

技術論文

革新的超硬系サーメット溶射技術の開発 第2報

Development of Innovative Thermal Spraying Technology Tungsten Carbide Cermet-Second report



溶接溶射技術開発室

洲崎 真二

Shinji Suzaki

溶接溶射技術開発室

尾崎 健一

Ken-ichi Ozaki

技術開発部長

吉村 武憲

Takenori Yoshimura

要旨

製鉄プロセスロール等に広く普及が進行している溶射皮膜は剥離しやすいという欠点があるために、適用範囲が制限されることが多かった。中でも比較的密着度が高いとされる超硬 (WC-Co) 系サーメット皮膜ですらクロムメッキのように圧延ロールにまで適用されることはなかった。

そこで筆者らは、既に冷延ロールに用いられている超硬クロムメッキ膜の密着性を目指し、溶射機改造による密着性向上について検討した。新設計溶射機によるWC-Co皮膜は、ころがり疲れ方式により剥離寿命をもとめたと、既存溶射機による皮膜に比して、約5倍の密着力があることが判明した。

Synopsis:

Due to the defect that thermal sprayed coatings are easily peeled off, which are now being used in the processing rolls of steelmaking, its applicability has frequently restricted so far. Above all, even coating of tungsten carbide cermet, which is said to have a relatively high adherence, has not yet been applied to rolling rolls such as chromium plating.

Presented here are the results of the improvement of the reliability by remodeling of the thermal spraying gun with the aim of the reliability of the chromium plating skin membrane which has been already used in the cold rolling. It was confirmed that the newly-designed thermal sprayed gun with WC-Co sprayed coating had the reliability of about five times life time in comparison with the normal thermal spraying gun.

1 緒言

表面改質方法のひとつである溶射は、工業的に適用範囲が極めて広く、とりわけ、高速フラーム溶射機によるタングステン炭化物-コバルト (以下WC-Co) 溶射は製鉄プロセスロール用などに、従来の硬質クロムメッキに代わって普及しつつあるコーティング技術である。

その背景には高速フラーム溶射機が出現し、その膜質、特に密着性が向上して皮膜の剥離事故が減少し、溶射皮膜に対する認識、信頼性が増したことにあって考えられる。しかしながら、技術開発の進んだ現在においても皮膜剥離事故は皆無ではなく、比較的密着度が高いとされる超硬 (WC-Co) 系サーメット皮膜ですら使用環境如何ではトラブルを起こしているのが現状である。たとえ表面に優れた耐摩耗性などの機能を持たせても、皮膜が使用中に剥離し

ないように、まずその密着性を確保せねばならないのは至極当然のことである。

従来こうした密着性の向上あるいは信頼性の向上を目的に、溶射距離、給粉量、あるいは使用する溶射粉末等のソフト的な溶射条件の検討が繰り返されてきたが、筆者らはこうしたソフト的な検討にとどまらず、本質的な溶射方法すなわち溶射機基本設計について検討を行った。

2 現在の溶射法の問題点

現在、上述したように超硬 (WC-Co) 系サーメット溶射は、高速フラーム溶射法により皮膜密着性、耐摩耗性などの諸元を高めている。高速フラーム溶射法とはガス炎を熱源とし、燃焼室の圧力を高めることにより、連続燃焼炎でありながら爆発溶射に匹敵する溶射法である。市販化され

ている高速フレーム溶射機は高压の酸素とプロピレンもしくは水素を用いるHVOF(High Velocity Oxy-Fuel)と、高压酸素に代わり圧縮空気を用いるHVAF(High Velocity Air Fuel)に2分される。燃焼室での火炎温度は熱源の違いにより、高压酸素を用いるHVOFでは約3,200Kに達するのに対し、一方HVAFは約2,400Kと低く、また、溶射粒子速度はHVAFが圧縮空気を用いるのに対し、酸素のみの燃焼であるHVOFは溶射粒子を加速するための運動量に劣る。このように温度と速度のどちらを優先するか、二者択一的な選定を余儀なくされている。

