

液体材料送給時のプラズマ電極型溶射ガンの特性

山口大学工学部 大崎 堅, 藤本 聡, 福政 修
大阪大学接合科学研究所 小林 明

Performance of Plasma Electrode-type Spray Gun during Liquid Material Loading

Katashi OSAKI, Satoru FUJIMOTO, Osamu FUKUMASA
and Akira KOBAYASHI*

Faculty of Engineering, Yamaguchi University

*Joining and Welding Research Institute, Osaka University

Abstract

A newly designed plasma electrode-type spray gun, which can inject the spraying material into the center of the arc column, has been developed. In order to demonstrate the application feasibility of this plasma spray gun to thermal processing, the effect of liquid material loading on the characteristics of the arc and plasma jet was clarified. The liquid material was C_2H_5OH . It was found that the spray gun operated stably with liquid loading, and the jet power was effectively controlled by changing the arc current. It was clarified that this proposed new type plasma spray gun would be very useful device for various material processing.

Keywords : Plasma jet, Arc Plasma, Plasma spray gun, Plasma diagnostics

1. はじめに

プラズマジェットは高温・高速・高活性の熱プラズマ流であり、注入された粉末材料や液体、気体を原子状態まで分解した後、化学的・物理的反応によって新機能を有した材料を短時間で生成できる。最近では複合機能材料の創製等の材料プロセス¹⁾への応用が活発化している。このような新機能材料の創製に際しては、プラズマ流中のプロセス材料の熱的・機械的ふるまいの精密な制御が可能、すなわちプラズマ流の温度、速度等が容易かつ高精度に制御可能なプラズマジェット発生器と、プラズマ流中へ効果的にプロセス材料を注入できる送給口とを有するプロセス装置が必要となる。

このため著者は、アーク電流 300A以下において高出力でクリーンなプラズマジェットを制御性良く生成し、かつノズル内アークの一部がプロセスに活用できる交差電極型アークプラズマ発生器²⁾を熱源とした溶射ガンを開発し、材料プロセスへの適応性について検討を加えてきた^{3, 4)}。更に、ノズル内アーク全域の活用を目指し、この発生器の陰極も陽極と同様な構成配置とし、U字状アークによってプラズマジェットを生成するプラズマ電極型プラズマジェット発生器を開発した^{5~7)}。そして、この発生器の陰極側に材料送給口を設置した溶射ガンの粉末材料プロセス時における作動特性や飛行溶射粒子パラメータ(温度、速度、サイズ)、成膜された傾斜構造膜の組成と構造等を調べ、本溶射ガンが粉末材料プロセス装置として有効であることを明らかにした^{8~11)}。

本研究では、この溶射ガンの材料送給口をガス噴射による液体霧化方式のフィードパイ

プに変えた溶射ガンを試作し、液体材料送給時の本溶射ガンの電氣的・熱的特性、ジェット
の形状に及ぼす影響を調べ、液体材料プロセスへの適用性について検討した。

2. 実験装置及び方法

本溶射ガンは Fig.1 に示すように、プラズマ電極型プラズマジェット発生器のノズル後部に、溶射材料送給のためのフィードパイプをその中心軸線がノズル中心軸線に一致するように設置されている。プラズマ電極型プラズマジェット発生器では、直径 5mm の棒状の陽極（銅製）、陰極（2%トリウム入りタングステン）がノズル側壁に配置されている電極室（内径 10mm）に収められている。また、その電極室出口には軸長 1.5mm、内径 3mm または 4mm のリングが設置されており、電極点をノズル集束部すなわち主プラズマ生成域から完全に隔離する構造となっている。

ノズル（内径 8mm、銅製）は陽極室を持つ陽極支持部（軸長 22mm）、軸長 3, 5, 3mm の 3 個のディスク及び陰極室を持つ陰極支持部（軸長 22mm）に分割されており、各部分は厚さ 0.5mm の窒化ほう素板及びテフロン板で絶縁されている。また、両電極室には電極アーク柱に対し渦流を形成するガス流入口が、陰極支持部後部には主アーク柱をシース状に包んで流れる作動ガス流入口が設けてある。なお、陽極、陽極支持部、各ディスク、陰極支持部及び陰極は個別に水冷されており、各部熱損失を求めうる。

