解 説

新しい固相接合—電磁圧接

小嶋昌俊*, 玉置維昭**

New Process of Solid State Welding—Electromagnetic Welding

Masatoshi Kojima and Koreaki Tamaki

Synopsis

Electromagnetic welding belongs to the high energy rate welding as explosive welding does. It uses a pulsed electromagnetic pressure which is induced by a coil, and it can be treated more safely than explosive welding. This process is applicable to joining tubes of aluminum, copper and other metals of smaller diameters.

The current source used by the authors is a capacitor bank of $500\mu\text{F}$ in capacitance and 10kV in proof voltage. A solenoidal coil made of a shielded copper wire of 1.2mm in diameter is suitable for this current source.

Welding is performed either (1) by setting the coil outside the outer tube or (2) by setting it inside the inner tube. In the case (1), the joints of straight tube—straight core with certain clearance between them, straight tube—tapered core, and tapered tube—straight core can be used. In the case (2), the joint of tapered outer—tube—straight inner—tube will be suitable.

Welded interface exhibits a wavy pattern which is typical with the case of high energy rate welding. Although some intermetallic compound exists at the interface, its quantity is smaller than those obtained by other solid state welding processes, and it will affect little on the service performance of the welded joint.

1. 結 言

固相接合法は材料を溶融せず、終始固体状態で接合を行う方法であって、この方法には主として加熱による方法（拡散接合）と、加圧、変形による方法（変形接合）がある。後者の場合、鍛接、摩擦圧接のように外部加熱または材料自体の発熱を利用する方法と、爆発圧接のように加熱せずに、衝撃的加圧により圧接する方法がある。

爆発圧接法は亜音速の高速飛翔体が他の物体に衝突するときに生じる加圧力を利用するもので、クラッド材の製造などに活用されている。ここで述べる電磁圧接法は爆発圧接における火薬の爆発エネルギーの代りに磁気エネルギーを用いる方法であって、本質的な接合機構は爆発圧接の場合と同じと考えられる。しかし作業の安全性を考えると電磁圧接のほうがはるかに優れている。

本稿では電磁圧接法の特徴、原理および電磁圧接装置について説明したあと、継手形状、接合条件および接合機構に関する著者らの研究結果を紹介する。

1990年7月19日受付

*三重大学工学部機械材料工学科助教授，工博

**三重大学工学部機械材料工学科教授，工博

2. 電磁圧接法の特徴

電磁圧接法は固相接合法としての次の長所を有する。①融接の場合のように材料を溶融しないので、空気中の酸素および窒素による汚染が極小になる。②融接の場合のような局所的な急速加熱・冷却に伴う残留応力、溶接変形および材質劣化の問題が生じにくい。③異種金属を融接および抵抗溶接で接合した場合、脆い金属化合物の層を生じるのであるが、固相接合の場合、この金属間化合物層の厚さは小さく、継手性能に影響することが少ない。また他の固相接合法に対し、電磁圧接法は爆発圧接法とともに次の長所を有する。①材料を加熱しないので、材料の顕微鏡組織および機械的性質に影響を与えない。②同じ理由で異種金属継手における金属間化合物層が極小になる。③接合界面が波形を呈しているため、他の固相接合法による平坦な界面にくらべて、一般に強度および気密性が高い。④圧接に要する時間が極端に短い(1msec 以下)。

さらに爆発圧接にくらべて次の点が優れている。①電磁圧接では、電気的エネルギーをコイルで磁氣的エネルギーに換えて材料に供給する。このためエネルギー供給量の制御が容易である。②爆発圧接のように人里離れたところではなく、町中の通常の工場内で実施することができる。

しかし電磁圧接には次の短所がある。①火薬の爆発エネルギーにくらべてコイルから取り出せる磁気エネルギーは小さいので、比較的小型の部材

にしか適用できない。②圧接できる継手形状に制限がある。③コイルと電源装置の設計、製造に関し、なお研究の余地がある。

3. 電磁圧接法の原理

3.1 固相接合の基本条件

2個の原子間にはFig. 1に示すように引力と斥力が作用し、格子定数に相当する位置でこれらは釣り合っている。この平衡位置までは原子間に引力が作用するので、原子間引力の作用する距離にまで原子を接近させれば2つの原子群(金属)が接合するはずである。この接合を妨げる主な因子は、表面汚染物質層(酸化物質層や吸着層)と表面の凹凸の存在である。すなわち前者は金属表面を安定化させ、原子間引力の低下や消失をまねく。また後者は実質的な接合界面の面積を減少させる。そこで固相接合では、汚染のない新生面を現出させるための何らかの機構と、表面全体を接合界面にするための圧力を必要とする。

Fig. 1. Forces between pair atoms.

