電極消耗部陰極表面状態の解析*

—酸化性雰囲気用プラズマアーク電極の開発研究 (第4報)—

楠元 一臣**, 石田 昭佳***, 牛尾 誠夫****, 松田 福久****

Analysis of Cathode Surface on Consumption Mechanism*

—New Cathode Material for Air Plasma Cutting (Report 4)—

by Kazuomi Kusumoto**, Akiyoshi Ishida***, Masao Ushio**** and Fukuhisa Matsuda****

This paper describes the consumption mechanism of Ru-Y₂O₃ electrode for air plasma cutting torch during arc discharge.

To clarify the consumption mechanism, the direct observation by stereoscope and CCD camera was carried out during arcing, and the analyses by EMPA and micro X-ray diffractometer of cathode surface after arcing were carried out.

In case of Ar shielding gas, it was cleared during arcing that the fusion area of 80Ru-20Y₂O₃ cathode surface was separated into the two regions of Ru and Y₂O₃ components and sputtering of the molten particles mostly occurred from Ru part. On the other hand, in case of Ar+20%O₂ and air, the top of cathode surface was covered with the molten layer of Y₂O₃ and the plasma was stably sustained during arcing. The reason why the difference arises is considered due to possibility of oxygen supply during arcing.

Key Words: Air-plasma cutting, Cathode material, Electrode consumption, Hafnium, Ruthenium, Yttrium-oxide, Direct observation, Cathode phenomena

1. 緒 言

前報¹⁾において Ru-Y₂O₃ 系電極の消耗特性に及ぼす冶金学的因子を検討した結果、電極の消耗には焼結体の気孔率が強く影響し、緻密化が不十分であれば耐消耗性が低下することが分かった。また、Ru-Y₂O₃ 系焼結材の熱伝導率や電気抵抗率と消耗特性との関係を検討し、Ru-Y₂O₃ 系電極の中で良好な耐久性を示した 80Ru-20Y₂O₃ 電極は Hf 電極に比べて良好な耐消耗性を有する理由は、80Ru-20Y₂O₃ 焼結材が Hf 材に比べて熱伝導率が高く同時に電気抵抗率が低いことも一因であると考えられた²⁾。そして、Ru-Y₂O₃ 系電極の Y₂O₃ 添加量と消耗量との関係において、Y₂O₃ 添加量が約30 wt%以上の電極の消耗量が増加特性を示す理由は、バルク材の熱伝導率の低下と共に電気抵抗率の急増によるものと考えられた²⁾。

しかしながら、Y₂O₃ 添加量が約10 wt%までの電極の消耗量が減少特性を示す理由については、バルク材の熱的および電気的性質からは説明できず、放電中の陰極表面状態に支配されるものと思われた。

陰極の消耗現象はアーク放電の安定性を左右するが、これはアークの陰極表面の物理・化学的現象に強く支配されるものと思われる。

そこで、本研究では Ru-Y₂O₃ 系電極の消耗過程をチップ電極を用いて陰極表面現象から検討した。まず、放

電中の陰極表面状態を直接的に観察し、消耗に及ぼす作動ガス中の O₂ および N₂ の影響を検討した。次に、放電後の陰極表面状態を EPMA および X線回折を用いて分析を行い、放電中の陰極表面と対比させ、金属-酸化物電極の消耗過程を検討した。また、Hf 電極に対しても同様な実験を行い、金属-酸化物電極との相違を考察した。

2. 実験方法

銅シースに装填する前の焼結体チップを陰極としてアーク放電を行い、放電中の陰極先端部の消耗状態を実体顕微鏡を通して直接的に観察した。チップ電極の保持には TIG 溶接トーチのコレットを使用した。放電中のアーク光の影響を排除するためにクセノンランプを集光させて陰極先端部を照射し、写真撮影を行い、同時に CCD (Charge-Coupled Device) カメラを用いて放電中の陰極表面状態やアーク安定性を検討した。Fig. 1 は直接観察試験の概略図である。チップ電極の寸法は Ru-Y₂O₃ 系が直径2.4 mm、長さ7.0 mm であり、Hf は直径1.6 mm である。また、チップ電極先端は45度の円錐状に研磨した。

Fig. 1 Experimental alignment of direct observation method of the cathode surface during arc discharge.