これまでに、これら燃焼温度および粒子速度を供給ガス量、燃焼量、溶射距離等の溶射条件、あるいは形状、粒度、材質等の溶射材料で制御することが広く検討されている。しかしながらこうした検討範囲では、“温度”と“速度”を個別に制御することはできず、温度と速度を溶射機の構造から制御しようとした試みはなされていない。

そこで、本研究では皮膜諸元に深く影響する、“温度”と“速度”を以下に述べる、燃焼状態解析および圧縮性流体力学に基づき個別に制御できるようにした溶射機を開発することにした。

3 圧縮性流体

流れの速度の変化にともなう圧力、密度および温度の状態量の変化は、状態方程式、連続の式、運動方程式およびエネルギー式の、4つの基礎方程式から求められる。

非圧縮性流体であれば密度 ρ が一定で $\rho = \text{const.}$ が状態方程式に相当する。さらに断熱流れであれば、熱力学の第一法則から内部エネルギーは一定で温度も一定に保たれる。また速度は管路の断面積が与えられれば連続の式から決まり、圧力は運動方程式から求める事ができる。しかし、現実の気体を取扱う場合、圧縮性を無視することはできない。このような圧縮性流体では密度が変化し、上記の4つの式は互いに関連をもつこととなる。

溶射機内部の流れを取扱う際、ここでは問題を簡単にするために、外部からエネルギーの授受がない断熱で定常な状態を仮定した。このような流れでは式(1)に示したように、エンタルピー h と運動エネルギー $(1/2)u^2$ の和は保存される。

$$h + \frac{1}{2}u^2 = \text{const.} \quad (1)$$

さらに、溶射機内部での流れを1次元定常流れとして考える。この場合には速度、温度、圧力および密度などは管軸に垂直な任意の断面における分布が一樣で管軸に沿う距離のみの関数となる。実際の管内流れでは壁面の影響で速度分布などは一樣でないが、適当な平均流れを仮定することによって十分よい精度で流れを取り扱うことができる。また、断熱で可逆的な流れ、すなわち等エントロピー流れでは、全温度 T_0 と全圧 p_0 は流れのすべての点で一定とする

ことができ基礎方程式は以下の様に表される。

$$\text{状態方程式} \quad ; \quad \frac{dp}{p} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T} \quad (2)$$

$$\text{連続の式} \quad ; \quad \frac{d\rho}{\rho} + \frac{du}{u} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (3)$$

$$\text{運動方程式} \quad ; \quad udu + \frac{1}{\rho}dp = 0 \quad (4)$$

$$\text{等エントロピーの式} \quad ; \quad \frac{dp}{p} - \kappa \frac{d\rho}{\rho} = 0 \quad (5)$$

ここで、 p は圧力、 T は温度、 A は管路断面積、 κ は比熱比である。

ところで、よどみ点における音速 a_0 は式(6)で与えられ、マッハ数 M ($M = u/a$)とは式(7)を用いて関係付けられる。すなわち、マッハ数が大きいほど温度 T および音速 a は小さくなる事を留意頂きたい。ちなみに等エントロピー流れにおけるマッハ数と圧力比と密度比との関係は式(8)、(9)で与えられる。

$$\text{音速} \quad ; \quad a_0 = \sqrt{\kappa RT_0} \quad (R = \text{ガス定数}) \quad (6)$$

$$\left(\frac{a_0}{a}\right)^2 = \frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\kappa-1}{2}M^2 \quad (7)$$

$$\frac{p_0}{p} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(1 + \frac{\kappa-1}{2}M^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (8)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} = \left(1 + \frac{\kappa-1}{2}M^2\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad (9)$$

3.1 溶射機設計について

溶射機をFig.1に示したように燃焼室、ノズル、スロート、ダクト部の4つに区分し、前述したマッハ数を関数として各部位での諸状態量を計算した。以下にその概要を述べる。

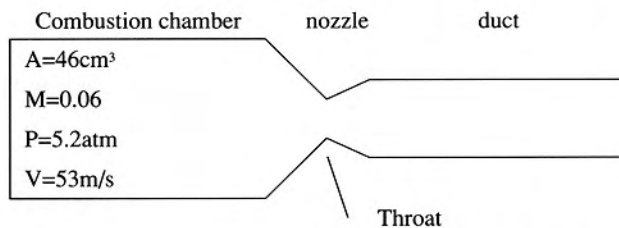


Fig.1 Schematic of the normal thermal spraying gun.