フィードパイプは、外管内径 1.4mm、内管内径 0.5mm（肉厚 0.15mm）の 2 重管であり、その先端が陰極中心軸より 4mm ノズル後端側に離れた位置にセットされている。従って、本溶射ガンでは、フィードパイプより送給される材料は、高温高压の U 字状アークの主アーク柱中心部に注入され、効果的な加熱、加速を受けながらノズルより噴射され、プロセス反応を完了する。

実験条件は、アーク電流 60~110A、作動ガス流量 50l/min、電極側アーク集束ガス流量 10l/min であり、液体材料としては純度 99.5%のエチルアルコール (C_2H_5OH) を用い、0.5~2.5g/min をアトマイズガス流量 7l/min で霧化してアーク柱に送給した。なお、ガスはアルゴンであり、ジェット発生雰囲気は大気中である。

Fig.2 は液体材料が注入されるアーク断

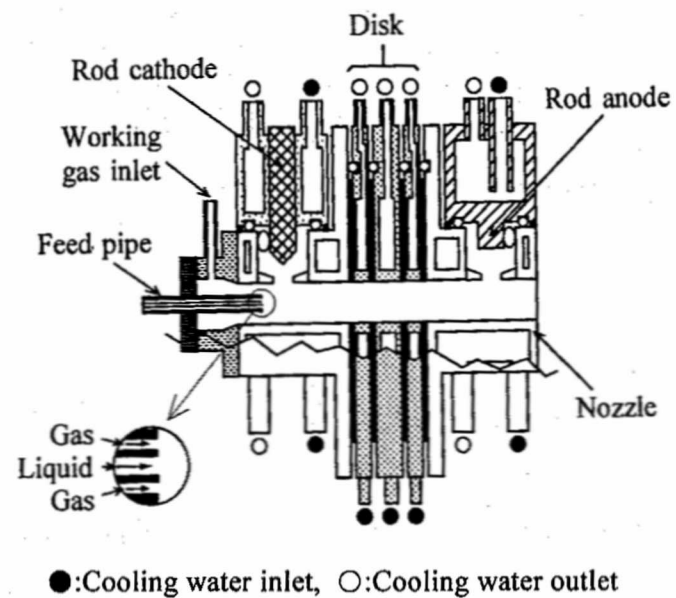


Fig.1 Sectional view of the electrode type plasma spray gun.

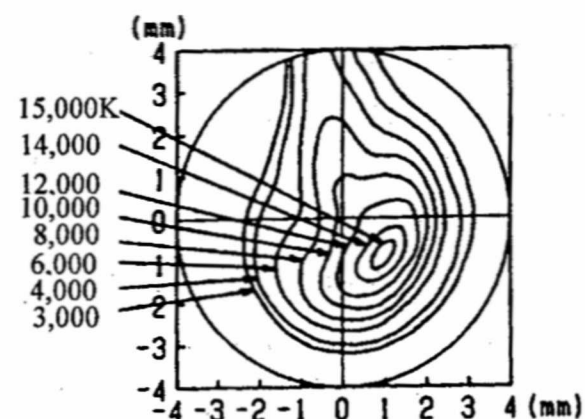


Fig.2 Temperature distributions of arc in nozzle cross section, where arc current is 100A.

