溶射技術の最近における進歩

岡 根 功*

1. ま え が き

エネルギー、資源、環境等に係わる社会的、経済的諸問題並びに科学技術の進歩に対処するため、各種機器類の高効率、高性能および多機能化が指向されている。このような情勢下において、優れた性能・機能を有する材料の開発・実用化が極めて重要な役割を担っていることはいうまでもない。現在までに、この時代の要請に即応すべく多くの高性能・多機能材料が開発されてきた。しかし、これらのうち、従来の加工技術では製品化が困難であるとの理由のみで、製品として優れた性能・機能が十分に発揮されないまま放置されている材料も数多くある。これには、合せ材、表面被覆材、複合材料といった二種以上の材料の特長を有機的に組合せた複合部材に対処するのが、現状で最も妥当な手段であろう。

近年、機器部材の耐食性、耐熱・断熱性、耐摩耗性、耐焼付性、電気絶縁性等の諸性能向上を目的とした表面被覆法が各種産業界より注目され、新しい表面被覆技術が種々開発されている。金属部材表面への被覆法として、拡散浸透法、肉盛溶接法、PVD・CVD法、溶射法等種々の方法がある。これらは、対象物の形状、寸法、要求性能、さらに経済性をも考慮して、適宜選択されるべきものである。

上述の各種表面被覆法のうち、溶射法は、適用材料の種類および対象物の形状・寸法に制約されず、さらに成膜速度も極めて高いこと等から、特にセラミックスと金属とを組合せた複合機器部材の創製に対する有力な加工手段であるとされ脚光を浴びている。現在、下記に挙げる分野でセラミックス溶射皮膜が適用されている。

(1) 電気絶縁用

気孔率の低いほど耐電圧が高い。溶射粒子の微粒化のみでは気孔率の低減は図れない。溶射粒子の飛行速度を高めることも必要。

(2) 遠赤外線用

加熱温度波長域での放射率が高い溶射材料を選択。

(a) 長波長域で黒体に近い放射特性を示す材料

ジルコン ($\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$)、コーディライト ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$)、チタニア (TiO_2) 等

(b) 全波長域で黒体に近い放射特性を示す材料

酸化第二鉄 (Fe_2O_3)、酸化コバルト (CoO)、二酸化マンガニン (MnO_2) 等

を使用する。高温耐酸化性合金のアンダコートが必要。

(3) 高温断熱用

低熱伝導性、基材に近い熱膨張・高温で安定な溶射材料を選択。多層皮膜、混合皮膜、漸変皮膜(傾斜機能皮膜)等皮膜の積層形態が重要。

(4) その他

セラミックスが有する優れた耐熱および断熱性、耐摩耗性、耐食性、耐火および防音性、機能性、色彩等と溶射皮膜の特長を生かした用途へ適用。例えば

① 建築関係：耐熱・断熱性、耐食性、防音性、色彩および多種少量生産型加工法を利用。

② 窯業関係：色彩および多種少量生産型加工法を利用。

③ 電気・電子関係：燃料電池、太陽電池、熱電素子、発光体素子等。

* 豊橋技術科学大学教授；生産システム工学系(〒441 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

Recent Advances in Thermal Spraying Technology; Isao Okane (Toyohashi University of Technology, Toyohashi)

Keywords: thermal spraying, direct current plasma spraying, radio frequency plasma spraying, hybrid plasma spraying, mechanically alloyed powder, composite sprayed coating, high velocity oxygen fuel flame spraying system

1994年2月2日受理

④ 触媒関係：基材と触媒層との中間層として溶射皮膜を適用。自動車の排ガス浄化⁽¹⁾および食品加工関連産業への適用。

本稿では、溶射皮膜形態の概要を述べた後、特に、金属/セラミックス複合溶射皮膜並びに微細・薄膜溶射皮膜の作製法、さらに最近の新しい高性能溶射装置の開発の状況等について概説する。

2. 溶射皮膜の形態

(1) 溶射皮膜の積層状況

溶射皮膜は、ガス燃焼炎、またはアーク等の電氣的エネルギーによって、熔融、あるいはそれに近い状態に加熱されて高速で飛行する溶射粒子を被加工素材表面に連続的に吹付けて積層することによって形成される。したがって、得られた溶射皮膜は、素材表面に吹付けられた溶射粒子が互いに重なり合い、それぞれの粒子境界部には微小空隙が存在する等複雑な積層形態を呈する。図1⁽²⁾は、溶射皮膜の積層過程を模式的に示したものである。高温・高速の熱気流によって、熔融、またはそれに近い状態に加熱され飛行する溶射粒子(1)の表面は、熱気流中に巻き込まれた空気による酸化物層(2)で覆われている。これらの溶射粒子が予めサンドブラスト等