3.1.1 燃焼室

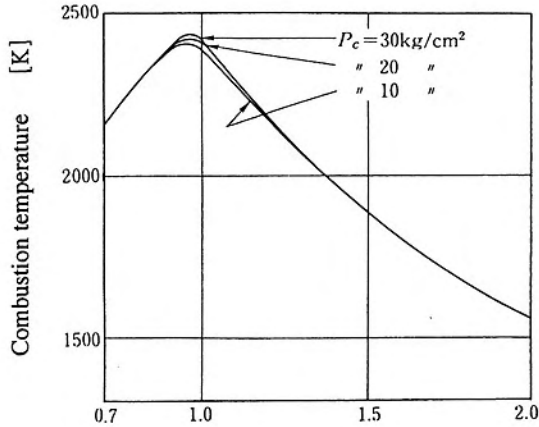
前述したように、HVAFのように圧縮空気を燃焼に用いた場合の燃焼温度はFig.2に示したように、空気過剰係数 α により変化するが、溶射で使用可能な $\alpha \leq 1$ の範囲では、大きな変化を期待する事はできない。そこでTable 1に酸素濃度と燃焼温度との関係についての化学平衡計算結果の一例を示したように、空気中の酸素濃度を変化させる事で幅

広い燃焼温度を可能とする。

ここでの温度計算は $\alpha = 1$ におけるものである。

Table 1 Relation between the oxygen concentration and combustion temperature

oxygen concentration(%)	21	30	40	50	100
combustion temperature(K)	2420	2730	2930	3060	3360



The coefficient that air is excessive α

Fig. 2 Combustion temperature

3.1.2 スロート形状

Fig. 3 は、等エントロピー流れにおける管路の断面積比とマッハ数の関係を示したものであり式(10)で求める事ができる。入側（燃焼室）のマッハ数 M_1 と断面積 A が与えられた場合、その流量を流すための最小断面積が存在する事を示すと同時に、出側断面積 A_2 （ここではダクトの断面積）を適切に設定すれば超音速流れを得るとを示している。また、最小断面積において $M=1$ 、すなわち音速となり、これをチョーキングという。

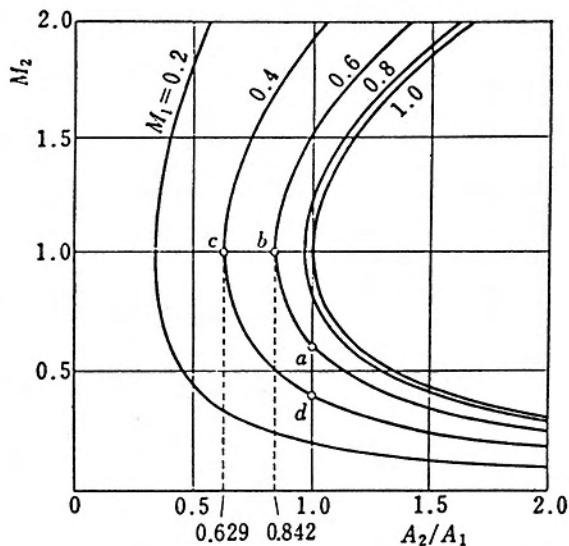


Fig.3 Relation between duct area ratios and mach number in Isentropic flow.

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{M_1}{M_2} \left[\frac{(\kappa-1)M_2^2 + 2}{(\kappa-1)M_1^2 + 2} \right]^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} \quad (10)$$

ちなみに、チョーキングした臨界状態における温度比、圧力比、密度比は $\kappa = 1.4$ とした場合、式(7)~(9)で $M=1$ とおく事により次式で与えられる。

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{\kappa+1} = 0.833 \quad (11-a)$$

$$\frac{p^*}{p_0} = \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 0.528 \quad (11-b)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} = 0.634 \quad (11-c)$$

3.1.3 ノズル形状

スロートの断面積 A^* とマッハ数 M の関係は式(12)により与えられる。ここでスロート部では流れはチョーキングしている。Fig.4は等エントロピー流れによるマッハ数と諸状態との関係を整理した結果を示している。

