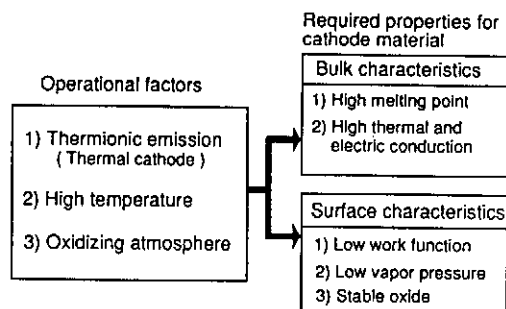


Fig.1 Main operational factors and required properties for electrode to reduce its consumption in air-plasma cutting.

まず、熱電子放出理論からアーク放電用に最も適した電極材料を考えてみる。Fig.2は遷移金属の仕事関数と沸点との関係をプロットしたものである。アーク放電中の熱陰極では熱電子放出が行なわれており、熱電子放出電流密度はリチャードソン・ダッシュマンの式(Richardson-Dushman equation)により次のように表わされる。

$$J = A T^2 \exp(-F/kT) \quad (1)$$

ただし、J:熱電子放出電流密度(A/m²)、A:定数、T:陰極温度(K)、F:仕事関数(eV)、k: Boltzmann定数。

図中の三本の直線は、(1)式を用いて電流密度が10⁶、10⁷および10⁸(A/m²)となるように描いたものである。アーク放電の熱陰極の電流密度は、従来より10⁶~10⁸(A/m²)と言われており、これらの電流密度を熱電子放出でまかなうことの可能な金属は、これらの線の上部に存在することになる⁵⁾。たとえば、元素の周期律表の第5および6周期の遷移金属は有力な候補材料であると考えられる。

また、酸化性雰囲気でのアーク放電の陰極表面は、高温酸化を伴うため、電極の寿命およびアーク安定性は、作動ガス中の酸素と反応した酸化物の性質に影響されると考えられる。たとえば、陰極表面に生成した酸化物の融点や沸点が電極の構成物質より低く同時に蒸気圧が高ければ電極の消耗は激増するだろうし、反対に陰極表面に生成した酸化物の融

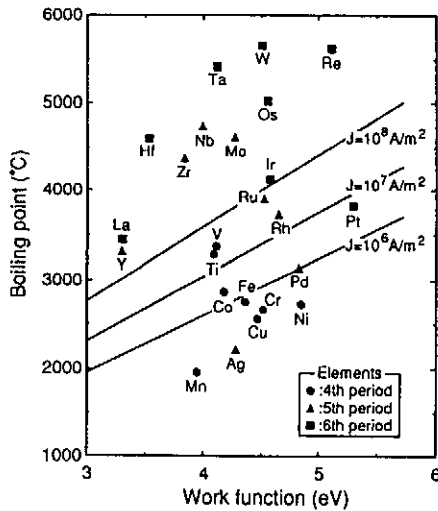


Fig.2 Relationship between work-function and boiling point for metals.

点や沸点が構成物質より高く同時に蒸気圧が低ければ消耗は抑制されるものと考えられる。

以上から、エアプラズマアーク切断用の電極材料の選択にあたり、動作中の陰極表面を高融点でしかも仕事関数が低く、高温域でも安定な酸化物を形成させることにより、アーク放電は安定し、電極の耐久性は向上するものと考えられる。

3. 試作電極及び実験方法

3.1 電極作製

試作した焼結型電極は、金属粉末 (Ir) と酸化物粉末 (Y_2O_3) を所定量の重量パーセントになるように調合した。次に製粒粉末を油圧プレスにて 0.588MPa (6kgf/cm²) の圧力で直径 2mm、長さ約 4mm の円柱状に成形し、水素雰囲気中で 2273K・1.8ks の焼結を行なった。その後、焼結体チップを銅製シースに圧入して実験用電極とした。本実験に用いた電極の形状を Fig.3 に示す。

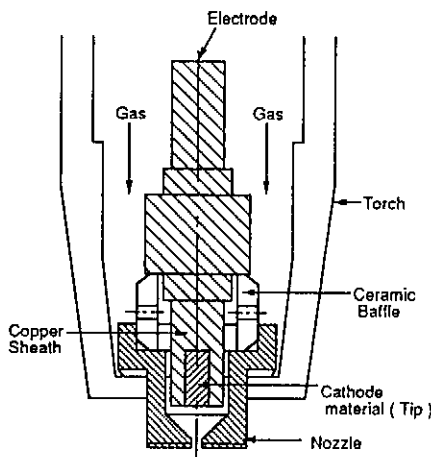


Fig.3 Shapes of produced electrode.