面内温度分布の一例を示している。これは溶射ガン後部のフィードパイプをパイレクス製観測窓に置き換え、金属干渉フィルター（透過ピーク波長 965nm）付き CCD カメラで測定したものである。

等温線は陰極側アーク柱を含むため丸底フラスコ形状を呈しているが、電極間中央付近の主アーク柱断面内の等温線はほぼ同心円となっているものと推測される。主アーク柱軸線付近の温度は電流の増加とともに上昇し、最大 17,000K にも達する。

3. 実験結果と考察

3. 1 電気的特性

本溶射ガンのアーク電圧対電流の関係は Fig.3 のように正特性を示す。このような小電流領域において正特性を示すのは、電極点が固定されていることを考慮すると、主アーク柱電界強度の上昇及び電極側アーク柱の延伸によるものと考えられる。

アーク電圧は、液体材料を 0.5g/min 送給すると、7%程度と大きく上昇する。また、送給量の増加とともに電圧も上昇する。このような電圧の上昇は、アーク柱に対するアトマイズガス及び液体材料の冷却作用により生じたものと考えられるが、液体の気化時の冷却作用も加わっているものと思われる、更なる検討が必要である。また、送給時のアーク電圧は電流の増加とともに直線的に上昇し、しかもその上昇率が非送給時とほぼ同等であることより、液体材料送給によるアーク特性への悪影響はないものと見なしうる。

Fig.4 に液体送給時のアーク電圧波形の一例を示す。本溶射ガンでは陽極点及び陰極点は固定されているため、波形に現れる振動は主に主アーク柱の振る舞いによるものと見なしうる。

送給時の電圧波形は三角形状のパルスが間欠的に現れる継続振動モードを呈している。このパルスの周期は約 1.32ms と一定であるが、パルス幅は 1.18~0.27ms の範囲にあり、送給量の増加とともに減少し、送給量 2.0g/min を越えると 0.59~0.27ms とな

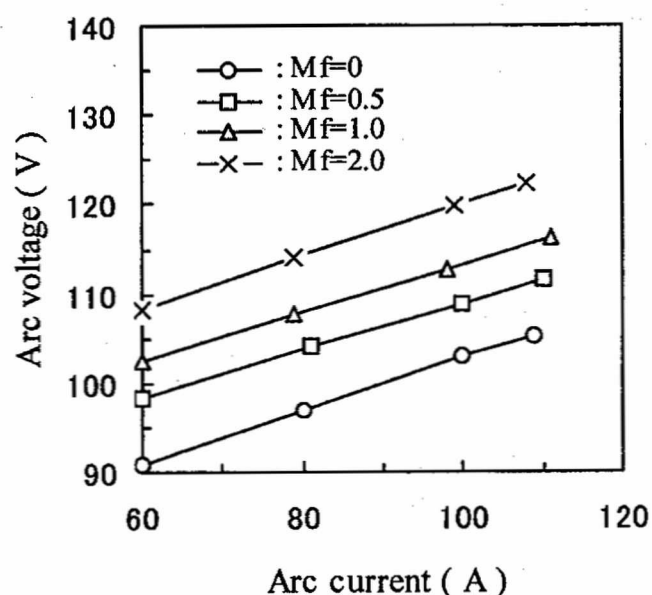


Fig.3 Arc voltage-arc current characteristics. Mf: C₂H₅OH feed rate (g/min).

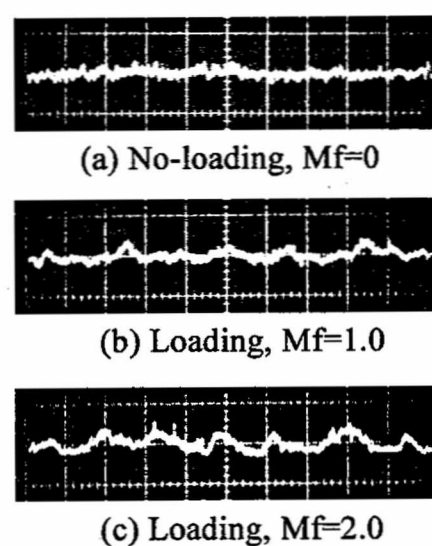


Fig.4 Oscillograms of arc voltage wave forms, where arc current is 100A. Mf: C₂H₅OH feed rate (g/min). Time scale: 1 msec/div., Gain: (a); 10 V/div., (b) (c); 20 V/div..

