摩擦圧接設備と技術

沖田 耕三*・有年 雅敏**

Recent technical information of friction welding and equipment

Kozo OKITA* and Masatoshi ARITOSHI**

1. はじめに

摩擦圧接法は、摩擦熱を利用して材料を接合する方法である。日本においては、1960年代の中頃より実用化が始まった。

摩擦圧接法は比較的新しい接合技術であり産業界ではあまり知られておらず、そのメリットが十分に理解されていないのが実情である。しかし、最近では軽金属系と鉄系の異種金属の接合が容易であることが認識されはじめ、利用が増加しつつある。また、異種金属の接合が比較的容易であり、環境にやさしいため、21世紀型接合技術として注目されつつある。

ここでは、摩擦圧接の原理、特徴、摩擦圧接機、アルミニウム合金継手の機械的性質、接合機構等を紹介する。

2. 摩擦圧接の原理

摩擦圧接は、接合しようとする材料を突合せて加圧し、その接触面において機械的に相対運動を行わせ、摩擦熱を熱源として利用する接合法である。

図1にそのプロセスを示す。(A)相対運動している材料に対して、一定の加圧 P_1 で材料を接触させ、(B)相対運動と加圧力とによって生じる摩擦熱を利用して清浄面を得て、

図1 摩擦圧接の原理

(C)さらにもう一段の加圧力 P_2 を加えることによって圧接が完了する。

図2に図1の動作を実現するための摩擦圧接サイクルを示した。この方式はブレーキ式と言われている。圧接条件としては、回転数、摩擦圧力、アプセット圧力、摩擦時間、アプセット時間である。これらの条件を適切に設定することにより、健全な継手を得ることができる。

3. 摩擦圧接の特徴

(1) 溶接棒や溶剤、ガス等を要せず、特別な開先面加工を必要としない。

(2) 接合しようとする面が、即発熱面となることから、接合に利用されるエネルギーの集中性がよくエネルギー効率が高い。

(3) 発熱が極めて狭い範囲に均等に行われることから、変形が少なく寸法精度が高いのでパイプの接合にも適している。

(4) 異種金属の接合が可能であり、機能部品が容易に製作できる。

(5) 継手の機械的強度が高い。

(6) 材料の節約、省資源、工数の低減ができる。摩擦圧接時間が短く、作業能率が高い。とくにアルミニウムの接合時間は数秒以内である。

(7) 圧接条件が設定されると自動制御されるので、再現性

図2 摩擦圧接サイクル

* 大阪産業大学 (〒574-0013 大阪府大東市中垣内 3-1-1). Osaka Sangyou University (3-1-1 Nakakakiuchi, Daito-shi, Osaka 574-0013).

** 兵庫県立工業技術センター (神戸市). Hyogo Prefectural Institute of Industrial Research (Kobe-shi, Hyogo).

受理日：平成13年4月2日

13 溶接 2

表 1 摩擦圧接機の諸元例

型 式		15型 横型	30型 横型 スライド ヘッド式	30型 たて型	60型 横型	60型 横型 スライド ヘッド式	60型 横型	80型 横型	100型 横型 スライド ヘッド式	150型 横型	200型 横型	200型 横型 スライド ヘッド式
圧接能力 (鉄鋼丸棒) (mm)		6~15	10~30	10~30	20~60	20~60	20~60	25~80	30~100	50~150	60~200	50~200
取付可能 素材最大 寸法 (mm)	回転側	φ16 ×300	φ32 ×350	φ35 ×400	φ60 ×400	φ60 ×400	φ60 ×500	φ78 ×550	φ100 ×250 φ80 ×550	φ150 ×300 φ120 ×1,000	φ200 ×400 φ150 ×1,200	φ200 ×400
	固定側	φ25 ×400	φ45 ×900	φ80 ×350	φ80 ×1,000	φ130 ×1,000	φ100 ×1,000	φ115 ×1,400	φ200 ×1,200	φ300 ×2,000	φ350 ×3,000	φ350 ×2,500
最大圧接 推力 (kgf)	摩擦時	1,200	4,000	—	15,000	15,000	—	20,000	30,000	50,000	100,000	100,000
	アプセ ット時	2,500	10,000	10,000	30,000	40,000	30,000	60,000	85,000	150,000	300,000	300,000
主軸回転数 (rpm)		3,000	2,400	2,000	1,500	1,500	1,300	1,000	1,000	650	450	400
素材把握 方式	回転軸	コレット チャック	三方締 チャック	三方締 チャック	三方締 チャック	三方締 チャック	三方締 チャック	三方締 チャック	三方締 チャック	三方締 チャック	三方締 チャック	三方締 チャック
	固定側	水平両 開 閉 バイス	水平両 開 閉 バイス	水平両 開 閉 バイス	水平両 開 閉 バイス	水平両 開 閉 バイス	水平両 開 閉 バイス	水平両 開 閉 バイス	水平両 開 閉 バイス	水平両 開 閉 バイス	水平両 開 閉 バイス	水平両 開 閉 バイス
主軸モータ (kW)		7.5-4P	15-4P	15-4P	22-4P	30-4P	37-4/8P	45-6P	55-4P	110-6P	200-6P	200-6P
総 重 量 (kg)		1,700	4,100	3,000	5,800	7,000	8,000	12,500	18,000	25,000	50,000	140,000