3.2 消耗試験方法

消耗試験装置の概略図を Fig.4 に示す。電源とトーチは市販の酸素・プラズマアーク切断機を用いた。また、作動ガスにはエア・クリーナを介して水分を除去した圧縮空気 (レギュレータの 2 次圧力を 4 kg/cm² (0.392MPa) 一定) を用いた。

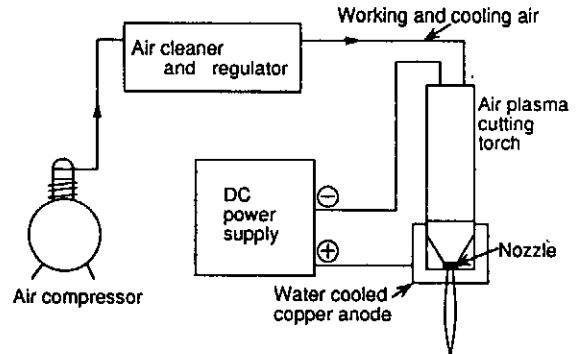


Fig.4 Schematic diagram of electrode consumption test.

電極の耐久性は、水冷した銅製陽極に一定時間、アーク放電を連続的およびパルスの (半周期が 10, 60 および 300s で ON/OFF 時間比が 1 の矩形波 50%) に発生させ、試験前後の電極の重量変化を高感度電子秤 (最小読み取りが $10^{-5}g$) で測定して求めた。

4. 実験結果及び考察

4.1 Y_2O_3 添加量と消耗量との関係

Ir- Y_2O_3 系電極の消耗量に及ぼす Ir 金属への Y_2O_3 添加効果を検討した。Fig.5 はアーク電流 25A で作動ガスに圧縮空気 (0.392MPa) を用いた場合の消耗試験結果である。

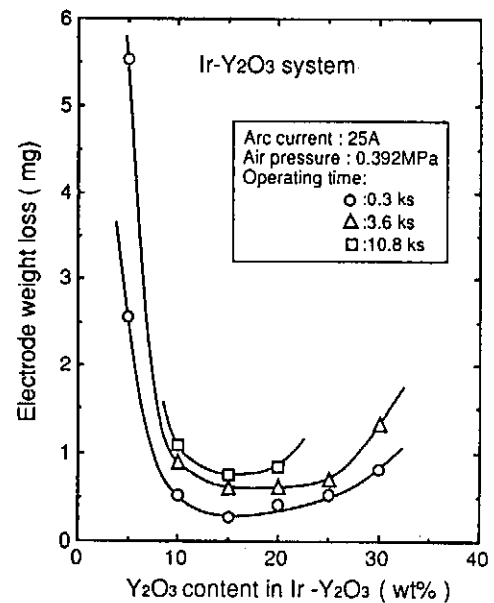


Fig.5 Relationship between Y_2O_3 content and electrode weight loss of Ir- Y_2O_3 system.

電極の消耗量は Y_2O_3 添加量を増加すると減少傾向を示し、 Y_2O_3 添加量が約10から25wt%付近に消耗量の最小域が存在し、それ以上では再び増加傾向を示した。また、試験時間を増加すると最小消耗を示す Y_2O_3 の含有範囲が狭くなり、試験時間が10.8ksでは85Ir-15 Y_2O_3 電極が最も消耗量が少ないことが分かった。