図1 溶射皮膜の積層状況。

(1)溶射粒子、(2)酸化物層、(3)粒子の跳ね返り、(4)粒子間に閉込められた酸化物、(5)複数粒子の接合部、(6)未熔融溶射粒子、(7)積層粒子間の微小空隙、(8)閉込められたガスによる微小気孔、(9)粗面化された素材表面。

によって粗面化された素材表面(9)に衝突して図示のように素材表面の凹凸に沿って付着する。この付着粒子上に後続の飛行溶射が次々と衝突・付着・積層を繰返しながら、複雑な溶射皮膜が形成される。図中(3)は衝突時の溶射粒子の跳ね返り、(4)は跳ね返り時に破裂した溶射粒子表面の酸化物が積層粒子間に閉じ込められた状態、(5)は衝突時に一緒に跳上がった複数の溶射粒子の一部が接合された部分、(6)は未熔融溶射粒子、(7)は積層粒子間の微小空隙、(8)は閉じ込められたガスによる微小気孔をそれぞれ示している。

(2) 溶射粒子の付着状態

溶射粒子は、熔融状態で素材表面に激突し、予め粗面化された素材表面の凹凸に沿って付着・凝固する。したがって、局部的に接合される箇所もあるが、溶射粒子/素材および積層粒子間には、主として、付着後の粒子の冷却に伴う収縮力によって機械的に結合されている。

3. 複合溶射皮膜の作製

金属/セラミックス複合溶射皮膜を作製するには、現在までに、(1)混合溶射材料による方法、(2)セラミックス基複合溶射材料による方法および(3)MA法により作製された複合溶射材料による方法等が考案されている。

(1) 混合溶射材料による方法

溶射材料の混合には、下記の4方法が考えられ、適用材料の性状(形状・寸法、比重、融点、流動性等)の相違により、それぞれ一長一短あり、均質な金属/セラミックス複合溶射皮膜を作製するための適性溶射条件の設定が極めて困難である。

(i) 混合材料を用いる方法

所定の比率に調合された金属/セラミックス混合粉末材料を単一の粉末送給装置で溶射トーチへ供給して複合溶射皮膜を作製する方法である。この方法では、混合されたそれぞれの材料の形状や流動性の相違により、長時間所定の混合比を維持した状態での定量送給が極めて困難であり、均質な複合皮膜が形成され難い欠点を有する。

(ii) 送給経路上での混合法

複合溶射皮膜構成材料をそれぞれ専用の粉末送給装置を用いて所定の混合比率になるように送給量をそれぞれ制御しつつ送給し、溶射トーチへの供給直前で混合して複合溶射皮膜を作製する方法である。性状の異なる材料を同一条件で熱気流中へ混合材を供給するため、適性な溶射条件の選定が極めて困難で高品質複合溶射皮膜が形成し難い。

(iii) 熱気流中での混合法

複合溶射皮膜構成材料をそれぞれ専用の粉末送給装置を用いて所定の混合比率になるように送給量をそれぞれ制御しつつ熱気流中へ直接供給して複合溶射皮膜を作製する方法であ

る。複合皮膜構成材料の物性値、特に融点の高低により、熱気流への供給位置を多少変えることにより、上述(ii)の方法よりも品質良好な複合皮膜の形成は可能であるが⁽³⁾、適性溶射条件の選定が困難である。

(iv) 複数の溶射トーチによる法

複合溶射皮膜構成材料をそれぞれ専用の溶射トーチを用いて所定の混合比率になるようにそれぞれの粉末送給量を制御しつつ素材上へ複合皮膜を形成する方法である⁽⁴⁾。皮膜構成材料それぞれに適した溶射条件が単独に選択し得る利点を有するが、複数の溶射装置が必要なため設備費高となり、また、複数の材料に対する溶射条件の組合せに関する基礎資料が皆無である等解決すべき多くの問題を抱えている。