(各社カタログより抜粋)

はよい。

4. 摩擦圧接機

摩擦圧接機は一種の工作機械と考えてよい。現在日本製の摩擦圧接機は世界最高水準であり、外国にも輸出されている。圧接能力は炭素鋼丸棒で換算されており、最小は約3mm～最大200mmまで接合が可能である。しかし、これを一台の摩擦圧接機で接合することができない。そのため、委託加工専門企業は数台の機械を保有している。

製品の形状、作業性に応じて使い分けられているが、小型の圧接機は横型と縦型の二種があり、大型機は横型である。また、汎用機と専用機があり、自社製品の場合はほとんど専用機で、委託加工では汎用機を使用しているが治具の製作技術が極めて重要である。

表1は摩擦圧接機の諸元例を示したものである。15, 60型と表示されているのは圧接能力を示したものである。これらの圧接機はすべて加圧力は油圧式であり、回転数も一定になっている。現在でも圧接品の大半は鉄系である。この場合は圧接条件の範囲は広く接合しやすい材料である。しかし、軽金属系の場合は圧接条件の幅は狭く高精度の制御を必要とする。また、ユーザの要求も厳しくそれに対応するため新しい摩擦圧接機が開発されている。その原動力となったのは大出力のサーボモータが入手できるようになったからである。

図3はFF-30ⅡM型摩擦圧接機である。本機は軽金属、各種異種金属の接合に対応できるように開発されたものである。また、研究開発用をも目的にしている。推力は油圧式でなくACサーボモータを使用している。

本機の仕様は従来機と比較すると、

図3 FF-30ⅡM型摩擦圧接機

推力 4.9~68.6 kN (従来 11.7~68 kN)
寸法設定 0.01 mm (従来 0.1 mm)
回転数 100~4000 rpm (従来 2000 rpm)

と従来機に比較して条件の範囲が広い。

図4はFW45X-S型NCサーボ式位相合せ摩擦圧接機である。本機も軽金属、異種金属、薄肉形状材など従来機では難しかった圧接品への適用が容易になった。図3の圧接機と同じく圧接条件の設定は圧力、回転数、寸法制御等を時系列的に可変することができる。本機の仕様は推力49~117 kN、回転数最大2000 rpmまで可変。これら両機のもう一つの大きな特徴は位相合せが簡単にできることであり、精度は±0.5度と表示されている。これより圧接品の適用範囲が拡大されると予想される。また低騒音、省スペース、操作性、作業性等に配慮している。

図4 FW45X-S 型摩擦圧接機

図6 高真空・低温機器用配管部品

(a) Joint efficiency

(b) Elongation ratio

図5 アルミニウム合金の継手効率と伸び

5. 継手効率と接合機構

図5はアルミニウムおよびアルミニウム合金の各種の組合せにおける摩擦圧接の継手効率を系統的に研究したものである¹⁾。同図は組合せた材料の引張強さおよび伸びの低い材料に対する継手効率および材料の伸びとの比率を示したものである。継手効率は6000系合金との組合せでは70～78%であるが、その他の組合せでは80%以上の良好な継手効率を得られており、破断位置は熱影響部と母材部である。伸びについては、2000系合金では約35%と低いが、その他の場合は60%以上の良好な値を得られている。

