衝撃工学を応用した金属の塑性加工 —電磁シーム圧接—

宮 崎 忠*

1. はじめに

私は2002年9月に電気通信大学電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻を修了後、現在旭川工業高等専門学校機械システム工学科に勤務しています。この度、本誌に寄稿する機会をいただきました。学位取得時はアルミニウム角管の動的軸圧縮変形に関する研究を行っていました。現在、それに加え、東京都立工業高等専門学校(現：東京都立産業技術高等専門学校)相沢名誉教授、岡川教授らと薄板と箔の衝撃電磁シーム圧接に関する研究を行っています。以下の項より薄板と箔の電磁シーム圧接に関する研究について紹介させていただきます。

2. 電磁シーム圧接法

(1) 電磁シーム圧接法について

電磁シーム圧接法は、アルミニウム、銅など良伝導性の金属材料に高密度磁束を急激に加え、電磁力を利用して他の金属材料に接合する方法である。外国で出願された金属円管を成形または接合する特許⁽¹⁾が公開された。その後円管を中心に各種の管材の接合結果が報告⁽²⁾⁻⁽⁴⁾された。1999年になり、重ねた金属板をシーム圧接する特許⁽⁵⁾が公開されアルミニウム薄板など圧接した結果が報告⁽⁶⁾⁽⁷⁾されている。さらに近年、本圧接法を薄板だけではなく10 μm 以下の金属箔の接合にも適用する方法が発表⁽⁸⁾⁽⁹⁾された。

(2) 接合の原理

(a) 薄板のシーム圧接

同じ板厚のアルミニウム薄板同士をシーム圧接する原理に

ついて図1(a)を用いて説明する。2枚の薄板または箔、絶縁シート、加圧用金属板、コイルおよび磁束の断面が示されている。図1(a)に示されているコイルにパルス大電流を急激に流すと、発生する高密度の磁束(磁束密度 B)が重ねたアルミニウム板の重ねた部分に交差する。重ねた部分には、渦電流(電流密度 i)が流れ、磁束の浸入を防ぐ。この結果、渦電流でジュール加熱されたアルミニウム薄板は、電磁力で互いに強く押圧され、コイルに沿ってシーム圧接される。重ねたAl板に1mm程度の間隙があると、アルミニウム板は合わさるときの衝突の効果で効率よく圧接される⁽¹⁰⁾。放電エネルギーなどの接合条件により異なるが、間隙1mmの場合の板材同士の衝突速度は約300~450 m/s、衝突時間は約5~7 μs である⁽¹¹⁾。

金属板に発生する渦電流(電流密度 i)、単位体積あたり働く電磁力 f および単位体積あたり発生するジュール熱 Q は式(1)、(2)および(3)で与えられる。ただし、 κ は金属板の導電率、 B は磁束密度である。

図1 接合の原理(磁束方向断面)。

* 旭川工業高等専門学校助教；機械システム工学科(〒071-8142 旭川市春光台2条2-1-6)

Metal Forming Applied to Impact Engineering—Magnetic Pressure Welding—; Makoto Miyazaki (Dept. of Mechanical Systems Engineering, Asahikawa National College of Technology, Asahikawa)

Keywords: pressure welding, magnetic pulse welding, seam welding, magnetic pressure

2007年5月11日受理

$$\text{rot } \mathbf{i} = -\kappa \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{i} \times \mathbf{B} \quad (2)$$

$$Q = -\frac{i^2}{\kappa} \quad (3)$$

磁束が金属板内へ浸透するおよその距離は、表皮深さ δ で表される。この値は、磁束が周期的に変化する角周波数を ω 、金属板の透磁率を μ とすると、式(4)で表される。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \kappa \mu}} \quad (4)$$

表皮深さ δ が金属板厚に比べて小さい場合、渦電流は主として板の表面部分に流れ、電磁力は表面部分に集中して働く。表皮深さ δ が板厚程度になると、板の内部にも分布して流れるようになる。この場合、板の内面もジュール加熱される。式(1)より導電率 κ が高い材料ほど渦電流がよく流れ、多量のジュール熱が発生する。ゆえにこの圧接法は、アルミニウムや銅など導電率の高い金属板の接合に向いている。なお、導電率の違うアルミニウム/銅薄板も同様にシーム圧接できる。

(3) 箔のシーム圧接

箔の圧接について図1(b)で説明する。この場合も薄板の場合と同様に、コイルにパルス大電流を急激に流すと高密度の磁束が、金属板の両側で急激に発生し、金属板に交差すると、その部分に渦電流が流れ、磁束の浸透を妨げる。渦電流でジュール加熱された金属板は、同時に電磁力を受け、間に挟まれた箔を押圧する。金属板へ加わる磁束の一部が内側へ浸透し、低密度の磁束となって箔に交差すると、箔にも渦電流が流れる。この結果、箔もジュール加熱される。金属板に働く電磁力および箔に流れる渦電流をそれぞれ適切に選べば、重ねた箔はコイルに沿って溶けることなく圧接される。箔の間にわずかな間隙を設けてもよい。

3. 圧 接 装 置

高密度の磁束を急激に発生させるために、高電圧、低インダクタンスのコンデンサ電源からワンターンコイルへ放電電流を急激に流す装置を使用する。装置全体の構成図を図2に示す。コンデンサ電源を充電した後、トリガ装置を起動し、放電スイッチを閉じ、コイルに減衰振動するパルス大電流を流す。この結果、コイル近くに電流に比例した高密度の磁束が発生する。