*原稿受付 平成6年3月8日 平成2年度秋季全国大会で発表

**正 員 大阪大学大学院(現:群馬大学工学部) Member, Graduate Student of Osaka Univ. (Present: Faculty of Engineering, Gunma Univ.)

***正 員 大阪大学大学院(現:住友金属工業㈱) Member, Graduate Student of Osaka Univ. (Present: Sumitomo Metal Industries, Ltd)

****正 員 大阪大学溶接工学研究所 Member, Welding Research Institute of Osaka Univ.

3. 実験結果及び考察

3.1 チップ電極の放電状態

開発した Ru-Y₂O₃ 系電極の動的消耗過程を放電中の陰極表面状態から検討した。

Ru-Y₂O₃ 系電極の中で Y₂O₃ 添加量が約20 wt%の焼結体がエア・プラズマアーク切断用電極として最も消耗量が少なかったため、この 80Ru-20Y₂O₃ 電極の耐消耗性と放電中の陰極表面状態との関係を検討した。

Fig. 2 は 80Ru-20Y₂O₃ チップ電極のアーク電流60 A で作動ガスが Ar (a) および Ar+20%O₂ (b) の場合の放電中および放電後の陰極表面状態である。放電中の各写真は、それぞれ放電開始から10, 30, 60秒後のもので、放電後の写真は70秒後のものである。作動ガスの種類に関係なく、電極先端部は溶融状態を示し、放電時間の増加に伴い溶融域が広がる傾向が認められた。

Fig. 2 (a) の写真より、Ar ガス中での放電による陰極先端部の溶融域は、明確に2相分離を示した。また、アーク電流の増加に伴って、この溶融域の分離がより明確に認められた。Fig. 3 は Fig. 2 (a) のアーク放電中の陰極先端部の溶融状態のスケッチ図である。図中のA部は、Fig. 2 (a) の放電中の写真では丸く溶融した電極先端の灰色部に、放電後の写真では金属光沢の部分に対応する。このA部は放電中に溶融域を動き回り、溶融粒子のスパッタが時折観察された。ここで電極先端部が2相に分離した各物質は、本電極の構成材料が Ru と Y₂O₃ であることから、銀白色の金属光沢を放つA部が Ru 金属であり、またB部が Y₂O₃ と推定された。

次に、Fig. 2 (b) は 80Ru-20Y₂O₃ 電極を作動ガスに Ar+20%O₂ ガスを用いた場合の放電中および放電後の陰極表面状態である。ここでは Ar ガス中で見られた電極先端部の2相分離は起こらず、Fig. 3 のB部が広がり電極先端のA部を覆った状態で放電が行われているのが観察された。また、Ar ガスで見られた溶融粒子のスパッタ

タは発生せず、安定した放電が維持された。

次に、放電中の陰極表面状態に影響を及ぼすと考えられる作動ガス中の N₂ について検討した。Fig. 4 は 80Ru-20Y₂O₃ チップ電極のアーク電流30 A で作動ガスが Ar+20%N₂ ガス(a)および圧縮空気(b)の場合の放電中および放電後の陰極表面状態である。Ar+20%N₂ ガスでの放電中の陰極表面は、Ar ガスの場合と同様に、電極先端部の溶融域が2相に分離し、中央部の金属光沢部(放電後の写真において)が激しく動き回り、多量の溶融粒子のスパッタが観察された。放電後の写真では電極の先端部が無くなり、消耗が大きく増加したことが分かる。

また、圧縮空気での放電中の陰極表面は Fig. 4 (b) に示すように10 s 後には電極先端部が大きく溶融し、中央部の金属(A部)が陰極表面に出現する場合(60 s 後の写真)があったが、大体においては Fig. 3 のB部(Y₂O₃と思われる層)で覆われた状態で放電が行われた。また、スパッタは Ar+20%N₂ ガスのように絶えず起こるとは限らず、中央部の金属部が陰極表面に出現する場合に観察された。圧縮空気中には N₂ が約80%あるにもかかわらず、多量のスパッタが発生しなかった理由は、残りの約20%の O₂ が陰極表面の Y₂O₃ の生成を促進させることで、金

Fig. 3 Schematic illustration of cathode surface during arc discharge.

Fig. 2 Photographs of surface of 80Ru-20Y₂O₃ tip electrode during arc discharge at 60 A in Ar (a) and Ar+20%O₂ (b).

Fig. 4 Photographs of surface of 80Ru-20Y₂O₃ tip electrode during arc discharge at 30 A in Ar+20%N₂ (a) and Air (b).

Shielding gas		Ar	Ar+5%O ₂	Ar+20%O ₂	Ar+5%N ₂	Ar+20%N ₂
90Ru-10Y ₂ O ₃	Melted area	S	S	S	S	S
	Spot motion	○	○	○	□	×
	Sputter	■	●	●	■	×
80Ru-20Y ₂ O ₃	Melted area	M	M	L	M	M
	Spot motion	□	○	○□	□	×
	Sputter	■	●	●	■	■
70Ru-30Y ₂ O ₃	Melted area	L	L	LL	LL	LL
	Spot motion	□	□	□	×	×
	Sputter	●	●	●	■	×
Melted Area	S Small	Cathode spot motion		○ Stabilized	● Non	
	M Medium			□ Periodic	■ Intermittent	
	L Large			×	Continuous	

Fig. 5 Summary of direct observation on arc root stability and cathode surface of Ru-Y₂O₃ electrode.