融点の異なる金属が摩擦することで、強度のある製品が造れるはずがないと思っている人もいるが、アルミニウムとステンレス鋼との圧接品が10年以上も使用されている。

筆者等はこの接合機構について TEM 観察を中心にして系

統的に研究を行ってきたので紹介する。

工業用純アルミニウム1050、Al-Mg系の5052合金、Al-Mg-Si系の6061合金とSUS304鋼との摩擦圧接においては、接合界面のSEMや超音波顕微鏡観察により、接合は界面の外周部から中心部へ向かって進行することを明らかにした²⁾。TEM観察の結果、圧接界面に Fe_2Al_3 の生成および各元素の数nmオーダーで相互拡散が認められた³⁾。また、圧接面に生成する反応層の成長挙動と継手強度の関係⁴⁾および反応層の厚さから圧接界面の摩擦面温度の推定を行った⁵⁾。摩擦圧接界面近傍では高温・強加工を受けるためにアルミニウムの結晶粒径が $1\mu\text{m}$ 程度まで超微細化される現象を発見した⁶⁾。さらに、圧接界面ではアルミニウムとステンレス鋼が激しい摩擦現象を起こすことによりアモルファス化することも観察した⁷⁾。現時点ではこれらの現象が複合的に起こっているため、アルミニウムとステンレス鋼のように溶融点の異なる金属が接合されるものと推定している。次に二、三の実用化されている製品を紹介する。図6はアルミニウムとステンレス鋼を摩擦圧接した高真空・極低温機器用配管部品である。爆着・ろう付けに比べると加工法は簡便でかつ低価格で性能がよい。図7はこの中に特殊ガスを封入して電子部品を保護するが15年以上も問題なく使用されている。図8はアルミニウムと銅との摩擦圧接品で送電線締結部品である。電力部品としての厳しい各種の試験を合格しており、20年以上も使用されている。

13 溶接 2

図8 送電線締結部品(銅とアルミニウムとの摩擦圧接)

図9 摩擦攪拌接合

6. 摩擦攪拌接合

この技術は1990年英国の TWI により開発されたものであり、摩擦による加熱と塑性流動を応用した新しいアルミニウム合金の接合法である⁸⁾。この技術によりアルミニウム合金 2000系、7000系等の極めて溶接が困難な材料に対して容易に接合ができるようになった⁹⁾。

この接合法は I 形開先の突合せ継手を溶接材料なしで高能

率で接合でき、溶接変形も小さく、さらに固相接合であるため凝固割れやブローホールも発生しないといった、これまでのアルミニウム合金溶接に比較して優れた特徴を有している。

図9はその接合過程を示したものである。図のように先端部に特殊形状の接合ピンを有する円柱形の接合金具を回転させながら接合界面に圧入し接合する方法である。

7. あとがき

今後、摩擦圧接を適用したいと考えている企業は委託加工専門型企業、メーカーに相談されるのが一つの方法である。

ここに、油圧式、サーボモータ式を紹介したが、それぞれ特徴があり製品により使い分けるとよい。関連の JIS 規格は JIS Z 3607炭素鋼の摩擦圧接作業基準がある。

参 考 文 献

- 1) 加藤数良, 時末 光: 日本大学生産工学部研究報告 A, 35 (2000), 7.
- 2) S. Fukumoto, H. Tubakino, K. Okita, M. Aritoshi and T. Tomita: Materials and Technology, 15 (1999), 1080.
- 3) S. Fukumoto, H. Tubakino, K. Okita, M. Aritoshi and T. Tomita: Materials and Technology, 14 (1998), 333.
- 4) 福本信次, 椿野晴繁, 沖田耕三, 有年雅敏, 富田友樹: 摩擦圧接, 5 (1999), 96.
- 5) S. Fukumoto, H. Tubakino, K. Okita, M. Aritoshi and T. Tomita: Proc. of the International Conference on Solid-Solid Phase Transformations '99 (JIMC-3), (1999), 483.
- 6) S. Fukumoto, H. Tubakino, K. Okita, M. Aritoshi and T. Tomita: Materials Science and Technology, (accepted).
- 7) S. Fukumoto, H. Tubakino, K. Okita, M. Aritoshi and T. Tomita: Scripta Materialia, 42 (2000), 807.
- 8) C. Dawes: TWI Bulletin, Nev/Dec, (1995), 124.
- 9) 古賀信次: 摩擦圧接, 62 (2000), 86.