

コールドスプレー法による構造物のき裂・損傷部に対する 補修技術に関する基礎的研究

Fundamental Study on Repairing Technique for Cracked or Damaged Parts of Structures by Cold Gas Dynamic Spray Technique

東北大学大学院工学研究科 小川 和洋 Kazuhiro OGAWA
東北大学大学院工学研究科 天尾 聡 Satoshi AMAO
東北大学大学院工学研究科 市川 裕士 Yuji ICHIKAWA
東北大学大学院工学研究科 庄子 哲雄 Tetsuo SHOJI Member

This study proposes an innovative technique for repairing of cracked or damaged parts of structures, such as nuclear or thermal power plants, by means of cold gas dynamic spray (CS) technique. In the case of generation of cracks etc. in the structure, the cracks can be repaired by welding. However, the welding spends considerable time on repair, and also needs special skills. The CS technique is known as a new technique not only for coatings but also for thick depositions. It has many advantages, i.e. dense deposition, high deposition rate and low oxidation. Therefore, it has a possibility to apply the CS technique instead of welding to repair the cracks etc. In this study, the cold gas dynamic spray technique as a new repairing technique for some structures is introduced.

Keywords: Cold Gas Spray, Repair, Cracking, Degradation

1. はじめに

化学プラントや発電プラント等においては、経年的な劣化が否めず、構成材料にはき裂の発生やエロージョン・コロージョン等の損傷の発生が危惧されている。特に、化学反応が生じる部位に関しては腐食が顕著となり、減肉による劣化の発生が懸念されている。以上のような劣化・損傷部位には、溶接による補修やオーバーレイ(溶接肉盛)が施されている場合も見受けられる[1]。しかし、溶接による補修やオーバーレイは、施工時間が長いことや特殊技能を必要とすることから、より簡便で施工速度の速い補修技術の確立が重要となっている。近年、金属粒子を溶融させることなく、高速のガス流に金属粉末を乗せ、基材へ衝突させることで皮膜を形成する新しいコーティング技術としてコールドスプレー法が注目されている。コールドスプレー法[2]-[6]は、装置自体がシンプルで(Fig.1 参照)、熱影響部や初期金属粒子の相変態を生じさせることなく、ち密で高品質な皮膜を mm オーダーで形成することが可能な技術である¹⁾。

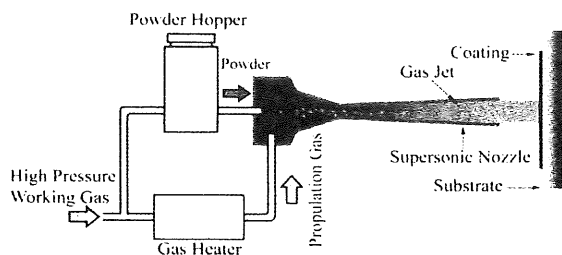


Fig.1 Schematic illustration of cold gas dynamic spray

しかし、コールドスプレーは衝突時の大きな塑性変形に伴い粒子を付着させるため、高炭素鋼等の硬い鉄系材料はコールドスプレー法による付着が困難である。また、コールドスプレー法がこれまでに耐酸化あるいは耐摩耗コーティングの施工方法として応用されてきたために鉄系の材料を用いた補修に関する過去の検討例が少ない。そこで本研究では、化学プラントや発電プラント等において多く用いられている鋼構造部材の補修に対するコールドスプレー法の適用を目的とし、高炭素鋼材料の厚膜施工を試みた。得られた皮膜の断面微細組織観察および断面硬さ等の機械的特性を評価し、補修あるいはオーバーレイ技術としての可能性を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材および作動ガス

本研究では、供試粉末材としてガスアトマイズ法により作製した平均粒径 25 μm の炭素量 0.70% の高炭素鋼を用いた。化学組成および機械的特性を Table 1 および 2 にそれぞれ示す。

基材には粉末同様の高炭素鋼と SUS304 平板の 2 種類を用い、高圧型コールドスプレー装置(プラズマ技研工業(株)製 PCS-103-3)により施工した。

本研究においては、粒子衝突速度に大きな影響を及ぼすノズル出口のガス流速を作動ガス種により変化させ、施工を行った。作動ガスには、窒素およびヘリウムガスを用いた。ノズル出口のガス流速は(1)式から算出した。成膜条件およびガス流速を Table 3 にまとめる。 λ は比熱比、 R はガス定数、 T_1 はノズル入口温度、 P_1

連絡先:小川和洋、〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻
字青葉 6-6-01、東北大学大学院工学研究科、電話:
022-795-7542、e-mail: kogawa@rift.mech.tohoku.ac.jp

はノズル入口圧力、 P_e はノズル出口圧力（大気圧）、 U_{gi} はノズル入口ガス速度である。Table 3 の N700S と He600S は基材が同様に粒子速度が変化した場合の比較、He600S と He600HC は粒子速度が同様に基材の種類が異なる場合の比較を目的とする。なお、コールドスプレー施工は、各試料とも 2 パスで行い、得られた供給した粉末の量と付着した粉末の量から付着効率を

Table 1 Chemical composition of high carbon steel powder (wt.%).