る。一方、波高値は6.4~12.7Vの範囲にあり、送給量の増加に伴い高くなる。しかし波高値の変動幅は送給量の増加とともに縮小し、2.0g/minで1.8Vと最も小さく、それを越えると増大する。これらより、霧化した液体は先づアーク柱に対し熱ピンチ作用を与えた後、アーク内に侵入して加熱、気化、分解、原子化され、更にプラズマ粒子との相互作用により荷電粒子や励起原子の生成・消滅を断続的に繰り返しながら、反応生成物を生成する過程が繰り返されているものと推察できる。特に、送給量が2.0g/min以下においては、送給された液体材料が効率よくプロセスされていると考えられる。なお、波高値は対応するアーク電圧の平均の16~23%に相当するが、振動が規則的であり、定性的にはアークは定常に維持されていると見なしうる。

3. 2 熱的特性

Fig.5は陽極、陰極、ノズル部における熱損失のアーク電流依存性を示す。陽極及び陰極での熱損失はそれぞれ390~870W, 280~450Wの範囲にあり、液体材料送給による電極熱損失への影響は認められない。一方、ノズル部損失は0.9~2.8kWと電極部のその約3倍に相当し、しかも液体材料を送給すると増加する。一例を示すと、アーク電流100Aで液体材料を0.5g/min送給した場合のノズル損失の増加量は350Wである。なお、各部熱損失は電流の増加とともにほぼ直線的に増加する。

液体材料送給時のジェット熱出力のアーク電流依存性を**Fig.6**に示す。ジェット熱出力とは、溶射ガンに投入される電気入力から各部熱損失を差し引いて求めた正味アーク入力のことである。送給時には、前述のようにノズル部熱損失が増加するが、その増加量は**Fig.3**に示すアーク電圧の上昇に対応するアーク入力の12~52%であるゆえ、ジェット熱出力は非送給時より最大21%大となる。

また、ジェット熱出力は低電流域であるにも関わらず4.2~9.1kWと大きく、電流の増加とともに直線的に上昇しており、アーク電流によって効果的に制御できることが分かる。なお、熱効率は68~73%であり、

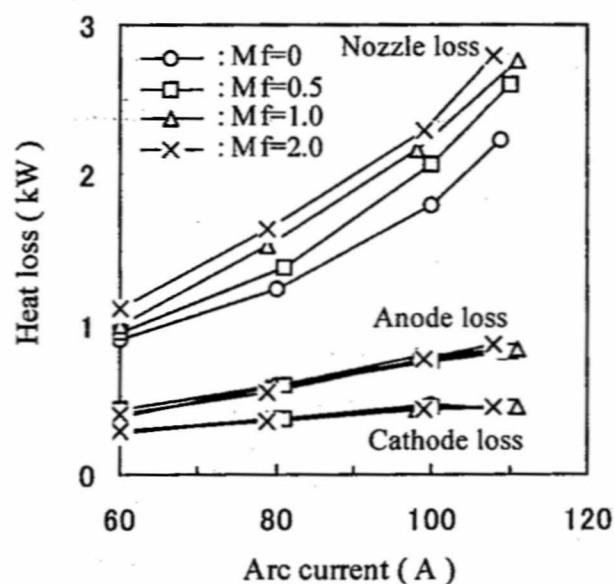


Fig.5 Heat loss versus arc current. Mf: C₂H₅OH feed rate (g/min).

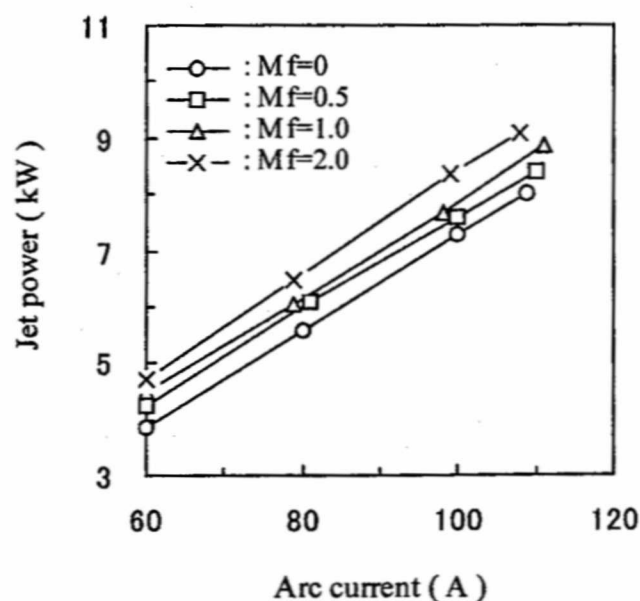


Fig.6 Jet power versus arc current. Mf: C₂H₅OH feed rate (g/min).