(a) In case of the tube inside the coil

(b) In case of the tube outside the coil

Fig. 2. Electromagnetic pressure acting to the tube.

なお圧接時の温度は原子の拡散と材料の変形抵抗に影響し、高温ほど一般に接合が容易である。

3.2 電磁力の発生

Fig. 2(a), (b)に電磁圧接法における電磁力の発生原理を示す。コイルに高周波電流 I_1 を流すと、コイル内に変動磁界 H_2 が発生する。このコイルの内側に Fig. 2(a)のように金属円管を置くと、その外表面に円管内部の磁界を打ち消す方向に誘導電流 I_2 が発生する⁷⁾。この H_2 と I_2 により円管の外表面にはフレミングの左手の法則の方向に下式のマックスウェルの電磁圧力 P_r が発生し、円管は半径方向に押し縮められる。

$$p_r = -\mu H_2^2 \quad (\mu \text{ は金属管の透磁率})$$

また Fig. 2(b)のようにコイルの外側に金属円管を置いた場合には、円管の内表面に誘導電流 I_2 が発生する⁷⁾。この場合の電磁圧力は I_2 の作る磁界 H_{z2} と I_2 により円管の内表面に発生し、円管は半径方向に押し広げられる。

このように電磁圧接法では円管に生じる誘導電流を利用して電磁力を発生させているので、円管の材料は導電率の大きな金属が好ましい。

3.3 接合機構

上述の管の飛翔方向に静止材を置き、Fig. 3のように両者を斜めに衝突させる。管の衝突速度が速ければ、衝突点において両部材の表面を剥ぎ取る噴流(メタルジェット)⁸⁾が発生する。このメタルジェットによって表面汚染物質層が前方に排除

Fig. 3. High velocity oblique impact and the formation of metal jet.

され、清浄な面どうしが接触して接合が起る。メタルジェットの発生と同時に渦も発生するので、接合界面はこの圧接法に特有な波形をしたものとなる。なお両部材の密度や強度が大きく異なると、渦を発生せずに接合する場合もあるが、この場合でも大きな接合強度を示す。このことは高速飛翔体の斜め衝突による接合が、単なる機械的嵌合ではなく、原子間の結合力による接合であることを示している。なお波の存在は接合面積の増大と形状的な嵌合の両者に寄与するので、本法で得られた圧接部の接合強度は一般に他の固相接合法によるものよりも高いといえる。

なお渦の発生機構に関してはいくつかの説が提出されているが、最有力のものは流体におけるカルマン渦列と同じとする説である。波の周期は衝突角度によって主に変化し、衝突速度にはあまり依存しない。

4. 電磁圧接装置

4.1 瞬間大電流発生装置

電磁圧接法では Fig. 4 に示す瞬間大電流発生装置にコイルを接続して大きな電磁力を得ている。電流発生装置は充電エネルギーの大きなコンデンサーバンクとその充電・放電回路で構成されている。コンデンサーバンクとしては、①充電エネルギーの大きなもの、②同じ充電エネルギーならば高耐圧のもの、が最大電流値を大きくできるので好ましい。著者らの現有装置は容量500 μ F、耐圧10kV、充電エネルギー12.5kJのバンクである。

電磁圧接で用いるコイルのインダクタンスや抵抗は小さいので、電源装置の内部インダクタンスと内部抵抗を極力小さくする必要がある。大電流

Fig. 4. Electromagnetic welding apparatus.

を瞬間的に流す場合にはスイッチも重要であり、本装置ではイグナイトロンを用いている。

4.2 コイル

電磁圧接におけるコイルは、電流を磁界に変換する重要な役割を有している。通常は変換効率の良いソレノイド形のコイルを用いるが、大型の電源装置では変換効率は悪くても補強と保守の容易な1回巻コイル¹⁰⁾を用いることもある。1回巻コイルを用いる場合にはコイルのインダクタンスと抵抗が極めて小さくなるので、回路の内部インダクタンスと内部抵抗を特に小さくしなければならない。

Fig. 5(a), (b)に著者らが使用しているコイルの型式を示す。Fig. 5(a)は細線コイル^{11~14)}と呼ぶもので、エナメル被覆銅線を継手寸法に合わせて密に巻いただけのものである。銅線の線径は1.2mmと2.4mmである。このコイルは圧接時にコイルに作用する電磁力で破壊する型式であり、密閉容器内で使用する必要がある。Fig. 5(b)は補強コイル^{5,15)}と呼ぶもので、コイルの線輪断面を幅広の矩形にし、さらに、このコイルを鋼の補強容器内に入れたものである。電気絶縁のために線輪にガラスウールを巻き、線輪間に雲母板を挟み、これらをエポキシ樹脂で固めている。このコイルは強度的には十分に電磁力に耐えられるが、絶縁膜が使

Fig. 5. Coils used for electromagnetic welding.