(2) セラミックス基複合溶射材料による方法

前節の混合溶射材料による方法では、混合材料の諸物性値が異なることから均質な金属/セラミックス複合溶射皮膜の作製し得るための適性な溶射条件設定が極めて困難である欠点を有する。この改善策として、両者の混合焼結体を粉碎した複合材料、あるいはセラミックス粒子表面を金属質で被覆した複合材料を用いる方法が考えられる。前者の方法では、個々の粉碎複合粒子が設定した混合割合で作製される確率が極めて低く、いずれかの成分が設定割合より多い粉碎複合粒子が作製される傾向にある。また、還元され易い金属酸化物と還元され難い金属酸化物粉末とを混合・焼結・粉碎した後、還元処理で複合材料を得る方法(特公昭55-22521)も提案されている。しかし、この方法では、製造工程が極めて複雑であり、しかも金属酸化物粒子の全表面を金属質で覆うことは困難である。

一方、セラミックス粒子表面を金属質で被覆する方法として、メッキ法が考えられるが、この方法で作製された複合材料では、ぬれ性が不良であるため、溶射飛行中に表面の金属が凝集して液滴を形成し均質な複合溶射皮膜は形成し難い。これらの欠点を改善した方法として、セラミックス基複合溶射材料(米国特許4447501)がある。

この方法は、セラミックス粒子表面に金属皮膜を化学結合によって固着させた複合粒子材を溶射して、均質なセラミックス/金属複合溶射皮膜を作製する方法である。その作製法を図2に示す。この方法で作製した $ZrO_2 \cdot MgO/NiO/Ni$ 複合材料を用いて溶射皮膜を作製して性能を評価した結果、セラミックス単体の場合に比して皮膜の密着強度が向上することが確かめられている⁽⁵⁾。また、この複合材料による溶射皮膜は、溶射後の焼結処理や加圧焼結処理⁽⁶⁾に対して有効である。

(3) MA 複合溶射材料による方法

溶解法で合金を作製する場合、元素の組合せに対してかなりの制約がある。MA法では、溶解に伴う諸現象が皆無となるため、元素の組合せに対する制約が緩和される。図3に

図2 セラミックス基複合溶射材料の作製法。

図3 MA 複合溶射材料の作製法。

本方法による金属/セラミックス複合溶射材料の製造プロセスを示す。この溶射材料により、比較的均質で微細構造の複合皮膜作製が可能であることが確かめられている⁽⁷⁾。しかし、高温・高速で飛行する間に熔融したMA複合溶射粒子内において、金属/セラミックス間のぬれ性並びに比重差により、図4に示すような元素分離が生じ、図5に示すような機構で不均質な皮膜が形成されるため、適性な溶射距離を設定することが必要である。この元素分離抑制には、セラミックスと金属との間にスピネル構造を有する中間層の形成が重要であると考え、金属の酸化物を適量添加する手段が考案され、その有用性が明らかにされている⁽⁸⁾。

また、MA複合粉末の直流アークプラズマ溶射による固体電解質型燃料電池用 $Ni/ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ 燃料極作製の可能性も見出だされている⁽⁹⁾。

4. 微細・薄膜溶射皮膜の作製

通常、電子部品を配置するセラミックス基板への配線は、ペースト状粉末をプリント・焼結する法、PVD, CVD, スパッタリング法およびメッキ法等によって作製されている⁽¹⁰⁾。

Cu/Al₂O₃ MA 複合溶射粒子 Cu/AlN MA 複合溶射粒子

図4 溶射中におけるMA複合溶射粒子の元素分離状況。

これらの方法のうち、焼結法は製造工程が極めて煩雑であり、また、それ以外の薄膜形成法では比較的簡単に緻密で高品質な皮膜が得られる反面、成膜速度が極端に低い等の短所をも有している。一方、溶射法は高成膜速度を特長とするが、一般に使用されている溶射トーチおよび粉末送給装置では局所的な微小部分への積層に対しては付着効率が極めて低く、さらに1~2 μm以下の微粉末に対する溶射トーチへの定量送給が不可能であり、したがって、厚さ5 μm程度の緻密な薄膜作製が困難であること等の理由で、従来、溶射法の

微細・薄膜作製への適用は不可能であるとされていた。

近年、1~2 μm以下の微粉末の定量送給が可能な粉末送給装置並びに小出力プラズマ溶射装置が開発され⁽¹¹⁾、溶射法の微細・薄膜形成に対する開発研究が実施されている。

