

交差電極型プラズマ溶射ガン

山口大学工学部 大崎 堅, 福政 修
大阪大学接合科学研究所 小林 明

Study on Cross Electrode Type Plasma Spray Gun

Katashi OSAKI, Osamu FUKUMASA and Akira KOBAYASHI*

Faculty of Engineering, Yamaguchi University

*Joining and Welding Research Institute, Osaka University

A newly designed cross electrode type plasma spray gun, which is consisted of the cross electrode type arc plasma generator and the feed ring to inject the processing materials into the arc column, has been developed. The effects of the operating ambient pressure, the carrier gas injection and powder loading on the characteristics of the arc and plasma jet were studied experimentally. It was found that the jet power was effectively controlled by changing the arc current and that a stable and clean plasma flow was generated over a wide range of processing conditions. Therefore it was confirmed that this proposed new type plasma spray gun was very useful device for various plasma processings.

Keywords: Plasma jet, Arc, Plasma heat source, Plasma spray gun.

1. まえがき

高温, 高速, 高活性であるプラズマジェットは, 既に各種工業分野における熱源として応用されており, 最近では高融点材料の処理や複合機能材料の創製などの材料プロセス¹⁾への応用が活発化している。このような材料プロセスにおいては, プロセスにマッチした高品質のプラズマジェットを生成し得るプラズマ源が必要となる。

このため, 筆者らは陽極点をノズル出口に拘束する方式の強制伸長アーク形²⁾や伸張されたアークの一部に圧縮を加える方式の局所アーク圧縮形^{3, 4)}プラズマジェット発生器を開発し, プラズマジェットの安定, 高出力, 高制御化を計ってきた^{5, 6)}。しかし, これら熱プラズマ源を活性ガス雰囲気下や減圧下で使用すると, 電極, 特にノズル陽極に損傷が生じる場合がある。そこで, ノズルを陽極として動作させることを止め, ノズル集束部側壁に設けた電極室に絶縁して挿入した銅棒を陽極とする方式の交差電極型アークプラズマ発生器⁷⁾を開発し, 諸特性について明らかにしてきた。

本研究では, この発生器のアーク柱部にプロセス材料送給のためのフィードリングを設置して溶射ガンを構成した交差電極型プラズマ溶射ガンの動作特性, 特にジェット噴射場圧力, フィードガスおよびプロセス材料送給がアークの電氣的・熱的特性に及ぼす影響について調べ, 本溶射ガンの有用性について検討した。

2. 実験装置および方法

本研究に用いた交差電極型プラズマ溶射ガンは, Fig. 1 に示すようにノズル出口近傍の

交差電極室に収められている棒状の陽極、フィードリング、ディスク、円筒形アーク室の軸線上に保持されている棒状の陰極から構成されている。陽極は直径5mmの銅棒であり、その端面がノズル軸線から7mm径方向に離れた位置に保持されている。ノズルは銅製で内径6mm、軸長22mmの前面フラット形で、その前端より内部に9mm後退した位置に内径10mm、軸長8mmの交差電極室がノズル軸線に垂直に設けられている。なお、交差電極室にはガス流入口

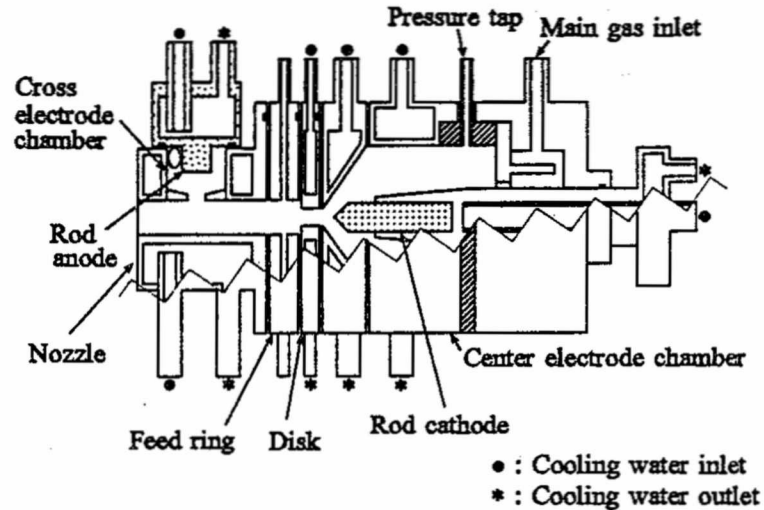


Fig.1 Sectional view of the cross electrode type plasma spray gun.

