中真空における Al 陰極 N₂ フロー真空アークの 放電持続性に及ぼす電源の影響

正 員 滝 川 浩 史 (豊橋技科大)

学生員 田 中 邦 泰 (豊橋技科大)

正 員 榊 原 建 樹 (豊橋技科大)

Influence of Power Supply on Continuity of Vacuum Arc with Al Cathode and N₂ Flow under Medium Vacuum

Hirofumi Takikawa, Member, Kuniyasu Tanaka, Student Member, Tateki Sakakibara, Member
(Toyohashi University of Technology)

Continuity of steered vacuum arc with Al cathode and N₂ flow under pressure of 0.1 - 5 Pa is investigated. Two constant-current power supplies (60 V open-circuit voltage / 30 V load voltage and 310 V / 240 V) and a constant-voltage power supply with open-circuit voltage of 550 V are used. Arc current is 30 A, N₂ flow rate is 20 ml/min, and transverse magnetic field density at the cathode edge is 1.2 mT. The following results are obtained. (1) When the power supply with lower open-circuit and load voltages is used, decrease in pressure causes the arc to lose sustainability. (2) When the power supply with high open-circuit and load voltages is used, the arc can continue even at lower pressure. (3) When the power supply with higher load voltage is used, abnormal discharge behind the magnet field guide-disk may occur at lower pressure.

The above mentioned influence of power supply on arc continuity is interpreted in terms of column fall and generation of a new cathode spot.

キーワード: AlN 膜生成用真空アーク, 中真空領域, 放電持続性, 電源

1. はじめに

現在, 電力用デバイスの大容量化にともない, デバイス本体とヒートシンクあるいは冷却水との間の電気絶縁膜として, 窒化アルミニウム (AlN) 膜の利用が検討されている。従来, 絶縁膜にはアルミナ (抵抗率: $10^{12} \sim 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$, 熱伝導率: $20 \sim 25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) が利用されているが, 熱伝導率がアルミナより優れた AlN (抵抗率: $10^{11} \sim 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$, 熱伝導率: $60 \sim 80 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) を利用することにより, 冷却効率が改善され, デバイスの小型化・大容量化が可能となる。

筆者らは, これまで, 真空アーク蒸着法により種々のセラミック膜を生成したり, 装置の開発を行ったりしてきている^{(1)~(4)}。同手法は, スパッタ法や CVD 法などと比較して, 蒸着速度が格段に速いという利点を有している。AlN 膜が同装置によって生成可能であることは既に報告した⁽¹⁾。

しかしながら, 従来の装置で AlN 膜を生成するにはいくつかの問題があることに直面した。その一つは, 陽極表面上にも AlN 膜が堆積して電流路をふさぐため, アーク放電が時間とともに不安定となり, やがて自己消弧してしまうようになることである。この点に関しては, バンチングメタル製のアノードスクリーンを陽極表面を覆うように配置することにより解決できた⁽⁴⁾。もう一つの問題は, 良質の AlN 膜を生成するには, より高いエネルギーのイオンを得るために圧力を 0.1~1.0 Pa 程度にするのが望ましいと考えているが, 現状では, 圧力が約 3 Pa 以下ではアークが持続しないということである。

圧力が低い場合に Al 陰極 N₂ フロー真空アークが持続しない原因は, 陽極表面への AlN 膜の堆積にあるのではなく, 陰極点の消滅にあると予想した。ところで, 陰極-陽極間へ 1,000 V 程度の直流電圧を印加するとアークが点弧する。

N₂ 雰囲気中の Al 陰極の場合、Ti 陰極や Ar 雰囲気中の場合と比べ、より低い圧力でアークが生じる⁽⁶⁾。このことから、Al 陰極 N₂ フロー真空アークを低い圧力で維持するには、開放電圧および負荷電圧の高い電源を用いればよいのではないかと考えた。本論文では、AlN 膜生成用の Al 陰極 N₂ フロー真空アークに関し、電源を変え、圧力 0.1~5 Pa の範囲において放電が持続するかどうかを明らかにする。

2. 実験装置および方法

〈2・1〉 真空アーク蒸着装置 真空アーク蒸着装置の全容は従来とほぼ同様⁽⁴⁾で、400φ×600 mm の SUS 304 製円筒型真空チャンバを陽極とし、その一端に 64 mmφ の Al 陰極（純度：99.7%）を取り付けたものである。ただし、図 1 に示すように、陽極チャンバフランジ、整磁板取付フランジ

図 1 Al 陰極 N₂ フロー真空アーク蒸着装置の陰極周辺部

Fig.1. Schematic diagram of cathode region of Al cathode N₂ flow steered arc deposition apparatus.