C	Si	P	S	Mn	Fe
0.70	0.30	<0.045	<0.045	0.80	Bal.

Table 2 Mechanical properties of high carbon steel (Catalog value)

Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Reduction of area (%)	Elongation (%)
209	616	1067	27.7	16.2

$$U_g = \sqrt{2 \frac{\lambda}{\lambda-1} RT_i \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_i} \right)^{\frac{\lambda-1}{\lambda}} \right]} + U_{gi}^2 \quad (1)$$

Table 3 Spray conditions.

Specimens	Substrates	Gas	Gas pressure (MPa)	Gas temp. (deg.C)	Gas flow (m/s)
N700S	SUS304	N2	3	700	1125
He600S	SUS304	He	2	600	2512
He600HC	Hi-C steel	He	2	600	2512

算出した。

2.2 断面組織観察試験

コールドスプレー法による皮膜と基材の付着状態を評価するため、走査型電子顕微鏡(SEM) ((株)日立ハイテクノロジー製 S-4700) を用いて皮膜断面の微細組織を観察した。また、画像処理ソフト Image-J を用いて皮膜断面の気孔率を測定した。

2.3 Vickers 硬さ計測

基材および皮膜の硬さの差異を評価するため、N700S, He600S, および He600HC (Table 3 参照) および基材の Vickers 硬さを微小硬さ試験機 (Fischer Instruments 社製 H100) を用い計測を行った。

2.4 皮膜強度評価試験

皮膜の付着強度を評価するため、四点曲げ試験を行った。試験片寸法は、長さ 35 mm, 幅 5 mm, 基材厚さを 2 mm, 皮膜厚さを 0.2 mm とした。試験は、材料試験機 (MTS 製 810 Material Test System) を用い、外側および内側支点間距離をそれぞれ 30 mm お

よび 15 mm, 変位速度を 0.01 mm/s とした。Fig.2 に示すように、皮膜に圧縮および引張荷重が作用するように配置し、試験時の荷重および変位を計測した。また、アコースティックエミッション (Acoustic Emission, AE) 法により、累積 AE 信号が急速に増加する点を皮膜のはく離と仮定し、そのときの応力および変位を計測した。なお、He600HC 材に関しては、基材の強度が他の試料と異なるため、本試験の対象から外した。荷重から応力への換算は下記の式から求めた。

$$\sigma_b = 3P(L-l)/2wt^2 \quad (2)$$

ここで、 σ_b は表面応力、 P ははく離時の荷重、 L および l はそれぞれ外側および内側の支点間距離、 w は試験片の幅、および t は試験片の厚さを示す。

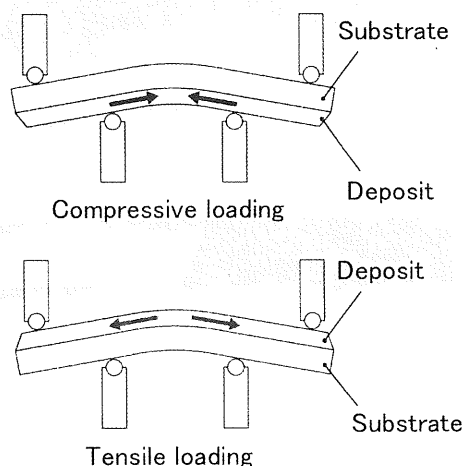


Fig.2 Loading modes for four-point bending tests.