図6⁽¹²⁾は、最大5 kWの小出力プラズマ溶射トーチと微粉末送給装置を用いて、13.3 kPaの減圧下で粒径1~2 μm程度の純銅微粉末と比較のために、通常の溶射用純銅粉(粒径:10~20 μm)をアルミナ基板上に溶射した場合の皮膜断面組織を示したものである。得られた皮膜の断面組織について、画像解析装置により気孔率を測定した結果、通常の溶射用粉末で作製した皮膜の気孔率が平均3.03%(標準偏差:1.33)であるのに対し、微粉末での場合は平均1.08%(標準偏差:0.00816)で極めて緻密で均質であった。また、皮膜表面粗さを十点平均粗さ(R_z)で測定した結果を図7⁽¹²⁾に示す。この結果、微粉末による皮膜表面はかなり平滑であることが窺える。このような純銅皮膜の気孔率や表面粗さの相違は皮膜の諸性能、例えば、電気比抵抗やプリント配線への適用等に対して、著しく反映されるものと思われる。

図8⁽¹²⁾は、一定圧力下(13.3 kPa)で溶射距離を変化させて作製した皮膜の四端子法により得られた電気比抵抗を示したものである。図中比較のため、溶製純銅材および出力30 kWプラズマ溶射トーチを用いて作製した微粉末での皮膜の結果を併記した。この結果より、5 kWトーチで作製した皮膜では、通常粉よりも微粉末で作製した皮膜が電気比抵抗並びにそのばらつきが小さく電気的性能に優れていることがわかる。微粉末を出力30 kWプラズマ溶射トーチを用いて作製した皮膜は低い電気比抵抗を示したがアルミナ基板上に微細パターンを作製するのに不可欠なマスキング材がプラズマ気流の熱で変質し、微細パターンの作製が不可能となる欠点を有する。

図9⁽¹²⁾は、予めフォトリソによりファインラインパ

図5 溶射中におけるMA複合溶射粒子(Cu/Al₂O₃)の元素分離機構。

溶射雰囲気圧力：13.3 kPa

(a) 微小粉末(粒径：1~2 μm)
溶射距離：60 mm
出力 5 kW プラズマトーチ使用

(b) 通常粉末(粒径：10~20 μm)
溶射距離：100 mm
出力 30 kW プラズマトーチ使用

図6 微粉末による溶射皮膜断面.

図7 微粉末による溶射皮膜の表面粗さ.

図8 微粉末による溶射皮膜の電気比抵抗.

図9 微粉末の溶射で作製した微細線状皮膜.

ターン(幅 50 μm ，長さ約 30 mm)を形成したアルミナ基板上に膜厚 10 μm の溶射皮膜を作製した場合の皮膜断面および表面を示したものである．パターンエッジ断面はシャープであり，皮膜表面も比較的平滑であることが認められる．この結果，微粉末のプラズマ溶射は微細加工に優れていることが判明した．これに対し，通常の溶射用粉末材料では同サイズの微細パターンの作製は不可能であった．

上述の微粉末による溶射皮膜の密着強度を基板表面粗さと対比させて評価するために，①脱脂処理のみ(①処理材と称す)，②フッ酸/硝酸溶液による表面エッチング処理(②処理材と称す)，③ガラス質を多く含むアルミナ基板に②同様な表面エッチング処理(③処理材と称す)の3種類の前処理をアルミナ基板表面に施し，その上に銅皮膜を形成した試験片についてピールテストを実施した．ピールテストは，アルミナ基板上に形成した一辺が 2 mm の正方形純銅皮膜に $\phi 0.6$ mm 鋼線をハンダ付して実施した．各皮膜とも 5 本以上の試験片による結果の平均値で密着性を評価し，下記結果を得た⁽¹²⁾．

- (1) ①処理材：2.25 kN/m(標準偏差0.858)
- (2) ②処理材：4.19 kN/m(標準偏差1.27)

(3) ③処理材：11.5 kN/m (標準偏差2.90)

上記の試験結果は、基板表面の粗さが皮膜の密着性向上に大きく寄与していることを示している。実用化に対して、この程度の強度では心許ないと思われるので皮膜密着強度改善法として、(1)アルミナ基板上にスピネル層を介して銅溶射皮膜を形成させるスピネル法、(2)純チタンを下地層として薄く溶射し、その上に銅溶射皮膜を形成させる活性金属法に対する検討がなされている。いずれの方法も溶射後に適切な条件で熱処理を施すことにより皮膜の密着強度が向上されることが確かめられている⁽¹³⁾。