(a) 低壁陰極 (b) 高壁陰極
〈整磁板位置：陰極表面に同じ〉

図 2 陰極形状および整磁板の配置位置

Fig.2. Cathode shapes and position of a field guide-disk.

ジおよび陰極取付フランジとの間の絶縁を強化した。また、陰極取付フランジの陰極取付部および整磁板までの陰極側面をテフロンテープを巻いて絶縁した。

陰極取付フランジ背面には磁石（陰極側：N 極）を取り付け、陰極周囲に整磁板（外径 235 mmφ、内径 67 mmφ、厚さ 5 mm の軟鉄製円盤）を配置することにより、図 1 に示すような磁界を陰極表面に印加した⁽⁶⁾。これは、陰極表面上の陰極点を陰極表面上で回転運動させ、陰極点からドロップレット（溶融マクロ粒子）が放出されるのを抑制するためである⁽⁷⁾。なお、今回は、アノードスクリーンは用いなかった。

〈2・2〉 電源および陰極形状 電源には、開放電圧および負荷電圧の異なる以下の 3 つを用いた。従来から用いているアーク溶接用直流定電流電源（ダイヘン製、インバータ ARGO 300P；11 kVA，開放電圧：60 V，定格負荷電圧：30 V，最大定格電流：300 A），プラズマガウジング用直流定電流電源（ダイヘン製、D-12000 G；35 kVA，開放電圧：310 V，定格負荷電圧：240 V，最大定格電流：120 A），およびシリコン整流器（中央製作所製、AB 型：33 kVA，開放電圧：550 V，最大負荷電流：60 A）である。シリコン整流器は直流定電圧電源であるので、制限用の可変抵抗を回路に挿入して、アーク電流が一定になるようにした。

図 2 に今回使用した陰極の形状および陰極と整磁板との位置関係を示す。陰極には、従来用いている陰極（低壁陰極）と、陰極点が遠心力で飛び出さないように陰極点飛び出し防止壁を 15 mm と高くしたもの（高壁陰極）とを用いた。整磁板は、陰極表面と整磁板の厚さの半分の面とが一直線になるように配置した。どちらの場合も、陰極と整磁板との間隙において、陰極から整磁板へ向かう磁束密度が 1.2 mT になるように磁石の枚数を変えて調整した。

〈2・3〉 実験方法および条件 前節で示した電源を用い、圧力を 5.0, 1.0, 0.5, 0.1 Pa と変化させ、アークを 10 min 間放電させた。その際、アーク電圧（電極間電圧）および電流（回路電流）を計測し、アークの様相を観察した。アークは、SW を閉じた状態でトリガ電極を陰極に接触させ、それを引き離して陰極と陽極との間に発生させた。一旦アークが発生したら、トリガ電極と陰極との間に電流が流れないように SW を開いた。10 min 間の放電時間の途中でアークが消弧した場合には速やかに再点弧した。アーク電流は 30 A，N₂ ガス導入流量は 20 ml/min 一定とした。なお、陽極表面は、実験前に、カップブラシで研磨し、その後アセトンで拭拭した。

3. 実験結果

〈3・1〉 アーク電圧・電流 溶接用電源およびシリコン整流器電源を用いた場合のアーク電圧および電流の経時変化を、A/D 変換器を内蔵したパソコンで計測した結果を図 3 および図 4 に示す。サンプリング速度は 20 ms とした。電流は、クランプ電流計を用い、電圧に変換して計測した。

(a) 圧力 : 5.0 Pa

(b) 圧力 : 1.0 Pa

(c) 圧力 : 0.1 Pa

(アーク電流 : 30 A, N₂ 流量 : 20 ml/min, 陰極 : 低壁陰極)

図3 アーク溶接用電源を用いた場合の
アーク電圧および電流の経時変化

Fig.3. Time variation of arc voltage and current when welding power supply (open-circuit voltage: 60 V) is used.

陰極には低壁陰極を用いた。

図3のアーク溶接用電源の場合についてみる。図(a)の圧力 5.0 Pa の場合、アークは 10 min 間一度も消弧せず、持続している。アーク電圧は約 20 V で、10 min 間ほぼ一定である。これに対し、図(b)の圧力 1.0 Pa の場合、アーク電圧は点弧後時間とともに徐々に増加し、10 min 後には約 30 V になっている。これは、陽極表面にも AlN 膜が生成されるためである⁽⁴⁾。また、10 min 間に約 40 回も消弧している。アークが消弧した時点では、電極間には電源の開放電

(a) 圧力 : 5.0 Pa

(b) 圧力 : 1.0 Pa

(c) 圧力 : 0.1 Pa

(アーク電流 : 30 A, N₂ 流量 : 20 ml/min, 陰極 : 低壁陰極)

図4 シリコン整流器電源を用いた場合の
アーク電圧および電流の経時変化

Fig.4. Time variation of arc voltage and current when silicon rectifier power supply (open-circuit voltage: 550 V) is used.

