

爆発圧接ライニングについて

西尾 安弘・深谷 保博・益重 実*

1. まえがき

爆発圧接は爆薬の爆発エネルギーを利用して二つの金属を接合させるものであるが接合機構が通常の溶融溶接と異なる一種の冷間圧接であるため、従来溶融溶接では接合不可とされた金属間の接合が行ないうる特徴を有している。このため化学工業に於ける各種機器の耐食材料のライニングに於いて従来の製法にかわつて爆発圧接ライニングが脚光を浴びている。本文はこの爆発圧接法について、その圧接の機構、圧接部の諸性質、ライニング機器の製作と非破壊検査等について述べる。

2. 爆発圧接法の概要

二つの金属板が衝突した際、接合をおこす現象が認められ、以後火薬を使つて金属板を接合させる研究が行なわれる様になつた。そして、その後諸実験が繰返され Pearson⁽¹⁾, Davenport⁽²⁾, Duvall⁽³⁾ らによつてその結果が報告された。又圧接の機構についても高速で衝突する二金属板の挙動を流体力学的考察を加えて、Cowan⁽⁴⁾, Holtzman⁽⁵⁾, Abrahamson⁽⁶⁾ らがいろいろ解析している。現在では米国(デュボン社)、日本(旭化成)等で適切なる爆薬の開発が行なわれ、実用段階に入った訳である。この爆発圧接法は通常の溶融溶接と異なる一種の冷間圧接であり従来溶融溶接では不可能と思われる組合せの金属間の接合を行ないうる特徴をもつ。圧接の施行にあつては2つの金属板を全面、或は線状、点状の部分的にも接合することが可能でそれぞれの対象機器に従つて使い分けていけば良いといえる。国内では既に多数の機器に爆発圧接ライニング法が採用され稼動に入つている。材料的にはステンレス鋼、チタニウム、銅といったものが主たるものであるが、今後数多くの化学機器に本法が採用される共に化学工業以外の諸工業にも広く使われていくことは間違いないと考えてよからう。

3. 圧接の機構

爆発圧接の圧接機構については未知のところが多く、国内の研究も圧接機構そのものに触れたものは少

い。ここでは Cowan, Holtzman, Abrahamson らの報告をもとにごく簡単に考察する。爆発圧接の施行法としては図1の如く何種類かあるが大別するならば二

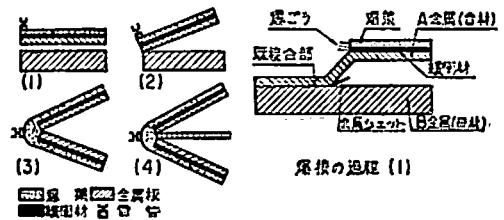


図1 爆接法と爆接の過程

金属板を平行に対向させるものとある角度をもつて対向させるものとに分けられる。図1の右は(1)の場合の爆接過程を示したものであるが台材と母材が衝突により、衝突点に於いて金属ジェットを生成し接合が促進されるというものである。この金属ジェットの概念は二金属板の両面に爆薬をセットし、同時に爆発させた時を考えれば容易に理解出来る。即ち図2の学く衝

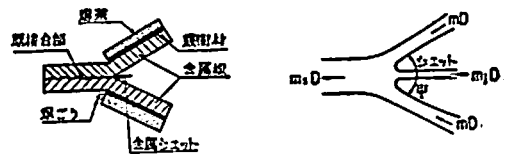
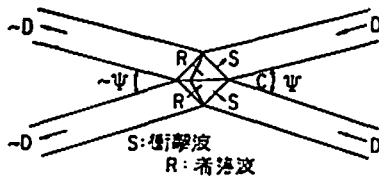