5. ハイブリッド溶射法

溶射には2種の熱プラズマ流が使用されている。一般的に用いられている直流アークプラズマ流は、高速であるため飛行する溶射粒子に大きな運動エネルギーを与える効果を有する反面、高温プラズマ域が極端に狭いため溶射粒子が未溶融のままの状態素材表面に積層されることもあり、皮膜の密着力並びに緻密性を低下させる恐れがある。一方、高周波プラズマ流は、低流速で大気中でも広範囲な高温プラズマ域を有することから飛行溶射粒子の完全な溶融が可能となり緻密性の高い皮膜が得られるが、溶射粒子に与える運動エネルギーが小さいため、これが皮膜の密着性を低下させる原因となる。これら両者の欠点をそれぞれの長所で補い合うため、直流アークプラズマ流に高周波プラズマ流を重畳させた複合プラズマ流を溶射用熱源としたハイブリッド溶射法が開発されている。図10にハイブリッド溶射トーチの概略を示す。この溶射法を直流アークプラズマ溶射法では良好な皮膜作製が極めて困難とされていたLaCrO₃材の溶射皮膜作製に適用し歩留り良好な緻密な皮膜が得られる可能性が見出されている⁽¹⁴⁾。

図10 ハイブリッドプラズマ溶射トーチ。

6. 反応プラズマ溶射

超高温のガスプラズマ流が有する高い反応性を利用して、プラズマ流中で飛行溶射素材を反応させ、溶射中における熱分解や相変態等の材質変化のため、溶射への適用が不可能とされていた材料の皮膜作製、または新しい機能性を有する皮膜の創製を図るものである。

高周波プラズマ溶射法による金属間化合物基複合皮膜作製の可能性が見出されている。また、MA法により金属間化合物構成元素を適切な比率で組合せ作製した複合材を用いた金属間化合物基複合皮膜作製法も開発されている⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

純チタン粉末を溶射材とし、窒素/アルゴン混合ガスを使用したハイブリッド溶射法でステンレス鋼板上に窒化チタン皮膜を作製するための基礎研究がなされている。この研究により、窒化物生成は、溶射雰囲気中の窒素分圧に依存すること、溶射粉末材の窒化反応は基板上への堆積後に顕著に生じること、溶射時の基板温度は窒化物生成に対する重要な制御因子であること等が明らかにされている⁽¹⁷⁾。この実験結果に基づいて、引続き窒化チタン皮膜の生成機構を解明するための基礎研究が高周波プラズマ溶射装置を用いて実施されている⁽¹⁸⁾。

炭酸ガスレーザを熱源とし、純チタンワイヤを溶射材としたレーザ溶射において、窒素ガスを補助ガスとした場合、適切なガス圧、ガス流量およびワイヤ送給速度を選定することで窒化チタン皮膜作製の可能性が確認されている⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。

水素ガス、メタンガスおよびアルゴンガスをプラズマガスとし、直流アークプラズマ装置を用いて、ダイヤモンドを合成し、これを基板上に高い成膜速度で積層する方法が開発されている。適切なガス混合比、流量並びに溶射条件(電流、電圧、雰囲気圧力、基板温度等)を選定することで、0.27 μm/sの成膜速度で皮膜が形成されると報告されている⁽²¹⁾。

優れた特性を有していながら、難焼結・溶射材であるため、工業的な利用が極端に限定されている二硫化チタン(TiB₂)の溶射皮膜作製法に関する検討が行われている。本法では、アルゴン/ヘリウム混合ガスをプラズマガスとした直流アークプラズマ溶射法により、乾式摩砕ミルを用いてチタンと硼素を機械的に複合化して作製した複合溶射材を高温プラズマ流中で硼化反応を促進させながら、鋼板およびアルミ合金板上にTiO₂皮膜を形成する方法である。適切な硼素/チタンの混合比、溶射条件を選定により、優れた性能を有するTiO₂皮膜作製の可能性が見出されている⁽²²⁾⁽²³⁾。

7. 新しい溶射法の開発状況

緻密で密着度の高い高性能・多機能溶射皮膜を得るには、飛行溶射粒子を溶融状態まで十分に加熱することとそれに大きな運動エネルギーを与えることが必要である。これには、熱