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[\frac{(\kappa-1)M^2 + 2}{\kappa+1} \right]^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} \quad (12)$$

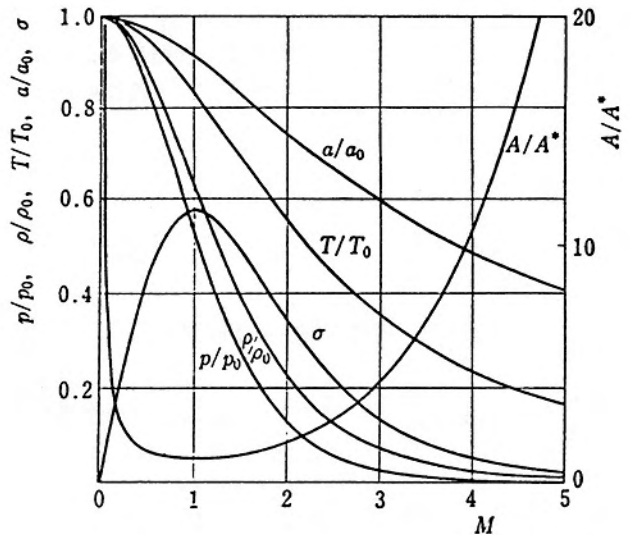


Fig.4 The various relations in Isentropic flow

3.1.4 ダクト形状

断面積が一定の管路で長さが比較的短い場合は、一般的に断熱流れとして考えて良い場合が多い、しかし実在気体では粘性があるから等エントロピ流れではない。こうした摩擦のある断面積一定の管内の断熱流れをファノ流れといい、この考えをダクト設計に用いた。

ファノ流れでは、亜音速流れでも超音速流れでもマッハ数は1に近づきFig.5に示したように管路が十分に長い場合はチョーキングの状態に達する。

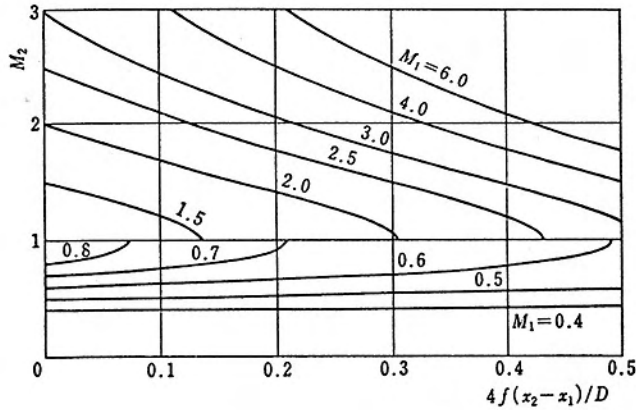


Fig.5 A change in the Mach number of the pipe shaft direction in Fanno Flow ($\kappa=1.4$)

式(13)に示した L_{max} はマッハ数 M の流れがチョークするまでの最大管路長さである。この長さを越えた超音速流れは管摩擦によってチョーキング状態に達する。こうした場合、その後、管の途中ではマッハ数は1を超えることはできず、管内に衝撃波が形成され衝撃波より下流は亜音速となるが流量は変化しない。

$$\frac{4fL_{max}}{D} = \frac{1-M^2}{\kappa M^2} + \frac{\kappa+1}{2\kappa} \ln \left[\frac{(\kappa+1)M^2}{(\kappa-1)M^2+2} \right] \quad (13)$$

4 転がり疲れによる皮膜密着性評価結果

4.1 供試材

供試材はTable 2に示す2種類である。No1は標準機での溶射皮膜で、No2は今回検討した改造機によるものであり、皮膜材質は、No1, No2同様にWC-17Coである。

基材はいずれも調質した軸受鋼SUJ2を用い、溶射膜厚 $150\mu\text{m}$ になるように、研磨による表面仕上げ(粗さ $0.3\mu\text{m}$)を行った。

Table 2 Test materials

No	Type of thermal spraying	Sprayed powder	Substrate
1	HVAF	WC-17Co	Quenched and tempered SUJ2(Hv900)
2	HVIF	WC-17Co	