と圧力測定口が、またその出口には内径3mm、軸長1.5mm、入口テーパ7/2の集束リングが設置されている。ディスクは内径3mm、軸長3mmの銅製であり、陰極点およびセンタ電極室内アークの安定化に寄与する。陰極は先端を90度に削った直径5mmの2%トリウム入りタングステン棒で、ディスク入口とのギャップは2mm一定である。

フィードリングは内径6mm、軸長5mmの銅製であり、内径1.4mmの送給口4個を有し、それらは中心角90度で軸線に対し垂直に配置されている。

陽極、ノズル、フィードリング、ディスク、陰極部相互の絶縁には窒化ほう素とテフロンを用いた。各部分は流量2.5 l/minの冷却水を供給して冷却し、熱損傷を防止すると共に、それらの冷却水の温度上昇より各部熱損失を求めうる。

集束ガスは純度 99.99%のアルゴンをセンタ電極室および交差電極室に流入し、アーク柱に対し前者では軸流を、後者では渦流を形成させる。

動作条件は、ジェット噴射場圧力100および760Torr、アーク電流40~110 A、作動ガス(センタ電極室流入ガス)流量30および40 l/min、交差電極室流入ガス流量10 l/minである。プロセス材料は、粒径分布10~44 μ mの炭化チタン(TiC)粉末であり、フィードガス(アルゴン)流量0~20 l/min中に1g/minを混入して送給した。

3. 実験結果と考察

3.1 非プロセス時の特性

3.1.1 電气的特性 アーク電圧対電流の関係は、Fig.2のように上昇特性を示す。このような小電流領域において顕著な上昇特

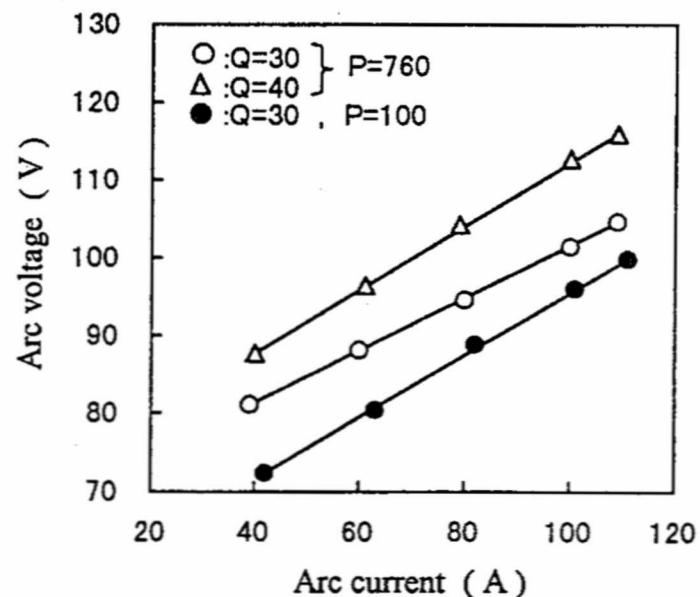


Fig.2 Arc voltage-arc current characteristics. Q:working gas flow rate (l/min), P:ambient pressure (Torr).