非送給時よりわずかに低下している。

3. 3 プラズマジェット

プロセス中のプラズマジェットの一例を Fig.7 に示す。プラズマジェットは前記のアーキ電圧振動を含むが概ね安定に維持されている。また、ジェットは軸線に対しほぼ対称な形状をしており、ジェット先端及び外周部に可視域短波長側の発光が認められる。この発光は、主アーキ柱中で気化、解離された粒子や生成された粒子の励起放射あるいは熱放射によるとと思われる。これらのことより、送給された液体材料は主アーキ柱内に一様に分散されアーキ及びジェット中において効果的に加熱処理されていることが分かる。

ところで、アーキに液体材料を注入すると電極のエロージョンによるプラズマ流の汚染を招くおそれがある。このため、アーキ電流 100A, 液体材料送給量 2.0g/min でのジェットからの放射スペクトルを調べた。300~580nm の波長域におけるそれを Fig.8 に示す。作動ガス並びにアトマイズガスであるアルゴンの中性粒子線 (Ar I) のほかにエチルアルコールの組成である炭素, 水素, 酸素から生成された粒子からの放射スペクトルが観測される。しかし、陰極材料であるタングステンの中性粒子線 W I 321.6nm, W I 400.9nm, 陽極及びノズルの構成材料である銅の中性粒子線 Cu I 324.8nm, Cu I 327.4nm, Cu I 510.5nm の線スペクトルは認められない。これより、ジェットは電極及びノズル構成材料によって汚染されていないことが示された。しかし、この結果は巨視的計測から定性的に判断したものであり、高品質プロセスに本溶射ガンを応用する際には、微視的計測より定量的な結果に基づいてプラズマ流の汚染度を判断する必要がある。

4. あとがき

プラズマ電極型溶射ガンに対し、液体材料としてエチルアルコールを送給した場合の本溶

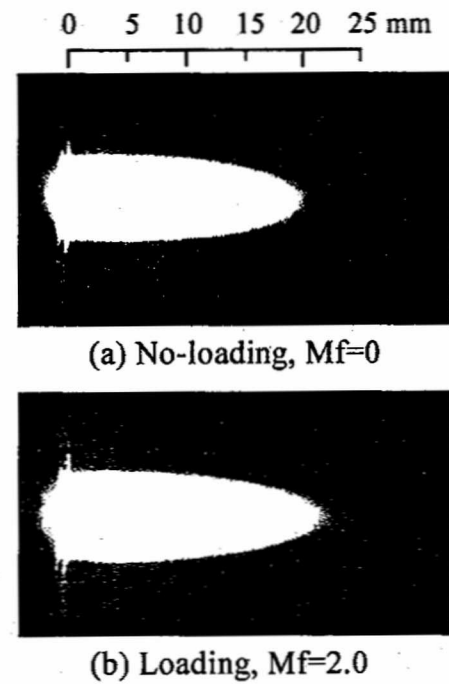


Fig.7 Photographs of the plasma jet, where arc current is 100A. Mf: C₂H₅OH feed rate (g/min).