図2 非粘性・非圧縮流体の二つの流れの対称衝突におけるジェット生成の起る流れ形態

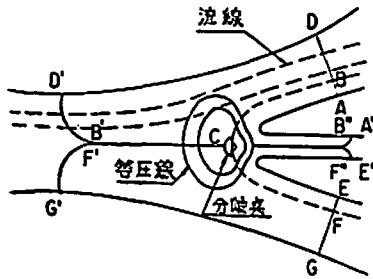
突する金属板が流体の流れとして振舞うと仮定し、傾角 θ で衝突点に近づく非圧縮、非粘性流体の二つの流れの対称衝突を考えると、圧接材即ち流体は衝突点に流れ込む流速と同じ速度で流れ出ると考えられる。従つて運動量、質量およびエネルギー保存則から図の様な流れ形態をとらざるをえなく衝突領域では圧力が高まり図の如く前面に噴出する流れ即ちジェットが生成される訳である。これが超音速の流れになると粘性と圧縮性が表われ図3(a)の如く衝撃波が生じ接触点に伴う二つの斜めの衝撃波により流れがそらされ、この様な流れではジェットは生成しなくなる。従つて金属の圧接に於いて図2の如きジェット生成をおこす状

昭和42年10月25日受理

* 三菱重工業株式会社 技術本部 広島研究所 広島市観音新町4丁目6番22号



(a) 圧縮流体の超音速流のジェット生成のない衝突



(b) ジェット生成衝突における流れ形態

図3 ジェット生成のない衝突とジェット生成衝突における流れ形態

態にもつていつてやる必要がある訳である。次に、ジェットが発生すると何故接合が可能になるかを考えてみる。図3(b)に示す様にC点のまわりの閉じた曲線は圧力が最大になりCで停滞圧力 P_s となる等圧線でC点では極めて大きな圧力が発生する。その値は、速度が4,000m/secの時、Alに対しては249Kbar, オーステナイトステンレス鋼では727Kbar, Wでは1,835Kbarという大きな値となる。又二つの板のB, Fの流線はまず最初に金属の内側でC点で接触し、後にB'B'', F'F''の如く位置する様になり、金属板は非常に強くせん断を受ける。これらによつて酸化物や吸収されたガスが存在する表面層は板間から除去され金属結合に好適な清浄な金属面を露出せしめ爆薬の衝撃圧により拡散が進行し接合されると考えられる。ここでは冒頭に記した如く全く概略的に圧接現象を説明するというところから一定の燃速に対するジェット発生の際臨界角や一定の衝突角に対する臨界速度の存在又この現象に基づく平行法と有角法の圧接条件の差異或はジェット発生と適正な爆薬の燃速との関連といつたことは触れないことにするが、いずれにしても金属の材質により爆薬の燃速、衝突角等を適宜考慮することにより爆薬による金属の接合が可能になる訳である。

4. 爆発圧接ライニング法 爆接法には、

- (1) 金属板を全面的に接合させる全面爆接法
- (2) 線状に接合させる線爆接法
- (3) 点状に接合させる点爆接法

があげられるが、全面爆接法はクラッド鋼の製作に使われ、後二者はライニング用に使われる。ライニングにあつては、溶接組立され構造化された母材本体内にライニング材をそう入し、爆接によつてライニングする方法と平板状の母材に内張材を線爆接して線爆接合板を製作し、しかる後その合板を曲げ加工、プレス加工、スピニング加工等を行なうことによつて製品を得る方法とがある。線爆接合板を製作し加工していく方法は、合板製作後はクラッド鋼の加工に準ずれば良く、工作上ならびにコスト的にみて、今後実用度が拡大していくと思われる。ク形線爆接合板はロール曲げ加工により容器の胴板や塔類などを製作でき、円形線爆接合板はプレス加工、スピニング等により容器の鏡板を製作できる、爆接は原理的にはライニング材の板厚に無関係に圧接することが可能であるが、板厚2mm以上になると薬量が著しく多くなるため、現在ではライニング材の板厚が2mm以下のものについての爆薬(線爆薬、点爆薬)しか市販されていない。ただ線爆接において適当な手段を講ずることにより、2mm用の線爆薬で板厚3mmまで圧接することは可能である。母材はあまり薄いと爆発時に変形を起こす恐れがあるが、圧接上母材板厚には制限はない。爆接可能な板の大きさにも制限はない。爆接ピッチは、10mmピッチまで圧接可能である。