3. 結果および考察

3.1 断面組織観察結果

どの施工条件においても付着は成功し、2 パスの施工によって、N700S は約 400 μm , He600S は約 1100 μm , および He600HC は約 320 μm の付着層を得ることができた。これら付着層の断面 SEM 観察像を Fig. 3 に示す。また、このときの気孔率および付着効率を Table 4 にまとめる。He600S は気孔率 1.8 % であり、極めて緻密で厚い付着層を得ることに成功した。ガス流速が約 1/2 である N700S は、He600S に比べ、付着層厚さが約 1/3, 気孔率は約 4 倍、さらに付着効率は 1/4 という結果になった。これは粒子の付着に関し、粒子速度が大きく関係していることを示唆している。

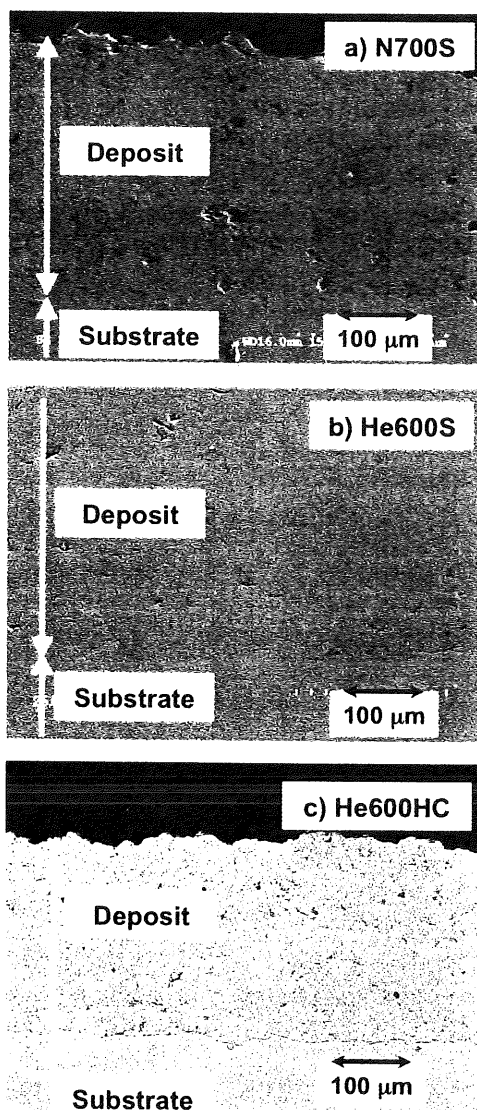


Fig.3 Typical cross-sectional SEM images of cold sprayed depositions.

Table 4 Results of cold spraying.

Specimens	Thickness (μm)	Porosity ratio (%)	Deposition efficiency (%)
N700S	400	7.8	15.0
He600S	1100	1.8	60.1
He600HC	320	8.4	-

また、コールドスプレー条件が同様で基材の鋼種のみが異なる He600S と He600HC においても、付着厚さ、気孔率が大きく変化することが明らかとなった。これは、後述するように高炭素鋼の硬さが SUS

鋼に比べて硬く、基材の塑性変形が十分に生じていないことが原因と考えられる。しかし、その詳細に関しては、まだ判っておらず、更なる検討が必要と考える。

3.2 Vickers 硬さ計測結果

界面からの距離と皮膜断面硬さの分布を Fig. 4 に示す。各試料は付着層の厚さが異なるため、単純な比較はできないが、コールドスプレー皮膜の硬さはいずれの試験片においても基材の硬さに比べ、硬化する傾向を示した。付着層硬化の要因は、粒子が高速で基材と衝突したことによる加工硬化の可能性が考えられる。また N700S や He600HC の硬さが He600S と比べ低い値を示している要因としては、前述の高い気孔率の影響が考えられる。さらに N700S や He600HC においては、付着層内部でばらつきが大きくなる傾向を示した。この原因についても気孔率が影響しているものと考えられる。

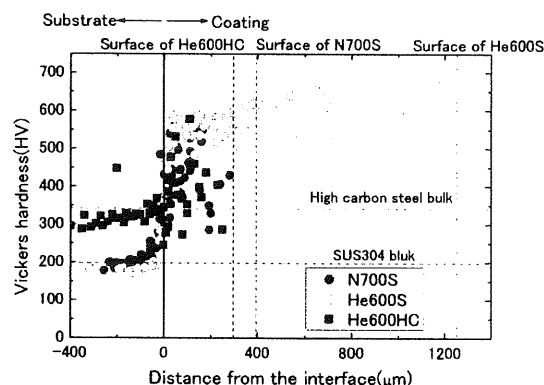


Fig.4 Results of hardness measurements.