4.2 実験方法

試験機はFig.5に示す2円筒ころがり方式であり、油圧により所定のヘルツ応力 P_{max} が得られるように保持し、一定回転速度 V で溶射皮膜は剥離するまでの回転数を求める方法である、皮膜剥離は目視観察によって判定した。

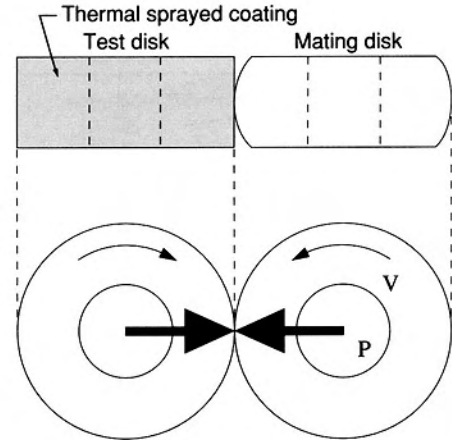


Fig.6 Experimental method

試験片と相手片寸法はいずれも外径 $\phi 2000\text{mm}$ 、巾 50mm であるが、相手片には500Rのクラウンを与え、所定位置に所定応力が加わるようにした。接触面は楕円となり、中心に最大応力 P_{max} が加わる。また試験片を駆動側、相手片を従動側としてみかえけ上のスベリはゼロとし、発熱防止の為に両片ともに水冷を施し長時間の実験を可能とした。

4.3 実験条件

今回採用した実験条件はTable3に示した通りである。従来、接触応力 P_{max} は圧延ロールを想定し $P_{max}=1078\text{MPa}$ に設定していたが、今回は作業時の噛み込み、戻抜け時の衝撃を考慮し $P_{max}=2450\text{MPa}$ に設定した。

Table 3 Experimental conditions

Contact stress	P_{max} (MPa)	2450
Revolution speed	Rpm	1000
Lubricant		Water

4.4 実験結果

ころがり疲れ方式により剥離寿命をもとめたところ、新溶射機による皮膜はFig.7に示したように、既存溶射機による皮膜に比して、約5倍の密着力があることが判明した。

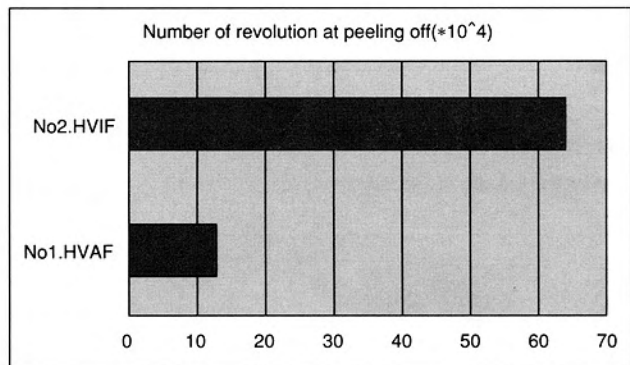


Fig.7 Results of peeling test by rolling contact fatigue

5 結言および今後の課題

圧縮性流体力学を活用して革新的な超硬 (WC-Co) 系溶射機を開発した。新溶射機による皮膜は既存溶射機による皮膜に比して、約5倍の密着力があることが判明し、これらは粒子温度と速度を最適に制御することにより得られたものである。

今後は、この実験室で得られた結果を実機で確認するとともに実用上の問題点把握と改善を図り、ロールの耐久性向上に伴う省力化とコスト削減に貢献していきたい。

謝 辞

本報告で述べた燃焼解析および圧縮性流体解析に際し、九州大学工学部 機械工学科 村瀬助教授にご協力ご助言いただいた事を記し、謝意の意を表します。

参考文献

- 1) 生井武文,松尾一泰：圧縮性流体の力学,理工学社
- 2) 島田壮平：フレームジェット-エンジニアリング入門,産業図書
- 3) 長尾不二夫：内燃機関講義,養賢堂
- 4) 蓮井 淳：新版 溶射工学,産報告出版
- 5) フジコー技報,No3 (1995) P6
- 6) フジコー技報,No4 (1996) P15