5. 爆発圧接部の性質

5.1 接合強サ

圧接材の接合強サに影響を及ぼす因子としては、

- (1) 圧接材の材質、板厚
- (2) 爆薬
- (3) 炭素鋼母材の表面状況
- (4) 圧接材と炭素鋼母材の間げき

などがあげられるが、これらの諸条件を適正なものにした際の圧接部の接合強サを表1に示す。線爆接部は全耐食材ともすべてハク離試験において耐食材母材部破断となる良好な接合強サを示し、またステンレス鋼においてはASTMのクラッド鋼に要求される接着強サをはるかに越す、すぐれた接合強サを有することがわかる。SUS27とSS41の爆接部を例にとると、ASTM A264-44Tに基づくせん断強サ試験では、SUS27圧延クラッド鋼が30.3, 32.5, 30.9kg/mm²のせん断強サを示したのに対し、41.0, 42.5, 44.0kg/mm²の良い値を示す。点爆接部はハク離強サがせん断強サに比べて値が低い、参考のために併記した抵抗溶接に対するMIL規格値を上回るせん断強サを示す。

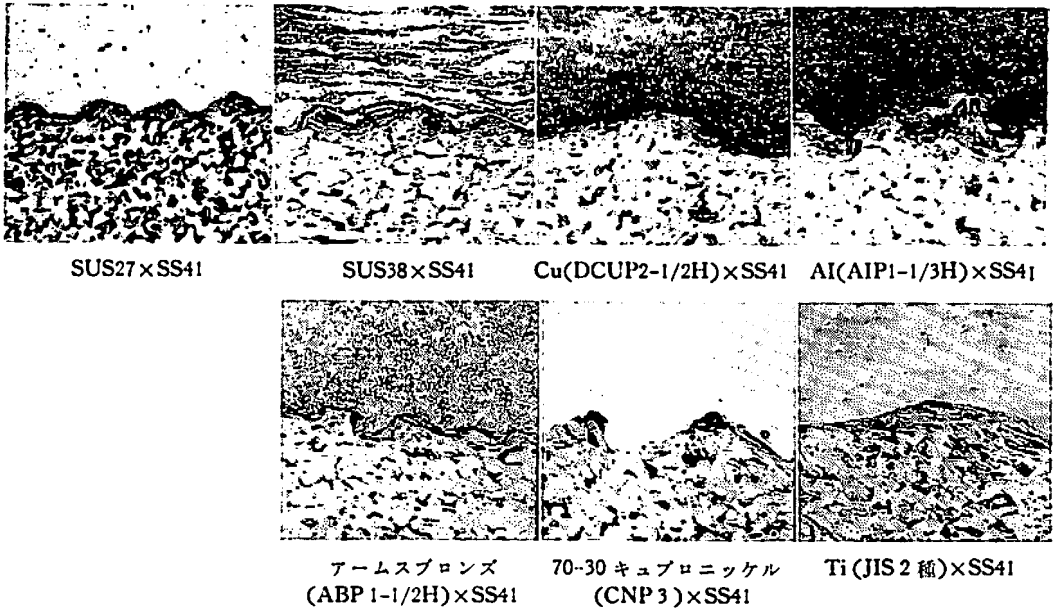


写真 1 各耐食材と炭素鋼溶接部のマイクロ組織 (×100)

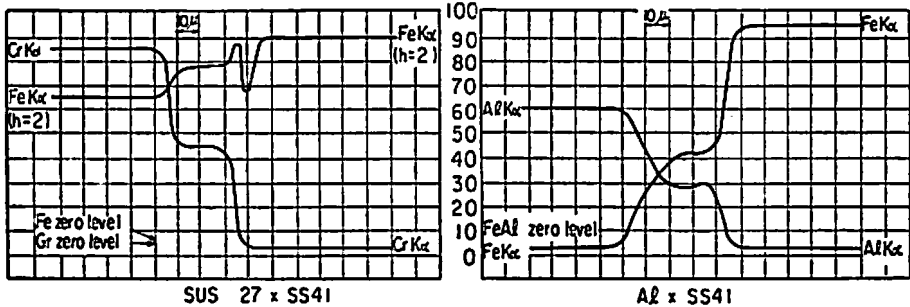


図 4 SUS 27×SS41, Al×SS41, 溶接部の X 線マイクロアナライザによる拡散状況

5. 2 接合部の組織

各耐食材と炭素鋼圧接部のマイクロ組織を写真 1 に示す。圧接面には溶接部特有のさざ波状の変形が見られる。圧接部には判然とした合金層や溶融層は見られず、SUS 38 と SS 41 溶接部を電子顕微鏡にて 1 万倍まで倍率をあげ観察したところ、再結晶温度近くまで昇温した形跡が見られたが、明りような溶融層の生成は検出されなかつた。また各耐食材により波間距離、波高が異なるが、SUS 27 圧接部では、波間距離約 100 μ、波高約 30 μ 程度でチタニウム圧接部では波間距離約 450 μ、波高約 50 μ 程度である。図 4 は SUS 27 および Al と SS 41 の溶接部の X 線マイクロアナライザによる解析結果である。SUS27×SS41 では約 40 μ、Al×SS41 では約 45 μ の拡散層の存在することが判る。