薄板の圧接装置の概略を図3、箔の圧接装置の概略を図4に示す。静電容量 C のコンデンサ電源-放電ギャップ・スイッチ G -平板状ワンターンコイルは放電回路である。(a)にコイル上板、(b)にコイル側面および放電回路、(c)にコイル下板、(d)に金属板、箔、コイル中央部の電流方向の断面および放電回路、(e)に金属板、箔、コイル中央部の電流に垂直な断面など、(f)には圧接された試料(平面図)が示されている。試料(f)の破線は引張せん断試験用の試験片採取方法を示す。

図2 装置全体の構成図。

図3 実験装置概略。(a) コイル上板、(b) コイル側面および放電回路、(c) コイル下板、(d) 金属薄板とコイル中央部の電流方向断面および放電回路、(e) 金属薄板とコイル中央部の電流に垂直な断面、(f) 接合された供試材。

電源を充電後、スイッチ G を閉じ、コイルに放電電流を流すと、電流が集中するコイル中央部分に高密度の磁束が発生する。この磁束は図1のように金属板に交差する。

電源の容量 C は $200 \mu\text{F}$ である。コイルの大きさは約 $200 \times 145 \times 20 \text{ mm}$ であり、クロム銅製の上下両板から構成されている。両板の厚さは、 10 mm 、その中央部は、長さ $a = 70 \text{ mm}$ 、幅 $b = 5 \text{ mm}$ で、箔の圧接で用いるコイルの箔側先端

図4 実験装置概略。(d) 金属薄板とコイル電流方向断面および放電回路，(f) 接合された供試材。

部は半円形である。放電回路の全インダクタンスは、約 $0.06 \mu\text{H}$ ，コイルのインダクタンスは、約 $0.04 \mu\text{H}$ である。この場合、電源に充電されたエネルギーの約60%が、磁気エネルギーとしてコイルへ移送される。

薄板の圧接で用いるアルミニウム合金板は A1050，銅板は C1100 で、板厚 0.5 mm，幅 50 mm，長さ 100 mm である。

箔の圧接で用いる加圧用金属板の材質はアルミニウム合金 (A1050) で、厚さ 0.3 mm，幅 50 mm，長さ 50 mm である。この両面は絶縁シート (ポリイミド) を挟んでコイルおよび箔から絶縁されている。箔の厚さは $6.5 \sim 10 \mu\text{m}$ ，幅 20 mm，長さ 40~100 mm である。2 枚の箔を重ね、図 4 のように金属板の間に入れ、全体をベークライト製厚板および締め付け金具で加圧、固定した。なお、必要な場合、箔の間に約 0.5 mm の間隙を設けた。

4. 実験結果

(1) 薄板のシーム圧接⁽⁸⁾

薄板は図 1 の方法で端から端まで図 5 のようにシーム圧接された。圧接部分の幅はコイル中央部の幅 $b=5 \text{ mm}$ にほぼ等しくその厚さは 1 割程度減少した。次に供試材を図 3(f) のように幅 10 mm で 5 等分し長手方向に引張せん断試験をし最大引張せん断荷重を調べた。試験結果を図 6 に示す。図 6 で、測定点●印は、接合面ではなく離し、○印は母材で破断した場合を示している。高い充電エネルギーで圧接するほど最大引張せん断荷重が高くなっている。充電エネルギーが 1.2 kJ 以上になると最大引張せん断荷重は 620 N 前後となり、この値は母材の最大引張荷重とほぼ同じである。

接合界面を光学顕微鏡で観察した結果を図 7 に示す。異種金属板の接合界面は、同種 (アルミニウム/アルミニウム) に比べ界面がはっきりしている。接合界面には、溶融凝固した状態は、ほとんど見られず、界面に波状模様が生じている。この波状模様は、本接合で見られる特徴の 1 つである。

図5 圧接された薄板の外観 (著者により写真差し替え)⁽⁸⁾。

図6 引張せん断試験の結果 (Al/Al)⁽⁸⁾。

図7 板の接合界面の光学顕微鏡写真⁽⁸⁾。

(2) 箔のシーム圧接⁽⁸⁾⁽⁹⁾

圧接されたアルミニウム箔/アルミニウム箔 (厚さ共に $6.5 \mu\text{m}$) および銅/ステンレス箔 (厚さ共に $10 \mu\text{m}$) の外観を図 8

(著者により写真差し替え)⁽⁸⁾

ま て り あ 第46巻 第11号(2007)
Materia Japan

図10 板の接合界面の光学顕微鏡写真⁽⁸⁾⁽⁹⁾

5. おわりに

文献

- (1) 特許公報：特公昭35-011813.
- (2) 日本塑性加工学会編：高エネルギー速度加工，(1993)，コロナ社.
- (3) 日本塑性加工学会編：接合，(1990)，コロナ社.
- (4) 益本 功，玉置維昭，小嶋昌俊：溶接学会誌，**49**(1980)，29-35.
- (5) 公開特許公報：特開平11-192562，(1999).
- (6) 相沢友勝：塑性と加工，**41**(2000)，265-267.
- (7) 相沢友勝：軽金属溶接，**41**(2003)，114.
- (8) 宮崎 忠，岡川啓悟，相沢友勝，熊谷正樹：軽金属，**57**(2007)，47-51.
- (9) 相沢友勝，宮崎 忠：機講論，**05-11**(2005)，511-512.
- (10) 相沢友勝，相沢和代，上杉恵理薫：第53回望加連講論，(2002)，71-72.
- (11) 岡川啓悟，相沢友勝：塑性と加工，**47**(2006)，632-636.