性を示すのは、電流の増加に関わらずアーク長が一定に保持されていることを考慮すると、アーク柱の膨張および導電率の増加が抑えられているゆえと考えられる。電圧上昇率はジェット噴射場圧力が760Torrの場合、作動ガス流量30および40 l/minに対しそれぞれ0.34および0.41V/Aである。一方、圧力100Torrにおける電圧上昇率は0.40V/Aであり、760Torrのそれより大である。また、圧力100Torrでのアーク電圧は72~100Vと760Torrのそれより5~9V低いが、減圧下においても器壁および集束ガスにより効果的にアーク柱が閉じ込められていることがうかがわれる。

なお、作動ガス流量30 l/minにおける交差電極室圧力は、ジェット噴射場圧力100, 760 Torrに対しそれぞれ390~690, 910~1,060Torrの範囲にあり、電流を増すとほぼ直線的に増大する。この傾向はアーク電圧電流特性とほぼ同様であり、アーク柱に投入される電気入力と圧力の関係が密接であることがわかる。また、減圧下でアーク電流が80A以上になると、交差電極室の圧力は500Torr以上を維持しており、電極の損傷がかなり低減され、汚染の少ないプラズマ流を生成していると推察される。

3.1.2 エネルギー収支 陽極およびノズル

における熱損失は Fig.3 に示すように、いずれもアーク電流の増加とともにほぼ直線的に上昇する。電流を伴う陽極熱損失はジェット噴射場圧力および作動ガス流量に依存せず290~800Wの範囲にあり、この値は計算値(電流に依存する項のみから算出)の約81%に相当し、アークからの熱流束分を考慮すると、交差電極室流入ガスによって陽極が効果的に冷却されていると見なしうる。一方、アークからの熱流束だけによって発生するノズル熱損失は、作動ガス流量には依存しないが、ジェット噴射場圧力が100Torrでは陽極熱損失の0.8~1.4倍、760 Torrで同じく1.1~1.6倍であり、減圧下で小となる。なお、陽極熱損失とノズル熱損失の和は溶射ガン全熱損失の84~90%を占めている。

Fig.4 にジェット熱出力とアーク電流の関係を示す。ここで、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ジェットへの入力である。ジェット熱出力は、電流の増加とともに直線的に増加し、ジェット噴射場圧

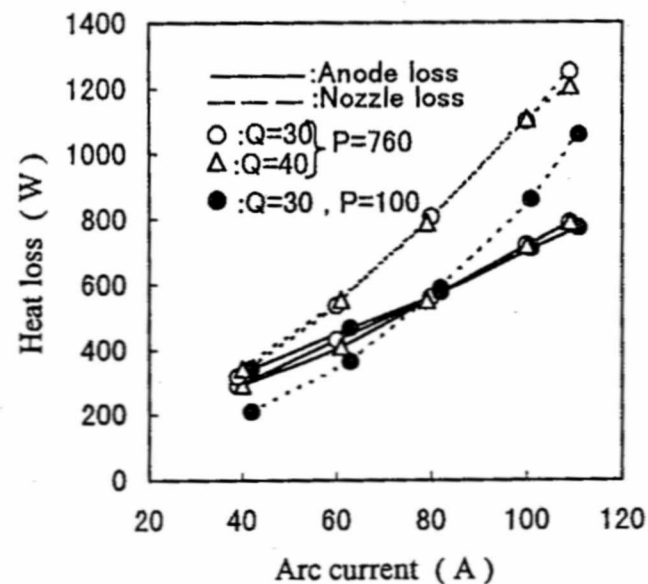


Fig.3 Heat loss vs. arc current. Q:working gas flow rate (l/min), P:ambient pressure (Torr).

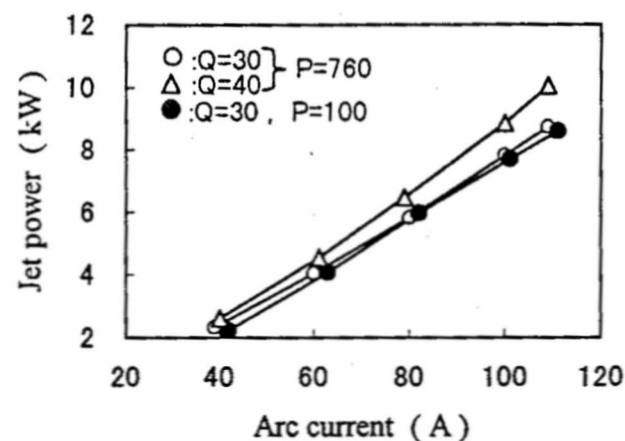


Fig.4 Jet power vs. arc current. Q:working gas flow rate (l/min), P:ambient pressure (Torr).