5. 3 接合部のカタサ分布

図 5 に一例として SUS27, チタニウムの場合の SS 41 との縦溶接部のカタサ分布を測定した結果を示す。耐食材は爆発加工を受けて多少硬度上昇を示すが、他は異常が認められない。

5. 4 接合部の耐食材および接合部近傍の炭素鋼母材の機械的性質

圧接部は大きな爆発エネルギーを受けるために、圧接された耐食材と圧接部近傍の母材が、その素材部に比べて機械的性質がどの程度変化するかを調べた結果を表 2 に示す。炭素鋼母材は爆発による爆ごう(轟)の影響を受けてもその機械的性質はほとんど変化しないことがわかる。一方耐食材は伸びが落ちているが、実用に十分供しうる値を示している。

表 2 溶接前後の耐食材及び炭素鋼母材 (SS41) の機械的性質

(耐食材の機械的性質)

耐食材	板厚 (mm)	種別	引張試験 ¹⁾			
			引張強サ (kg/mm ²) (伸び) (%)			破断 位置
SUS 27	2.0	溶接加工後	66.2(28.4),	65.3(32.4),	65.5(24.0)	母材
		圧延のまま	63.5(58.7),	64.0(57.6),	63.3(5700)	—
SUS 38	2.0	溶接加工後	48.7(21.5),	48.7(20.0),	47.3(20.5)	母材
		圧延のまま	47.5(23.0),	47.5(33.0),	47.6(34.6)	—
Ti (JIS 2種)	2.0	溶接加工後	45.2(22.0),	45.2(21.5),	45.2(21.0)	母材
		圧延のまま	42.0(34.0),	41.1(35.2),	42.2(31.2)	—
Cu(DCUR2-1/2H)	2.0	溶接加工後	28.1(13.2),	28.2(17.2),	28.2(13.0)	母材
		圧延のまま	27.0(26.5),	29.0(29.6),	29.0(26.2)	—
Al (AIP1-1-2H)	2.0	溶接加工後	13.3(2.3),	12.1(2.3),	14.4(2.3)	加工部
		圧延のまま	12.4(18.0),	12.4(17.8),	12.5(17.3)	—
アームスブロンズ (ABP1-1/2H)	2.0	溶接加工後	64.9(16.0),	65.2(19.4),	64.8(19.6)	母材
		圧延のまま	65.0(30.6),	65.9(31.0),	65.3(29.1)	—
70/30 キュブロンニッ ケル (CNP3)	2.0	溶接加工後	46.2(18.8),	45.8(16.0),	46.2(17.8)	母材
		圧延のまま	45.2(35.2),	43.4(30.6),	47.3(34.3)	—

注 1) JIS Z 2201 5号試験片

(炭素鋼母材 (SS41) の機械的性質 (SUS27×SS41 溶接))

種別	試験片	引張試験 ¹⁾			
		引張強サ (平均) (kg/mm ²)	降伏点 (平均) (kg/mm ²)	引張伸び (平均) (%)	引張絞り (平均) (%)
圧接部近傍の炭素鋼母材	1	49.5	35.3	33.0	55.0
	2	50.5(50.4)	40.6(37.7)	37.5(33.2)	94.0(56.7)
	3	51.2	37.1	29.9	51.0
圧接部から離れた炭素鋼母材	4	49.1	35.7	37.5	57.7
	5	50.5(49.8)	35.3(33.8)	38.0(36.0)	59.9(60.5)
	6	49.8	30.4	37.5	64.0