用中に徐々に破壊するので補修が必要である。

細線コイルは径とピッチを小さくできるので、比較的小型の電源装置でも大きい磁界を発生できる。細線コイルでは線径の細いコイルほど発生磁界が大きい。しかし細線コイルに大電流を流すと、通電中の電磁力で変形を起して磁界の変換効率が低下する。この磁界の変換効率の低下は、線径の小さいコイルほど著しい。そのため、細線コイルには発生させる磁界の大きさによって最適の線径が存在する。一方、補強コイルは細線コイルよりも磁界の変換効率が悪い。しかし大電流を流しても変換効率の低下が起らないので、大型の電源装置では細線コイルよりも大きな磁界を発生できる。著者らの電源装置は小型に属するもので、以下で示す圧接実験には主に線径1.2mmの細線コイルを使用している。

5. 電磁圧接における接合界面¹⁾

Photo. 1(a), (b)に飛翔材と静止材に同種金属を用いた接合界面の腐食後の顕微鏡写真を示す。AlとCuのどちらの金属においても接合界面は波形を呈し、電磁圧接法が爆発圧接法と同じ高速飛翔体の斜め衝突によるメタルジェット形成によって接合していることがわかる。同種金属の場合には飛翔材と静止材の区別が波形から判断できないほど対称性のよい波となる。

Fig. 6に接合界面を横切る断面内で測定したAlの硬さ分布を示す。硬さは接合界面で最も高く、接合時に界面近傍で大きな塑性変形をしたことを示している。Fig. 6より飛翔材の硬さの方が静止材よりも高いが、これは飛翔材が静止材と衝突するまでに塑性変形をするためである。

他の研究者らの報告によれば、その他の金属としてSAP⁹⁾、ステンレス鋼(SUS 316)、Inconel 706、Nimonic (PE 16)¹⁰⁾、鋼¹¹⁾の電磁圧接も可能である。

Photo. 2(a), (b)は飛翔材と静止材に異種金属を用いた場合の接合界面の顕微鏡写真である。異種金属継手では変形抵抗の小さい金属の方を飛翔材とする方が圧接しやすく、Photo. 2はそのようにして圧接した場合である。異種金属で密度と変形抵抗にかなりの差のある組み合わせ(Photo. 2(a), (b))では波が発生することもあるが、一般には波が発生しにくい。一方、これらにあまり差のな

Photo. 1. Microstructures of welded interfaces.

- (a) Al to Al (etched by $\text{HF} \cdot \text{H}_2\text{O}$ solution)
- (b) Cu to Cu (etched by $\text{NH}_4\text{OH} \cdot \text{H}_2\text{O}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ solution)

Photo. 2. Microstructures of welded interfaces of dissimilar metal joints ($\times 240 \times \frac{3}{5}$).

- (a) Al to Cu (etched by Nital)
- (b) Al to mild steel (etched by Nital)
- (c) Cu to mild steel (etched by Nital)

Fig. 6. Hardness distribution across the interface of welded joint of aluminum.

い組み合わせ(Photo. 2 (c)) では同種金属の場合と同様に界面に波が形成される。

異種金属の継手では接合界面の一部に金属間化合物が存在する。この金属間化合物は下記の過程で生成したものと推定される。すなわち衝突が起きたときに衝突点で両金属の合金融液を生じ、その一部がメタルジェットにより前方に吹き飛ばされ、残りが接合界面に残留して凝固し、金属間化合物になったものであろう。金属間化合物は一般に脆いので、その残留は好ましいものではない。しかし電磁圧接の接合界面に存在する金属間化合物は薄く量が少ないので、接合強度と気密性に与える影響は少ない。金属間化合物の残留量は飛翔管の速度を速くするほど多くなる。

Photo. 2 は面心立方格子の Al と Cu が体心立方格子の軟鋼と圧接できることを、また、融点 660°C の Al が融点 1500°C 近くの軟鋼に圧接できることを示している。これらの例からもわかるように結晶構造や融点が異なる材料の組み合わせでも圧接可能である。