力が760Torrの場合、作動ガス流量30, 40 l/minでそれぞれ2.3~8.7, 2.7~10.0kW, 圧力100Torr, 流量30l/minで2.2~8.6kWであり、減圧下においてもジェットは高熱出力を維持している。

なお、熱効率はジェット噴射場圧力に依存せず、73~78%を維持しており、電流増加とともにわずかに低下する傾向を示す。

これらのことより、本溶射ガンは広い動作範囲においてアーク特性を悪化させることなく有効な入力を得られることがわかった。

3.2 プロセス時の特性

ここでは、ジェット噴射場圧力760Torr, 作動ガス流量30 l/min, アーク電流100Aで作動中の本溶射ガンにフィードガスおよび粉末材料を送給した場合の諸特性を述べる。

3.2.1 一般特性 アーク電圧およびジェット熱出力のフィードガス流量依存性を Fig.5 および Fig.6 に示す。アーク電圧はガス流量の増加とともに上昇し、その上昇率は、フィードガスのみ送給した場合にはガス流量が10 l/min以下では0.48V/(l/min)であるが、10 l/min以上では0.38~0.32V/(l/min)に低下する。また、この傾向は、粉末を送給した場合も同様であり、0.29V/(l/min)から0.18

V/(l/min)に低下している。このような低下は、ノズル内に効率良く閉じ込められているアーク柱が過大なフィードガスによって局所的に破壊されたために生じたものと推測される。しかし、アーク電圧の増加量も8%以下であり、アークは概ね安定に維持されていると考えられる。

フィードガスを送給するとノズル熱損失のみ最大150W減少し、また、前述のようにアーク電圧が増加するため、ジェット熱出力とフィードガス流量の関係は Fig.6 に示すようにアーク電圧のフィードガス流量依存性とほぼ同様な傾向を有している。したがって、フィードガス流量が10 l/min以下でのジェット熱出力は、プロセス時において8.05~8.29kWと非プロセス時の2~5%増であり、フィードガスおよび粉末送給がアークの熱的特性に及ぼす影響は微弱であると見なしうる。

3.2.2 アークモードとプラズマジェット アーク電圧波形には Fig.7 に示すように、常にランダムな振動を含んでいる。本溶射ガ

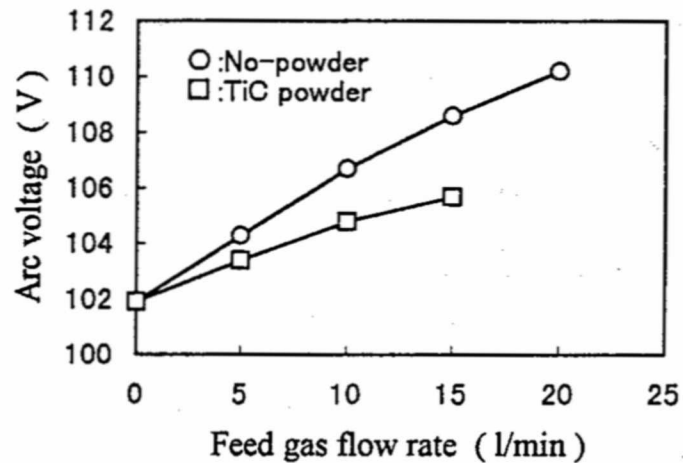


Fig.5 Arc voltage vs. feed gas flow rate. Conditions are as follows; Operating gas flow rate is 30 l/min, arc current 100 A and ambient pressure 760Torr.