注 1) JIS Z 3111 5号試験片

表 3 溶接部の腐食試験結果

耐食材	種別	腐食試験 (腐食量 mm/year 仮換算)			
		5% H ₂ SO ₄ 10h 沸騰液浸せき	1% H ₂ SO ₄ 10h 沸騰液浸せき	65% HNO ₃ 10h 沸騰液浸せき	1% HCl 10h 沸騰液浸せき
SUS 27	素材	—	—	0.372	—
	溶接部	—	—	0.420	—
Ti (JIS 2種)	素材	36.52	—	0.411	—
	溶接部	33.15	—	0.357	—
Cu (DCUP2-1/2H)	素材	—	0.310	—	0.415
	溶接部	—	0.345	—	0.335
アームスブロンズ (ABP1-1/2H)	素材	—	0.136	—	0.077
	溶接部	—	0.045	—	0.091

5. 5 接合部の耐食性

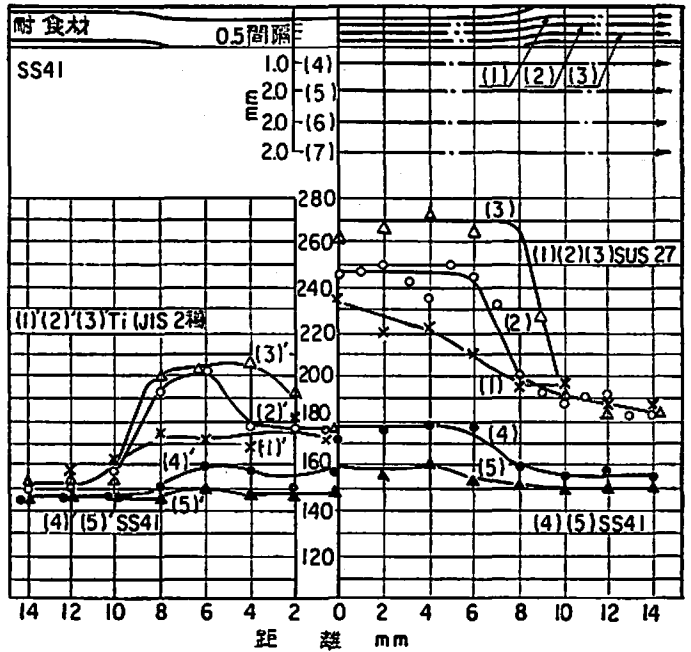
爆発加工を受けた耐食材の耐食性を調査した結果を表3に示す。各耐食材とも素材部に比べ耐食性が劣化した点は見られず良好な値を示している。

5. 6 持合部の疲労

爆接部に繰返しハク離荷重を負荷し、その耐ハク離性を調査した結果を図6に示す。試験は SUS27 × SS41 爆接部について行ない、SUS 27 圧延クラッド鋼と比較試験した。繰返し荷重が約 400kg 以下になると両者とも SUS 27 の母材部より破断している。この様に SUS 27 × SS41 爆接部はすぐれた疲労強さを有しており、圧延クラッド鋼と変わらないことがわかる。

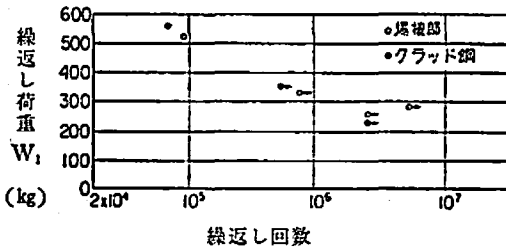
6. 爆接ライニング機器の製作

ライニング法としては前述した如く2方法があげられるが、本文では線爆接合板加工法による機器の製作状況を示す。線爆接法、点爆接法ともに旭化成(株)から市販



注 (6) (7) は (5) と変わらないため省略

図5 線爆接部のカタサ分布



注) 試験片の接合面積は 80mm²

図6 ハクリ疲労試験結果 (S-N 線図)

されているハブコート、ハブキャップと呼ばれる特殊導爆線ならびに特殊雷管を使用しそのコード、キャップはライニング材の材質、板厚により使い分けが行なわれる。線爆接と点爆接は目的、用途に応じて個々にその特徴を生かして利用すべきであるが、線爆接合板加工法では線爆接法を使用する。先ず容器の鏡板や胴板の製作において、線爆薬をセットし、その後、爆ごろう波の干渉防止および消音のためのおがくずの載置を行ない発破さす。爆発完了後は水洗、アセトン洗浄を行ない線爆接合板の洗浄を行なう。このようにして得られた合板を用途に応じてロール加工、プレス加工、スピニング加工等の諸加工を行ない製品化していく。写真2はそれらの加工状況を示す。線爆接合板製作後はクラッド鋼の加工に準ずればよい。