圧 60 V が現れ、一方、電流は 0 A になっている。圧力 0.1 Pa の場合、図(c)に示すように、実験開始後約 50 s 間に 20 回も消弧したため、そこで実験を終了した。圧力が高い場合、トリガ電極を陰極から離すとアークは陽極チャンバへ移行し、SW を開放してもアークは陰極-陽極間で維持される。しかしながら、圧力 0.1 Pa の場合、トリガ電極を陰極から離れた時点では陰極とトリガ電極との間でアークが維持されていたが、SW を開放した直後にアークが消弧する場合がほとんどであった。

次に、図4のシリコン整流器電源の場合についてみる。圧力 5.0 Pa の場合、溶接用電源の場合と同様に、アークは 10 min 間持続している。圧力 1.0 Pa の場合も、10 min 間アークが持続している。圧力 0.1 Pa の場合、実験開始後から約 2.5 min 間はアークが持続している。ところが、この時点で、アーク放電が陰極側面と陽極間と維持されるような異常放電となった。図5(a)にその放電の様相を陰極正面から撮影したものを、(b)に断面から見た様子を示す。このような状態になった場合には、電源を一旦切り、その後速やかに再点弧した。しかしながら、一旦異常放電が発生すると、再点弧しても直ぐに同様な異常放電が生じた。実験開始後から、異常放電が発生するまでの時間は、およそ 2~4 min であった。なお、異常放電をそのままにしておくと、フランジ間の絶縁が熱的に破壊されてしまうことがほとんどであった。

〈3・2〉 放電の持続性 前節の実験をそれぞれ 3 回以上繰り返し、アークが 10 min 間持続するかどうかをまとめたものを表 1 に示す。10 min 間消弧せず、異常放電にもならなかった場合は「持続」と記した。アークが消弧した場合はその回数を記した。異常放電が発生した場合には、異常放電が発生するまでの平均時間を記した。この表から以下のことがわかる。

低壁陰極の場合、アーク溶接用電源を用いたとき、圧力 5.0 Pa ではアークが 10 min 間持続するが、1.0 Pa では 50 回以下の消弧が生じ、0.5 Pa では 100 回以上の消弧が生じる。0.1 Pa では陰極-陽極間においてアークが発生しない。これに対し、開放電圧および負荷電圧が高いプラズマガウジング用電源を用いると、圧力 0.1 Pa でも持続するようになり、0.5 Pa の場合の消弧回数は 1/20 以下に激減する。また、0.1 Pa において陰極-陽極間にアークが生じるようになり、消弧回数も比較的少ない。更に開放電圧が高く、負荷電圧も使用した電源のうち最も高いと考えられるシリコン整流器

定電圧電源を用いると、5.0 および 1.0 Pa ではアークが持続するが、0.5 および 0.1 Pa では、異常放電が発生するようになる。0.5 Pa と 0.1 Pa とでは、0.1 Pa の場合の方が異常放電が発生するまでの時間が短い。一方、高壁陰極の場合、低

(a) 陰極正面方向から撮影した異常放電

(b) 断面から見た異常放電の様子

図5 異常放電の様相

表 1 種々の電源を用いた場合の放電持続性 (アーク電流: 30 A, N₂ 流量: 20 ml/min)

Table 1. Continuity of arc discharge with different power supplies.

(arc current: 30 A, N₂ flow rate: 20 ml/min)

電 源	圧力 (Pa)	(a) 低壁陰極	(b) 高壁陰極
アーク溶接用定電流電源 (開放電圧: 60 V, 負荷電圧: 30 V)	5.0	持 続	持 続
	1.0	消弧回数 < 50 回	持 続
	0.5	消弧回数 > 100 回	持 続
	0.1	点弧せず	消弧回数 < 5 回
プラズマガウジング用 定電流電源 (開放電圧: 310 V, 負荷電圧: 210 V)	5.0	持 続	持 続
	1.0	持 続	持 続
	0.5	消弧回数 < 5 回	持 続
	0.1	消弧回数 > 25 回	持 続
シリコン整流器定電圧電源 (開放電圧: 550 V)	5.0	持 続	持 続
	1.0	持 続	持 続
	0.5	平均 6 min 後異常放電	持 続
	0.1	平均 3 min 後異常放電	持 続

(アーク電流: 30 A, 圧力: 0.1 Pa, 高壁陰極, サイリスタ整流器)

図6 新しい陰極点が形成されるときのアーク電圧

Fig.6. Arc voltage waveform when a new cathode spot is generated.