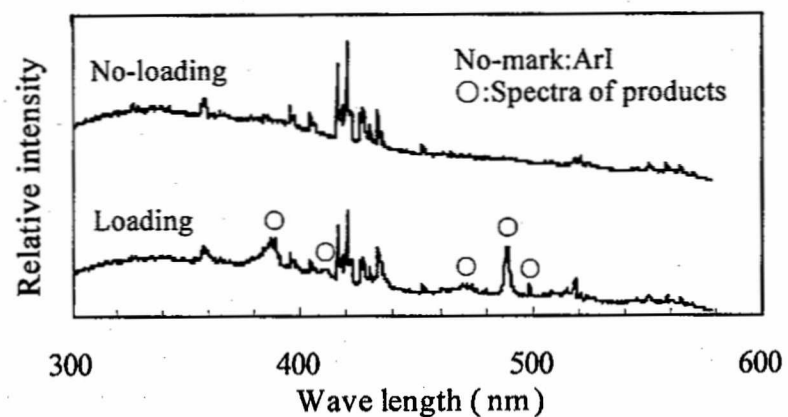


Fig.8 Emission spectra obtained from the plasma jet with C₂H₅OH loading, where arc current is 100A, C₂H₅OH feed rate 2.0g/min and measuring position (distance from the gun exit) 5mm.

射ガンの諸特性に及ぼす影響を調べた結果、次のことが分かった。

- (1) アーク電圧対電流の関係は正特性を示し、アーク電圧は材料を送給すると7%以上上昇する。
- (2) 材料送給時のアーク電圧は、三角形状のパルスに基づいた振動を継続的に繰り返している。その振動振幅は対応するアーク電圧の16~23%に相当するが、振動は規則的である。
- (3) 電極部における熱損失は材料送給量に依存しないが、ノズル部熱損は送給量の増加とともに増大する。
- (4) ジェット熱出力は、材料を送給しても低下せず、電流を増すにつれて直線的に増加する。
- (5) 熱効率は68~73%の範囲にあり、材料を送給すると僅かに低下する。
- (6) プロセス中のジェットは電極及びノズル構成材料による汚染もなく、かつ安定であり、軸対称である。
- (7) 本溶射ガンは液体材料プロセス用装置として有用である。

参考文献

- 1) 例えば 武田 紘一:「プラズマ溶射の最近の展開」, 電学論, Vol.114(1994), pp572-578.
- 2) 大崎 堅・福政 修・佐伯 節夫:「プロセッシング用高出力・低汚染アークプラズマ発生器」, 第3回粒子線の応用技術に関するシンポジウム, (1992), pp171-174.
- 3) 大崎 堅 他:「プロセッシング用高出力・低汚染アークプラズマ発生器—液体供給時のアークプラズマの特性」, 第5回粒子線の応用技術に関するシンポジウム, (1994), pp77-80.
- 4) 大崎 堅・福政 修・小林 明:「交差電極型プラズマ溶射ガン」, プラズマ応用科学, Vol.6(1998), pp78-83.
- 5) 大崎 堅 他:「プロセッシング用プラズマ電極型プラズマジェット発生器」, 平成6年度電気学会全国大会講演論文集, (1994), 2-p132.
- 6) 大崎 堅 他:「プラズマ電極型プラズマジェット発生器」, 山口大学工学部研究報告, Vol.46(1995), pp111-117.
- 7) 大崎 堅 他:「局所集束ノズルによるプラズマ電極型プラズマジェット発生器内のU字状アークの拘束安定化」, 山口大学工学部研究報告, Vol.48(1996), pp101-106.
- 8) K. Osaki et al.: "Application Feasibility of Plasma Electrode Type Plasma Spray Gun", Proc. ISAPS'97, Advances in Appl. Plasma Sci., (1997), pp61-66.
- 9) K. Osaki and O. Fukumasa: "Measurement of Velocity and Size of In-Flight Spraying Particles on Plasma Electrode Type Plasma Spray Gun", 12th Symposium on Plasma Sci, for Materials, (1999), p53.
- 10) 大崎 堅 他:「プラズマ電極型溶射ガンの Ti-Al 傾斜構造膜作製への適用」, 山口大学工学部研究報告, Vol.49(1999), pp239-244.
- 11) K. Osaki et al.: "Plasma Electrode Type Plasma Spray Gun—Effect of Powder Loading on the Behavior of Plasma Jet—", Proc. ISAPS'01, Advances in Appl. Plasma Sci., Vol.3(2001), p23-28.