6. 継手形状とそれらの接合領域、接合条件

6.1 平行継手^{2),4)}

平行継手の基本形は飛翔管に薄肉円管、静止材に円柱を用いるものである。Fig. 7 にこの継手の圧接前・後の形状と継手の接合位置の例を示す。

円管と円柱の間には隙間 C を設け、高速度に加速された円管を円柱と衝突させることが必要である。この継手ではコイル端に近い2箇所で見合が得られ、Fig. 7 ではこの位置をコイル中心からの距離で示している。Fig. 7 は外径 20mm 、肉厚 1mm の円管の場合であり、試験材料は Al、コンデンサーバンクの容量は $1000\mu\text{F}$ 、充電電圧は 4.5kV とし、コイルの巻数 N は $10, 15$ および 20 の3種類を用いた。各継手とも Fig. 7 中の両側に矢印を付けた線分の位置で接合している。平行継手の接合部の幅は $1\sim 3\text{mm}$ と短い、それでも引張剪断試験を行うと接合部の端の円管部で破断し、接合部では破断しない。

類似の継手として静止心材を円管にしても結果はほぼ同じである。この場合、飛翔管の衝突によって静止円管の径は押し縮められているので、静止円管に心金を入れる必要がある。

Fig. 8 は円管外径 D ごとに接合可能な隙間 C とコイルのインダクタンス L の条件範囲を示したものである。他の条件は前図と同じである。Fig. 8 では D ごとに囲んだ円形に近い実線内の条件範囲であれば、継手が接合できることを示している。Fig. 8 より接合可能な C と L の条件範囲は D とともに広がることより、飛翔管の直径 D は大きいほど接合しやすいことがわかる。また、これらはほぼ同心円的に広がっていることより、隙間 C とコイルのインダクタンス L には最適値が存在し、これらは同心円の中心位置の $C = 3\text{mm}$ 、 $L = 3\mu\text{H}$ であるといえる。

6.2 テーパー継手^{3),7)}

Fig. 9 は飛翔管に円管を、静止材にテーパー付き心材を用いた片テーパー継手の接合位置の変化を示す。Fig. 9 は外径 20mm 、肉厚 1mm の Al 円管を15巻コイルを用い、コンデンサー容量 $1000\mu\text{F}$ 、充電電圧 4.5kV の条件で圧接した場合である。心材にテーパーを付けると、Fig. 9 に見られるように角度に応じて2箇所の接合部が移動し、それとともに各接合部の幅も変化する。最大の接合幅が得られるテーパー角度は接合部がコイルの中心部に位置する 12.5° の場合であり、その幅は 10mm に達する。接合部がコイル中心から離れるほど接合幅が狭くなるが、これはソレノイド形コイルの磁界分布がコイル中心で最大になるためである。また、テーパー継手における接合部の移動は、電磁

Fig. 7. Parallel joint and its welded positions.

Fig. 8. Variation of the acceptable limits of clearance with L .

Fig. 9. Single tapered core joint and its welded position.

圧接における接合が飛翔管と静止材の衝突角度によっても支配されることによる。例えば, Fig. 9のコイル中心における接合可能な衝突角度の範囲は $5.5 \sim 17.5^\circ$ である。接合可能な衝突角度の上限の方が下限よりも飛翔管の速度によって影響を受けやすいので, 最適衝突角度, すなわち最も小さなエネルギーで圧接できる角度は 5.5° より少し大きめの 8° 前後にあると考えられる。

類似の継手に Fig. 10(a), (b), (c)に示す凹形と凸形の両テーパ継手と, 飛翔管の方をテーパ付円管にしたテーパ付円管継手がある。凹形両テーパ継手は Fig. 9の第一象限($+z + \alpha$)を第二象限($+z - \alpha$)で置き換えたことに, 凸形両テーパ継手は第二象限を第一象限で置き換えたことに相当³⁾している。これらの継手ではテーパ会合部が特異点となり, その近傍1~2 mmの部分で接合しないが, その他の部分は Fig. 9から予想される接合位置とほぼ一致する。1個の継

手内で最も広い接合幅の得られる条件は凹形継手のテーパ角度 17.5° の場合で, 全接合幅は10.6 mmである。

Fig. 10. Various tapered joints.