壁陰極と比べてアークが持続しやすいことがわかる。しかしながら、アーク溶接用電源を用いた場合、低い圧力では依然消弧が発生する。

4. 考察

従来用いてきたアーク溶接用電源から、開放電圧および負荷電圧の高いプラズマガウジング電源やサイリスタ整流器電源に変えたところ、アークが持続するようになった。このことについて次のように考える。

陰極点が遠心力や他の何らかの原因で図5のように陰極側面で生じると、アークは図5(b)のような放電路を形成しようとする。そうすると、アークは幾何学的に収縮し、アーク陽極柱内に電圧降下が生じる。もし、アーク電圧が電源の負荷電圧を越えると、アークが消弧する。一方、電源の開放電圧が高いと、新しい陰極点が陰極表面上(飛び出し防止壁より内側)に形成される。このときのアーク電圧をデジタルストレージオシロで計測した。その結果を図6に示す。同図から、新しい陰極点が形成されるとき、アーク電圧は定常状態の約5倍に上昇していることがわかる。新しい陰極点が形成されるのは、中真空のN₂ガス中のAl陰極の場合、陰極-陽極間に高電圧が印加されるとアークが自己発弧しやすいためである⁽⁵⁾。しかしながら、電源の負荷電圧が、電圧降下を生じたアーク陽光柱を十分維持できるほど高いと、図5(b)のような放電路を維持してしまう。

なお、今回の実験結果から、負荷電圧の高い電源を用いれば、アノードスクリーンを用いなくてもアークが持続することがわかった。これは、電源の負荷電圧が高ければ、陽極表面上に堆積したAlN膜中で生じる電圧降下は問題でなくなるからである。

5. まとめ

AlN膜生成用Al陰極N₂フロー真空アーク放電に関し、中

真空領域(0.1~5.0 Pa)において、開放電圧および負荷電圧の異なる電源を用い、10 min間アークが持続するかどうかを計測した。その結果、以下のことを明らかにした。

(1) 開放電圧および負荷電圧の低い電源を用いた場合、圧力が低くなると、アークが維持されにくい。

(2) 開放電圧および負荷電圧が高い電源を用いると、低い圧力でもアークが持続する傾向にある。

(3) 電源の負荷電圧が高すぎると、陰極点が陰極側面に形成された場合、アークが整流板背後の狭い空間で維持される異常放電となることがある。

以上のアークの持続性に及ぼす電源の影響に関し、陰極点が陰極側面に移動したときの陽光柱の電圧降下および新しい陰極点の形成の観点から説明した。

本研究の遂行に当たり、本学卒研究生 川上尚也 君の協力を得た。また、本研究の一部は、平成8年度文部省科学研究費の補助を受けて行われた。

(平成8年10月28日受付、平成9年3月21日再受付)

文 献

- (1) 滝川・小切山・榊原:「真空アーク蒸着法によって生成されたAlN膜の膜質」, 電学論A, **111**, 1042 (平3-12)
- (2) 滝川・武富・榊原:「真空アーク蒸着法を用いたダイヤモンドライクカーボン膜の生成とその表面形状」, 電学論A, **113**, 654 (平5-9)
- (3) H. Takikawa, T. Inoue & T. Sakakibara: "N₂ fixation and Ti evaporation at optimum pressure for TiN coating by the vacuum arc deposition method", *Proc. of 2nd Asia-Pacific Conf. on Plasma Sci. & Technol.*, p.523 (1994)
- (4) 滝川・高松・榊原・鈴木:「AlN膜生成用真空アーク蒸着装置における放電変動の抑制」, 電学論A, **114**, 217 (平6-3)
- (5) 滝川・宮野・榊原:「圧力上昇に伴うグローからアークへの移行とアーク移行確率-圧力特性」, 電学論A, **115**, 1057 (平7-11)
- (6) 宮野・滝川・榊原・鈴木:「真空アーク蒸着装置における黒鉛陰極点の逆行速度」, 電学論A, **114**, 117 (平6-2)
- (7) P.D.Swift: "Macroparticles in films deposited by steered cathode arc", *J.Phys.D: Appl.Phys.*, **29**, 2025 (1996)

滝川 浩史 (正員) (電学論A, **117**, p.216 参照)
e-mail: takikawa@eee.tut.ac.jp

田中 邦泰 (学生員) 1972年12月3日生。95年3月豊橋技術科学大学電気・電子工学課程卒業。同年4月同大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻修士課程進学、現在に至る。

榊原 建樹 (正員) (電学論A, **116**, p.429 参照)