気流中における高温域並びに流速を増大させることが必要である。この目的達成のために、種々の溶射法が開発されてきた。これらのうち代表的なものについてその概略を述べる。

(1) 大出力プラズマ溶射法

(i) ガストンネル型プラズマ溶射法⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾

図11に示すように、長いアーク放電空間を有し、そこに大流量のアルゴンガス(6.7 dm³/s)を供給して、200 V-900 Aの大出力プラズマ流を発生させる方式を採用したプラズマ溶射法である。この溶射法の特長として、大電流による陰極の消耗が少ないこと、また陰極があまり加熱されないので、溶射粉末材を陰極中心よりプラズマ流の軸方向へ供給し得るため粉末の熔融状態が完全で気孔率が低い緻密な皮膜作製が可能であること等が挙げられる。

(ii) 超音速プラズマ溶射法⁽²⁶⁾

図12は、最近開発された超音速プラズマ溶射トーチを示したものである。プラズマガスには、主として大流量の窒素ガス(例えば3.8 dm³/s)を用い、強い旋回流として円筒状ノズルへ供給する。陰極とノズルの間に100 mm以上の長いア

図11 ガストンネル型プラズマ溶射トーチ。

図12 超音速プラズマ溶射トーチ。

ークが発生する。このアークは強い旋回流により、中心部に拘束される。したがって、アーク電圧は400 Vにも達するので、500 Aの電流で200 kW程度の大出力が得られる。このプラズマ流のノズル出口の温度は、約6900 K、流速は3000 m/sであるとされている。

(2) 高速ガス溶射法

熱気流中を飛行する溶射粒子に高い運動エネルギーを付与する立場から、燃焼室へ燃料ガス/酸素の混合ガスを導入して燃焼させることにより発生した高温・高圧ガスをノズルより噴出させて得られる高温高速ガス流を熱源とした溶射法が種々開発されている。以下代表的ものを紹介する。

(i) ジェットコート溶射法

1982年頃、米国のブローニング博士により開発された溶射法で良好なWC-Co皮膜作製が可能であるが、セラミックス材の溶射やノズル内壁へ熔融した溶射材が堆積するため長時間連続運転ができない欠点を有していた。この欠点を改良した溶射トーチを図13に示す。燃焼室②での燃料ガス/酸素の混合ガス燃焼により発生した高温・高圧ガスはガス通路③を経由してノズル⑥より噴出する。この高温高速熱気流の中心軸に一致するように溶射粉末材を入口④および粉末通路⑤より供給して溶射する方法である。

(ii) ダイヤモンドジェット溶射法

上記のジェットコート溶射法の改良型である。図14は本溶射トーチの概略を示したものである。トーチ先端部は外側より圧縮空気により強制冷却され、一方、粉末は内側の圧縮空気腔の内部を通過するので、ノズル内での熔融した溶射材の堆

図13 ジェットコートII型溶射トーチ。

図14 ダイヤモンドジェット溶射トーチ。

図15 超音速ジェット溶射トーチ。

積がなく長時間連続運転が可能である。ジェットコート溶射法と異なり、理論空燃比近くでの運転が可能のため、経済的であるとされている。ガス流の温度は、2300~2900 K、流速は、約 1500 m/s に達する。燃料ガスには、プロパン、プロピレン、水素等が使用される。WC-Co 等炭化物系サーメット溶射に適した方法であり、極めて低い気孔率並びに高い付着力を有する良好な皮膜作製が可能であるとされている。

(iii) 超音速ジェット溶射法⁽²⁷⁾

図15に本溶射トーチの概略を示す。本溶射法の特徴は、超音速熱気流を得るための特殊な高圧燃焼室(ロケットチャンバー)を溶射トーチに内蔵していることである。燃料として、プロパン、プロピレン、ケロシン、水素が使用されている。溶射材には、粉末および線材とも使用し得る。ケロシンの高圧燃焼により、約 2100 m/s に達する熱気流が得られるとされている。

8. あとがき

近年、材料表面加工の一つである溶射法は、適用材料および対象物の寸法・形状に制約されず、しかも極めて高い成膜速度を有することから、その適用に対する関心が高まりつつある。しかし、溶射皮膜は、その形成機構上、解決しなければならない宿命的な問題点も併せ有している。また、緻密で高密着性を有する良好な溶射皮膜を作製するためには、飛行溶射粒子を熔融状態まで十分に加熱することとそれに大きな運動エネルギーを与えることが必要であるが、いずれを優先すべきであるかについては意見のわかれるところである。これらの問題解明によって、溶射皮膜の適用分野が飛躍的に拡大するであろうと確信している。今後、数多く実施されるであ