4.2 連続点弧時の消耗特性

Fig.6はアーク電流25A、作動ガスに圧縮空気を用い、試験時間21.6ks(6時間)までの連続点弧消耗試験結果である。Hf電極は試験時間が7.2ksまでは緩やかに消耗したが、7.2ksを過ぎると急速に消耗し、14.4ks後には電極材を装填している銅シース部にまで消耗は進行した。これに対して、85Ir-15 Y_2O_3 電極および85Ru-15 Y_2O_3 電極は21.6ksまでの試験時間においてもHf電極のような急速な消耗は見られない。Fig.7は消耗試験後の電極外観写真である。85Ir-15 Y_2O_3 電極および85Ru-15 Y_2O_3 電極ではHf電極に見られる厚い酸化物などは観察されず、未熔融の焼結体が銅シース内に残存しており、まだ使用可能な状態であることが分かる。

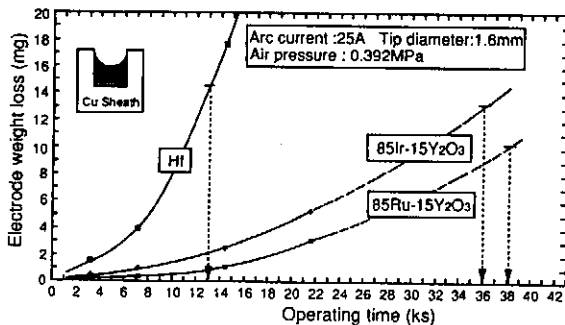


Fig.6 Estimation of life time for various electrodes resulting from continuous consumption test at 25A.

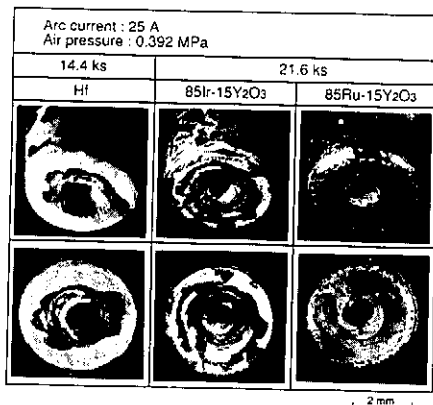


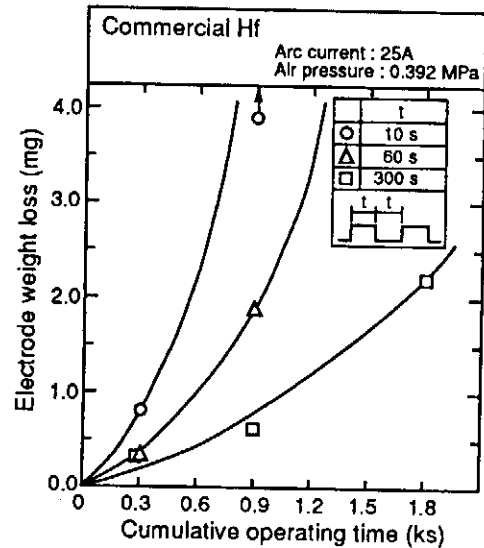
Fig.7 Appearance of various electrodes after discharge at 25A.

ここで、電極の消耗量を試験時間の2乗に比例するものと仮定し、消耗が半球状に進行して銅シース部(直径1.6mm)に到着するまでの時間を比較すると、Hf電極:13ks, 85Ir-15 Y_2O_3 電極:36ks, 85Ru-

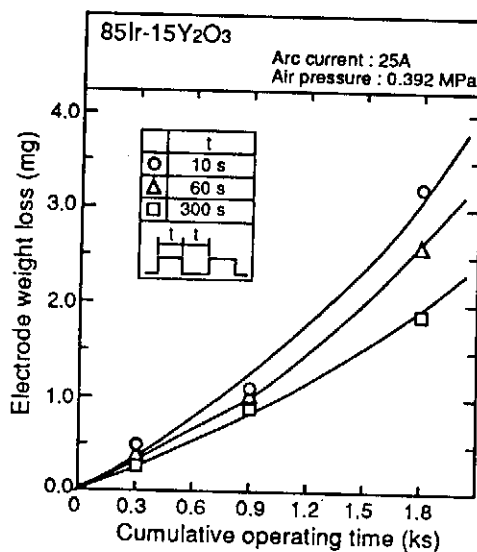
15 Y_2O_3 電極:38ksとなり、試作した85Ir-15 Y_2O_3 電極は、85Ru- Y_2O_3 電極と同程度の耐消耗性を示し、Hf電極に比べて約3倍の耐久性を有することが予想される。