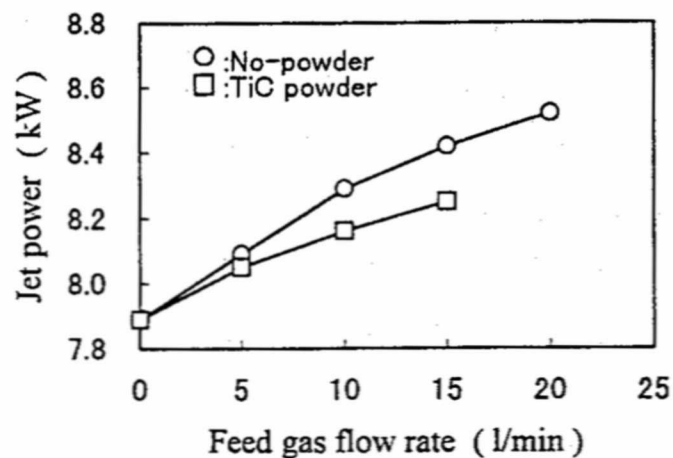


Fig.6 Jet power vs. feed gas flow rate. Conditions are as the same as ones in Fig.5.

ンでは陽極点および陰極点は固定されているゆえ、アーク電圧波形に現れる振動は主にノズル内アーク柱のふるまいによると見なせる。電圧振動振幅は2.0~9.2Vの範囲にあり、対応するアーク電圧の平均の1.2~8.3%に相当し、フィードガス流量の増加に伴って増し、10 l/min以上になると急増する。電圧振動振幅が急増する領域は前記のアーク電圧の上昇が飽和する領域と一致し、過大なフィードガス流量はノズル内アーク柱の空間的、熱的ゆらぎを増加させることとなり、アークの安定性が阻害されていることになる。また、振動周波数は14~22kHzの範囲にあり、フィードガス流量の増加並びに粉末の送給により増加する。

本溶射ガンによって得られるプラズマジェットは、前記のアーク電圧振動を含むが Fig.8(a)に示されるような形状を呈し、概ね安定に維持されている。ジェット長はフィードガス流量を0から10 l/minに増加すると1.1mm, 10から20 l/minに増加すると2.2mm短縮する。一方、ジェット径は上記に対しそれぞれ0.15mm, 0.30mmとわずかに膨張しており、フィードガス流量がジェット形状にも大きく影響していることがわかった。

送給された粉末はアーク並びにジェット内で加熱、溶融され Fig.8(b), (c)に示すようにジェット軸線に対し対称的に噴射されており、ジェット先端から50mm離れた位置までの軸線付近では粉末の熱放射による可視全域の発光が、また、それ以外の領域では可視域長波長側の発光が認められ、効率よく粉末加熱が行われていることがわかる。また、本実験範囲内の陽極損傷は認められず、陰極損傷量も0.114 mg/hと極く微量であり、クリーンなアークおよびジェット中でプロセスが行われていると見なしうる。

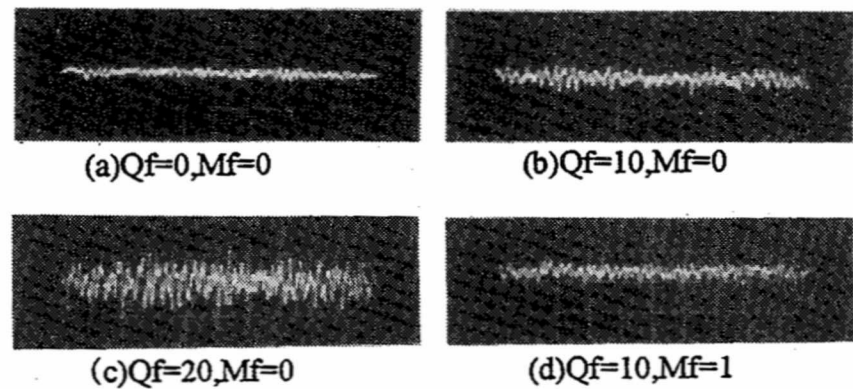


Fig.7 Oscillograms of arc mode. Conditions are as the same as ones in Fig.5. Qf: feed gas flow rate(l/min), Mf: Ti powder feed flow rate(g/min), time scale:0.5ms/div., gain:5V/div..