ろう基盤的研究の成果および優れた溶射機器の開発・実用化に多大の期待を寄せたい。

本稿では、特にセラミックス/金属複合溶射皮膜並びに微細・薄膜溶射皮膜の作製、最近の溶射装置の開発状況について概説した。種々の制約上、筆者の意図するところを十分に言い尽せなかったが溶射技術の将来発展に多少とも役立てば幸いである。

文 献

- (1) 久保 修, 河合 真:自動車技術, 47(1993), 70.
- (2) 素木洋一:セラミックス製造プロセスII, 技報堂, (1978), 246.
- (3) 岡根 功, 福本昌宏, 上山直樹:溶接学会論文集, 6(1988), 514.
- (4) 福島 孟, 黒田聖治, 北原 繁:溶接学会全国大会講演概要, 第45集, (1989-9), 230.
- (5) 北原 繁, 岡根 功, 白井勝之:溶接学会全国大会講演概要, 第27集, (1972-9), 72.
- (6) 岡根 功, 北原 繁, 蓮井 淳:金材研報告, 13(1970) 269.
- (7) 福本昌宏, 八重樫範明, 島貫 誠, 梅本 実, 岡根 功:溶接学会論文集, 9(1991), 489.
- (8) 福本昌宏, 恒川浩一, 梅本 実, 岡根 功:日本金属学会誌, 57(1993), 1078.
- (9) 福本昌宏, 根来健一, 岡根 功, 鬼頭昌之, 深見慎二:日本金属学会誌, 58(1994), 50.
- (10) 宗片睦夫:薄膜電子部品, 冬樹社, (1990), 21.
- (11) 木村丈広:溶射技術, 11(1991), 94.
- (12) 福本昌宏, 小阿瀬丈典, 梅本 実, 岡根 功:溶射, 28(1991), 123.
- (13) 福本昌宏, 小阿瀬丈典, 梅本 実, 岡根 功:プリント回路学会誌, 8(1993), 373.
- (14) 納富 啓, 武田恭之, 児玉 克, 吉田豊信:溶接学会全国大会講演概要, 第44集, (1989-4), 106.
- (15) 福本昌宏, M. I. Boulos:日本金属学会誌, 56(1992), 678.
- (16) 福本昌宏, M. I. Boulos:溶接学会論文集, 10(1992), 520.
- (17) 福本昌宏, 外山順敏, 岡根 功:溶射, 30(1993), 54.
- (18) 伊藤省吾, 横山佳幸, 福本昌宏, 岡根 功:日本溶射協会第58回全国大会講演論文集, (1993-11), 36.
- (19) 内海明博, 松田 純, 米田理央, 矢野哲夫, 勝村宗英:溶接学会全国大会講演概要, 第49集, (1991), 156.
- (20) 松田 純, 内海明博, 米田理央, 矢野哲夫, 勝村宗英:溶接学会全国大会講演概要, 第49集, (1991), 158.
- (21) 吉川昌範, 斉藤 弘, 鬼頭昌之, 久木崎浩二, 館野晴雄:日本溶射協会第51回全国大会講演論文集, (1990-6), 65.
- (22) 加藤周一郎, 金気昭一, 浦山 清, 伊ヶ崎文和:日本溶射協会第52回全国大会講演論文集, (1990-11), 53.
- (23) 加藤周一郎, 金気昭一, 浦山 清, 伊ヶ崎文和:日本溶射協会第54回全国大会講演論文集, (1991-11), 106.
- (24) 荒田吉明, 小林 明:高温学会誌, 11(1985), 124.
- (25) A. Kobayashi and Y. Arata: Proc. ATTAC' 88, (1988), 107.
- (26) J. A. Browning and R. W. Whitfield: Proc. ATTAC '88, (1988), Add. Paper; T. Morishita: Proc. ATTAC '88, (1988), 95.
- (27) R. W. Whitfield, 森下 徹:日本溶射協会第50回全国大会講演論文集, (1989-11), 1.

略 語

CVD: chemical vapor deposition, 化学蒸着法。

MA: mechanical alloying, 機械的合金法。

PVD: physical vapor deposition, 物理蒸着法。