4.3 多数回点弧時の消耗特性

実際の作業環境では断続的な不連続点弧の場合が一般的である。そこでON/OFF時間比が1で半サイクルが10, 60および300sの周期的矩形波を用いた多数回点弧消耗試験を行なった。Fig.8(a)(b)はアーク電流25AにおけるHf(a)および85Ir-15 Y_2O_3 (b)各電極の消耗量を総点弧時間(ONのみの時間の総和)で整理した結果である。85Ir-15 Y_2O_3 電極(b)はHf電極(a)に比べて周期変化にあまり大きくは影響されないことが分かる。



(a)



(b)

Fig.8 Relationship between cumulative operation time and electrode weight loss. (a) Hf electrode, (b) 85Ir-15 Y_2O_3 .

Fig.9 は消耗した電極重量を体積に換算して各電極の耐消耗性を相対的に比較したものである。85Ir-15Y₂O₃ 電極の消耗体積は、Ir 金属 (22.4g/cm³) の密度が Ru 金属 (12.2g/cm³) より高いために、重量測定による消耗量に比べて低いことになる。このため、85Ir-15Y₂O₃ 電極の消耗は、80Ru-20Y₂O₃ 電極と同程度と考えられ、共に Hf 電極に比べて3倍以上の耐消耗性を有することが分かった。

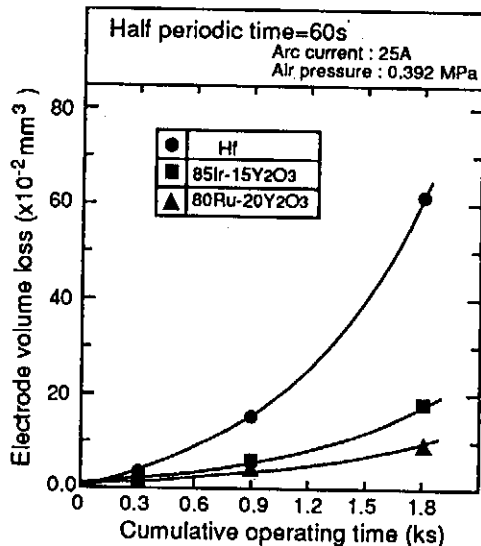


Fig.9 Estimation of life time for various electrodes resulting from periodic consumption test at 25A.

5. 結言

エアプラズマアーク切断用電極材料の選定をアーク放電機構に基づいて検討した。そして、その結果をもとに試作した Ir-Y₂O₃ 系電極の消耗特性を調べた。得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 酸化性プラズマアーク切断用電極材料の選定における基本的な考え方を示した。
- (2) 連続点弧消耗試験 (アーク電流 25A) の結果、85Ir-15Y₂O₃ 電極は Hf 電極に比べて約 3 倍の耐久性を有することが分かった。
- (3) 多数回点弧消耗試験の結果、85Ir-15Y₂O₃ 電極は点弧回数が増加しても消耗量はあまり増加せず、点弧繰り返し周期が 60s の場合には Hf 電極に比べて約 3 倍以上の耐久性を有することが分かった。

謝辞

本研究は (財) 天田金属加工機械技術振興財団による研究開発助成を受けたものであり、記してここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 山本：小型エアプラズマ切断の最近の動向，

溶接学会誌，55-6 (1986) 361.

- 2) (社) 日本溶接協会ガス溶断部会編：“プラズマ切断機要覧”，(1990) 6.
- 3) (社) 日本溶接協会編：“プラズマ切断の基礎と実際”，廣濟堂産報出版 (1983) 9.
- 4) R. L. O'BRIEN, R. J. WICKHAM and W. P. KEANE : WELDING J., DEC. (1964) 1015.
- 5) 日本国特許，昭 50-7019 (1975) .
- 6) J. F. LANCASTER：“溶接アークの物理”，溶接学会，(1990) 134.