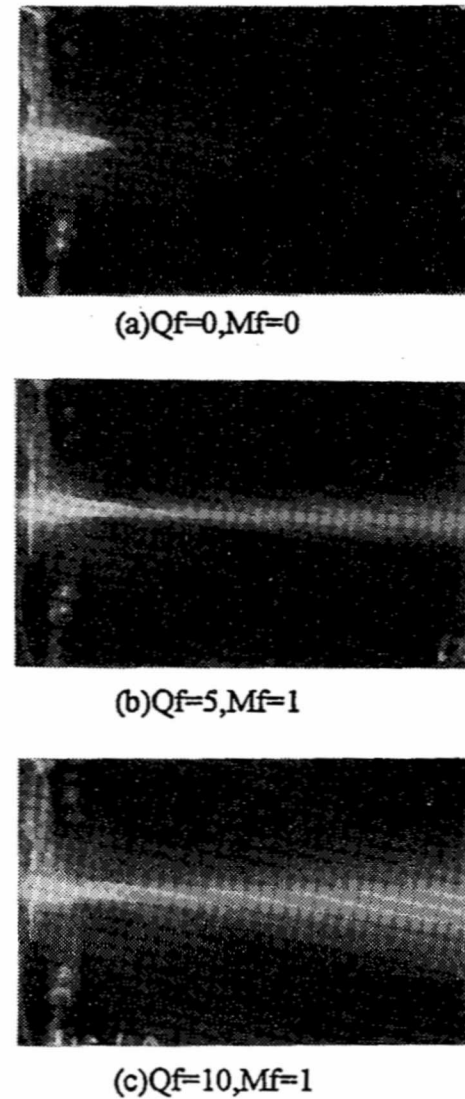


Fig.8 Photographs of the plasma jet with Ti powder loading. Conditions are as the same as ones in Fig.5. Qf: feed gas flow rate (l/min), Mf: Ti powder feed flow rate(g/min).

4. あとがき

アーク柱の一部が材料プロセスに利用可能な交差電極型プラズマ溶射ガンの作動試験を行った。その結果を要約すると、次の通りである。

- (1) アーク電圧対電流の関係は上昇特性を示し、アーク電流によりジェット熱出力を効果的に制御できる。
- (2) 溶射ガンの熱効率はジェット噴射場圧力に依存せず73~78%であり、減圧下におけるジェット熱出力も最大8.6kWと高熱出力を維持している。
- (3) フィードガスによりアークおよびジェットに劣化を生じない送給流量は10 l/min以下であり、また、この適正流量でプロセス材料を送給した場合もアーク特性に悪影響を受けることなく、安定したアークおよびジェットが維持されている。
- (4) プロセス材料はノズル内アークおよびジェット中で効果的に加熱・溶融され、ノズルより対称性良く噴射されている
- (5) プロセス時における陽極損傷は認められず、陰極損傷量は0.114mg/hと極く微量であり、クリーンなアークおよびジェット中でプロセスが行われている。

以上より、本溶射ガンは材料プロセスに有効な装置であることが明らかになった。また、本溶射ガンはノズル出口にプロセス材料送給用フィードリングを設置することができるため、溶射ガンとしてだけでなく各種材料プロセス用装置としても有効と考えられる。

謝辞:本研究は大阪大学接合科学研究所において共同研究員として行った中の一部であり、関係各位の方にあつく謝意を表する。

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A, Vol. 114, pp572-578(1994)
- 2) 大崎 堅・福政 修・佐伯節夫:電気学会プラズマ研究会資料, EP-90-101, pp41-49(1990)
- 3) S.Saeki, K.Osaki et al.:"Plasma Generator For Processing in Reduced Pressure-Local Wall Constricted Type-", *Proc.10th Symp. on ISLAT'86 Tokyo*, pp149-152(1986)
- 4) S.Saeki, K.Osaki and O.Fukumasa:"A Multipurpose Thermal Plasma Generator For Processing", *Proc. 8th Int. Symp. on Plasma Chemistry*, Vol.4, pp2259-2264(1987)
- 5) 大崎 堅 他:「渦流集束型ノズルを持つプラズマジェット発生器の動作特性」,プラズマ応用科学, Vol. 2, pp58-63(1994)
- 6) 大崎 堅 他:「絶縁集束型プラズマジェット発生器におけるノズルアークの特性」,プラズマ応用科学, Vol. 4, pp28-33(1996)
- 7) 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, pp171-174(1992)