3.3 皮膜強度評価試験結果

四点曲げ試験による荷重-変位曲線およびはく離時の荷重と変位の値を、Fig. 5 に示す。引張荷重負荷時においては、2 つの試験片ともに皮膜のはく離が生じた。He600S は N700S と比べ、高い荷重ではく離していることから、接合強度は高いものと判断できる。また、He600S における強度の急激な低下位置は付着層に縦割れが入ったことによるものであり、この位置はほぼ塑性変形が開始する点と一致する。一般の構造物は、塑性変形を生じる応力下で使用されることはないことから、弾性変形領域で強度の高いコールドスプレー付着層は十分に使用可能なレベルであると考えられる。ただし、応力の急激な低下は、信頼性の観点から思わしくない。この点に関しては、スプレー条件の最適化や付着層あるいは粒子の前処理・後処理等により改善する必要がある。

一方、圧縮荷重負荷時においては、N700S および He600S ともにはく離や破断は生じず、曲線はほぼ同様の傾向を示した。圧縮応力が負荷される部位に関しては、極めて有効であることが明らかとなった。圧縮荷重(応力)が作用する部材においては、窒素ガスを用いた付着層であっても十分な強度を得ることが可能である。

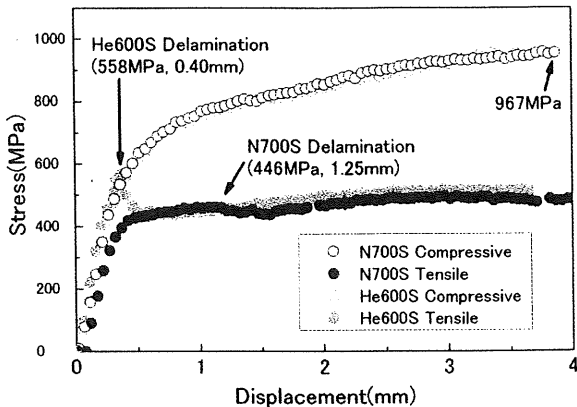


Fig.5 Results of four-point bending tests.

4. まとめ

- (1) 皮膜断面微細組織観察の結果から、作動ガスに He を使用することで気孔率 1.8%と、極めて緻密な皮膜を得ることができた。
- (2) 硬さ試験の結果から、コールドスプレーにより施工した付着層の硬さは、バルク材のそれよりも高くなる傾向を示し、高速衝突による加工硬化の影響が示唆された。
- (3) 四点曲げ試験の結果から、引張荷重負荷下においては、付着層にき裂が生じ、急激な荷重低下を示すことがわかった。しかし、He600S ではき裂が生じるまでの応力は高く、一般の構造物が塑性変形を生じる応力下では使用されないことを考慮すれば、コールドスプレー付着層の強度は十分であると考えられる。また圧縮荷重に関しては、N700S および He600S ともにはく離や破断は生じず、圧縮応力が負荷される部位に関しては、極めて有効であることが明らかとなった。
- (4) 以上の結果から、コールドスプレー法による炭素鋼補修の可能性が示唆された。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省 特別教育研究経費連携融合事業 「エネルギー安全科学国際共同研究プロジェクト (平成17-21年度)」の一環として実施されたものである。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] 能勢士郎, 山田雅人, 深田利昭, 酒井忠迪, 高野正義, 後藤明伸: “リアクタ世界一への挑戦とリアクタにかかわる最近の動向”, 神戸製鋼技報, 50 (2000), pp. 95-98.
- [2] A. P. Alkhimov, V. F. Kosarev, A. N. Papyrin: “A Method of Cold Gas-Dynamic Deposition,” Sov. Phys. Dokl., 35 (1990), pp. 1047-1049.
- [3] A.P. Alkhimov, V.F. Kosarev, N.I. Nesterovich, A.N.Papyrin: “Method of Applying Coatings,” Russian Patent No.1618778, 8 Sept 1990.
- [4] A.P. Alkhimov, A.N. Papyrin, V.F. Kosarev, N.I. Nesterovich, M.M. Shushpanov: Gas-dynamic spray method for applying a coating. U.S. Patent No. 5,302,414; April 12, 1994.
- [5] A.P. Alkhimov, A.N. Papyrin, V.F. Kosarev, N.I. Nesterovich, M.M. Shushpanov: Method and device for coating. European Patent No. 0 484 533 B1; January 25, 1995.
- [6] A.P. Alkhimov, A.N. Papyrin, V.F. Kosarev, N.I. Nesterovich, et al.: “Gas Dynamic Spraying Method for Applying a Coating,” U.S. Patent No. 5,302,414; April 12, 1994, Re-examination Certificate, Feb. 25.
- [7] 榊 和彦: “コールドスプレーの概要と研究・開発の動向”, 溶接学会誌 Vol.75 No.8 (2006)