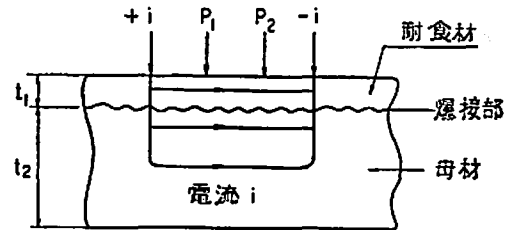
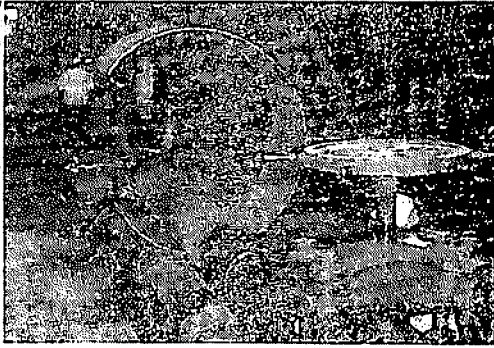
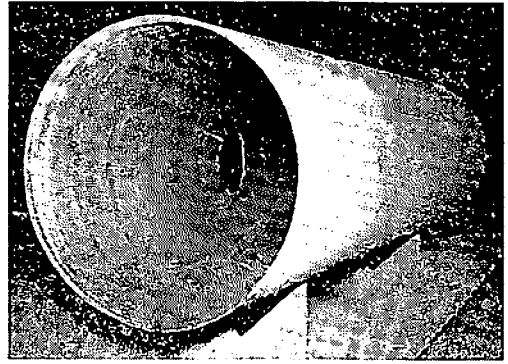


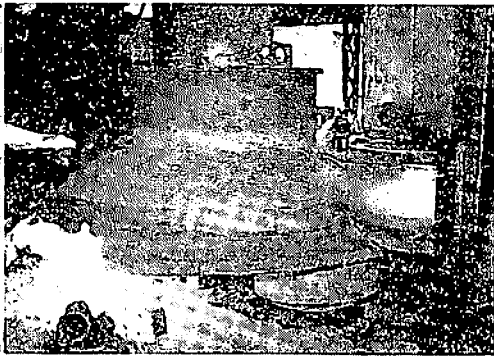
図7 電気抵抗検査法の原理と検査状況



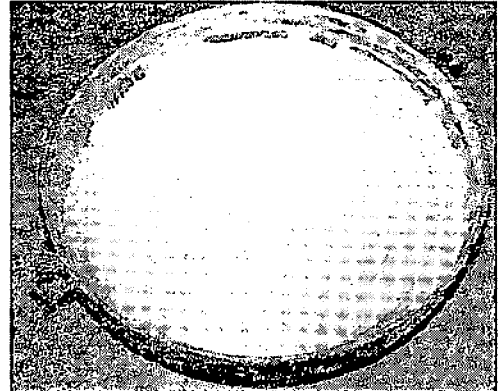
線爆接合板のロール曲げ加工



銅板 (SUS 27 2mm×SS 41 14mm)



線爆接合板のスピンニング加工



鏡板 (SUS 28 2mm×SS 14 41mm)

写真2 線爆接合板の加工と製作された銅板・鏡板

7. 爆接ライニング機器の品質検査

製作されたライニング機器の非破壊検査法の確立は重要な問題である。従来は金属ハンマーによる打音や超音波検査などで圧接部のハク離の有無を調べていたが、前者は人間の能力にたよるもので極めて不正確であり、後者は曲率をもった容器内で測定困難という欠点がある。ここで述べる検査法は電気抵抗の変化により圧接部の剝離を検知するもので図7はその原理図である。使用する計器は電気抵抗式金属厚み測定器と呼ばれるもので測定しようとする金属体に4本(又は6本)の接触子をあて、左右2本の接触子に一定の直流電流を流すと、その間に生ずる電位差が金属体の肉厚に比例して変化し、この電位差を測定することにより金属体の肉厚を一方の側から電圧計で測定できるものである。爆接部が完全に接合していると、 P_1-P_2 間には肉厚 t_1-t_2 に対応する電気抵抗があらわれ、接合が不完全であれば完全な場合に比べて抵抗値が大きくなり、完全に剝離している時は肉厚 t_1 に対する大きな電気抵抗があらわれる。この抵抗変化を電位差(μV)で検出するものである。接触子は上下に簡単