属部からのスパッタを抑制したものと考えられる。

以上の直接観察から電極の組成と作動ガス中の O₂ や N₂ 濃度変化による放電状態および陰極表面状態をまとめると Fig. 5 となる。すなわち、消耗状態を電極先端部の溶融面積、陰極点の動きおよびスパッタの発生状況からまとめたものである。焼結体中の Y₂O₃ 成分が増加するにつれ、電極先端部の溶融面積は増加傾向を示した。また、溶融域からのスパッタは酸化性雰囲気では発生せず、Ar や N₂ ガスの非酸化性雰囲気では 2 相に分離した金属部から溶融粒子のスパッタが発生した。

Ru-Y₂O₃ 系チップ電極が酸化性雰囲気において、スパッタを伴わず安定した放電が維持される理由は、陰極表面を仕事関数の低い Y₂O₃ 層 (Ru: 4.5 eV, Y₂O₃: 2.0 eV) で覆うことで熱電子放出を容易にしたと共に、溶融した粒子のスパッタの発生を阻止したためと考えられる。

Fig. 6 は Hf チップ電極の Ar ガス(a)および Ar+20% O₂ ガス(b)での放電中および放電後の陰極表面状態を示したものである。アーク電流 10 A とかなり低いにもかかわらず電極先端部が広く溶融し、60 A での 80Ru-20Y₂

O₃ チップ電極に比べて溶融部は約 4 倍になっている。これは電極材料の熱伝導率や電気抵抗率の相違によるもので Hf 材の熱伝導率が 80Ru-20Y₂O₃ 焼結体に比べて低く、また電気抵抗率が高いために溶融面積が増加したものである。Ar+20%O₂ ガスの場合は、溶融域が Ar ガスの場合に比べて更に広がると共に陰極点電極先端部に固定せず、動き回るのが観察された。放電後の電極表面は、Ar および Ar+20%O₂ ガス共に金属光沢が失われ、酸素雰囲気では白色のセラミックスが形成された。これは電極物質の Hf 金属が酸化されて酸化ハフニウムが生成したものと思われる。

3.2 陰極表面の解析

3.2.1 EPMA による陰極表面の解析

酸化性雰囲気では Y₂O₃ と思われる溶融層が陰極表面を覆った状態でアーク放電を安定に維持させるものと推論したが、陰極表面に生成した被覆物質の同定がなされていなかった。そこで、放電後の陰極先端部の凝固組織を EPMA を用いて検討した。

Fig. 7 は作動ガスに圧縮空気を用いて放電させた時の 80Ru-20Y₂O₃ チップ電極の先端溶融部の EPMA 分析結果である。電極先端部の溶融域は Ru 成分と Y 成分域とに完全に分離しているのが確認できる。また、放電状態の観察結果に加えて本電極の構成物質が Ru と Y₂O₃ であることを考慮すると、動作中は酸化物 (Y₂O₃) が金属 (Ru) を覆った状態で放電が行われたと考えられる。このことは、CCD カメラによる放電状態の記録からも裏付けられた。

次に Hf チップ電極の放電後の陰極先端部を EPMA にて調べた。Fig. 8 は作動ガスに Ar および Ar+20%O₂ ガスを用いてアーク電流 30 A で 10 s 間放電させた場合の陰極先端部の断面組織である。作動ガスに O₂ が添加されると、Ar ガスの場合に比べて電極先端部の酸化物層の厚みが増加したのが認められるが、Ar ガスのみでも薄い酸化物層 (約 100 μm) が生成していることが分かる。

Fig. 6 Photographs of surface of Hf tip electrode during arc discharge at 10 A in Ar (a) and Ar + 20%O₂ (b).

Fig. 7 EPMA analysis of 80Ru-20Y₂O₃ tip electrode after discharge for 30 s at 30 A in Air.

Fig. 8 EPMA analysis of Hf tip electrode after discharge for 10 s at 30 A in Ar and Ar + 20%O₂.

これは放電中及び放電後に溶融した電極先端部が酸化されたものと考えられる。

3.2.2 X線回折法による陰極表面の解析

チップ電極先端部の2相分離した各相をマイクロX線回折法にて同定した。回折にはCuK α 線を用い、X線発

Fig. 9 X-ray diffraction pattern of 80Ru-20Y₂O₃ tip electrode after discharge for 30 s at 90 A in Ar + 20%O₂.

生条件は50 kV, 120 mA, ビーム径100 μ m および検出時間0.6 ksの条件で行った。

Fig. 9は80Ru-20Y₂O₃チップ電極をAr+20%O₂ガスを用いてアーク電流90 Aで30 s間の放電を行った後の電極先端部のX線回折結果である。金属光沢のあるA部はRuと少量のRuO₂が検出され、灰色のB部はY₂O₃であった。また、電極断面でのX線回折結果によるとA部ではRuO₂が検出されずRuのみであり、B部は表面での分析結果と同様にY₂O₃であった。ここで、電極表面にのみRuO₂が検出されたのは、放電中にRuが酸化され陰極表面に付着したものと思われる。

以上、直接観察試験で得られた陰極表面状態をEPMAおよびX線回折から検討した結果をスケッチ的に示すとFig. 10となる。Ru-Y₂O₃系チップ電極の放電は、電極先