飛翔管をテーパ付円管とした場合には、コイルも円柱形から円錐形のソレノイドに変更し、コイルと管の間の隙間を無くしている。この継手の利点は圧接後の円管と心材の間に段差を生じないことである。

Fig. 11 は円管を電磁力で押し拡げてテーパ穴付静止管に圧接した場合の接合位置の変化を示す。Fig. 11は飛翔円管にAl, 静止円管に軟鋼を用いた場合であり、20巻コイルを用いてコンデンサー容量 $500\mu\text{F}$, 充電電圧 7kV で圧接している。Fig. 11より押し拡げ法の場合の接合部も、押し縮め法の場合とよく似た変化をするといえる。押し拡げ法の場合の問題点はコイルと円管の変形方向が同じであり、圧接後の継手の図示の位置にコイルの衝突による打傷をつけることである。そこで、Fig. 12に示すように静止円管を短くして打傷部を継手外に出すことが検討されている。この方法は広い接合部を狭くはするが、継手内に欠陥を残さない点で有利である。また継手外に出る内管は圧接時の電磁力で切り取られるので、とくに後加工を必要としない。この方法はテーパ角度が 7.5° 以下では継手内に接合部が残らない。最も広い接合部の得られる条件はテーパ角度 15° の場合であり、その接合幅は 6.5mm である。

Fig. 11. Joint used for tube extension welding and its welded position.

7. 圧接に要する最低の衝突速度と衝突加速度^{5),6)}

電磁圧接法では高速度に加速された飛翔管の衝突を利用するので、飛翔管をある臨界の速度と加速度以上で静止材と衝突させることが必要となる。この臨界値をAlについて調べた結果をFig. 13に示す。Fig. 13の横軸と縦軸は飛翔管が静止材に衝突した時の衝突速度と衝突加速度で、Fig. 13中の白丸はこの位置の衝突速度と衝突加速度の組み合わせで継手が接合したことを、一方、黒丸はこの位置の組み合わせでは接合しなかったことを示している。Fig. 13は飛翔管の変形解析か

Fig. 12. Modified tube extension joint.

Fig. 13. Effect of impact velocity and impact acceleration on result of welding.

ら求めたものであり、この実験では電磁力を算出しやすい補強コイルを用いている。

Fig. 13に見られるように白丸は衝突速度と加速度の大きな方の領域を、一方、黒丸はこれらの小さな方の領域を占めている。両領域の境界線がAlを圧接するのに必要な最低の衝突速度 V_{cr} と衝突加速度 a_{cr} の臨界線であり、これは次の楕円式となる。

$$(V_{cr}/420)^2 + (a_{cr}/16.3/10^6)^2 = 1$$

上式は、電磁圧接の接合では衝突速度と同様に衝突加速度も接合を支配する主要因子であり、加速度0の衝突では420m/s以上の衝突速度が必要であることを、加速度があればそれ以下の速度で接合可能であることを示している。爆発圧接ではAl板の接合に1400ft/s(約420m/s)以上の速度が必要とされているが、この値は実験の加速度0の値と一致している。

8. ま と め

電磁圧接法は実用化途上にある溶接法であるが、異種金属や接合強度が要求される管継手への適用が期待されている。この溶接法の発展のためには内部インダクタンスと内部抵抗の極めて小さな電源装置と、補修の要らない補強コイルの開発が必要となるであろう。超電導コイルの使用も考えられるが、圧接には高周波の大きな磁界を必要とするので、超電導材のヒステリシスと臨界磁界が問題となる。しかし超電導コイルは魅力的であり、将来はこのコイルも電磁圧接に利用されるで

あろう。またコイルに作用する電磁力を低く押さえるのに効果のある磁場集中器の検討も補強コイルには有効であろう。

電磁圧接法の有効性が認められ、ひろく実用化されることを期待するものである。

(文 献)

- 1) 益本, 玉置, 小嶋: 溶接学会誌, **49** (1980) 1, 29
- 2) 玉置, 小嶋: 溶接学会誌, **50** (1981)12, 1191
- 3) 小嶋, 玉置, 古田: 溶接学会誌, **52** (1983) 2, 169
- 4) 小嶋, 玉置: 溶接学会論文集, **1** (1983) 2, 188
- 5) 小嶋, 玉置 他: 溶接学会論文集, **7** (1989) 1, 75
- 6) 小嶋, 玉置 他: 溶接学会論文集, **8** (1990) 2, 185
- 7) 小嶋, 玉置 他: 溶接学会講演概要, **45** (1989), 268
- 8) A. S. Bahrani et al: Pros. Roy. Soc., **296** (1967), 123
- 9) M. Grin et al: Revue de Métall., **67** (1970) 2, 125
- 10) W. F. Brown et al: Welding J., **57** (1978) 6, 22
- 11) ヤブロチニコフ: アフトマティチェスカヤ スバルカ, **2** (1983), 61