に移動できるし、可搬式の小寸法のものであるから、曲率をもったところでも狭い場所でも容易に検査を実施することが出来る。写真は製作完了した機器内で検査しているところである。

8. むすび

以上爆接圧接について圧接の概要、圧接部の諸性質、非破壊検査などについて述べたが、概略を総括すると次の如くである。

(1) 爆接により、各種耐食材料と銅の接合が可能である。ことに通常、溶融溶接が不可能なチタニウム、アルミニウム、銅といった材料と銅の接合が容易に行ないうる。

(2) 爆接部は接合強さ、耐食性、耐疲労性を始めとしてすぐれた性質を有しており、溶融溶接のように溶接熱影響を伴わないため、材質の劣化現象も見られず、溶体化などの熱処理を必要としない。

(3) 爆接により、耐食材を鋼に線状に圧接せしめた線爆接合板を製作し、ロール曲ゲ、プレス、スピンニング等の諸加工を経てライニング機器を製作することができる。また構造化された母材に耐食材をライニン

グすることも可能であり、目的、用途に応じて点状、線状に圧接することができる。

(4) 爆接ライニング機器の品質検査は電気抵抗式の非破壊検査法により極めて信頼度の高い検査を行なうことが出来る。

文 献

- 1) J. Pearson, Explosive welding, ASTME Creative Manufacturing Seminars sp 60~159 (1960~61)
- 2) J. Pearson and G. A. Hayes, Research in Explosive welding, ASTME Creative Manufacturing Seminare sp 63~97 (1962~63)
- 3) D. E. Davenport. Explosive welding, ASTME Creative Manufacturing Seminars sp 62~77 (1961~62)
- 4) D. E. Davenport and G. E. Duvall, Explosive Welding, ASTME Creative Manufacturing Seminars sp 60~161 (1961~61)
- 5) G. R. Cowan and A. H. Holtzman, Flow Configurations in colliding plates, Explosive Bonding, Journal of Applied physics (1963~4)
- 6) A. H. Holtzman. C. G. Rudershansen, R. M. Caranangh, Recent advances in metal working with explosives, Dupont Technical Paper (1962~4)
- 7) G. R. Abrahamson, Permanent periodic surface deformations, due to a traveling jet, Journal of Applied Mechanics (1961~12)
- 8) 西尾, 深谷, 益重, 爆発圧接による耐食材料のライニングに関する研究, 三菱重工技報 (1967~1)
- 9) 深谷, 益重, 爆発圧接 1 報, 圧接の概要及びその応用, 社内報告 (1966)
- 10) 深谷, 益重, 爆発圧接 2 報, 圧接の機構, 社内報告 (1966)
- 11) 深谷, 益重, 爆発圧接 3 報, 不銹鋼と銅の爆発圧接, 社内報告 (1966)
- 12) 深谷, 益重, 爆発圧接 4 報, 耐食非鉄材と銅の爆発圧接, 社内報告 (1966)
- 13) 深谷, 益重, 爆発圧接 5 報, 爆発圧接による不銹鋼ライニング機器の製作, 社内報告 (1966)
- 14) 深谷, 益重, 爆発圧接 6 報, 爆接ライニング機器の非破壊検査, 社内報告 (1967)

Study on Lining of Corrosion Resistant Materials by Explosive Bonding

by Y. Nishio, Y. Fukaya and M. Masushige

Stainless steel, nickel, monel, hastelloy, copper, arms bronze, cupro nickel, aluminum, titanium and zirconium can be satisfactorily bonded to steel by explosive bonding. Explosive bonding is classified into sheet bonding, linear bonding and spot bonding. We have studied linear bonding and spot bonding. In this paper the properties of bonded zone and fabrication of lining vessels by explosive bonding are described.

(Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Hiroshima Technical Institute, Technical Headquarters)