アルミニウム部材の高速圧接法の開発

宮崎 邦夫¹⁾、玉村 建雄²⁾、落合 和泉³⁾

1. 開発の背景と狙い

Al およびその合金は機器の軽量化に有用な金属材料としてますます多用される傾向にあり、同種のみならず異種金属との接合を必要とする構造が多くなっている。冷蔵庫や空調機においても熱交換器をすべて Al 材で製造する場合、コンプレッサ側との冷媒回路の接続に Al パイプと Cu パイプを接合する必要がある。この接続には予め Cu パイプと Al パイプを接合した移行継手を用い、両端部で同種材間のろう付や溶接を行うが、特に Al-Cu 継手は冷媒ガスの漏洩を防ぐため高い気密性と同時に、外力による変形に対して強靱であることが要求されている。

2. 接合プロセス

共晶圧接法で Al-Cu パイプを接合するプロセスは次の 3 段階で示される。

- (1) 接合端面を突合せ、加圧接触する(初期加圧)。
- (2) Al と Cu の共晶温度(548°C)以上に急速加熱する。
- (3) 加熱を停止し急冷すると共に、2 次加圧を行う(圧接)。

各段階での接合面の状態を図 1 の模式図で示す。

第 1 段階では、加圧(接合母材の塑性変形応力以下の圧力)によって接合面内の幾つかの点で酸化皮膜が破壊され、下地の Al と Cu 母材同士が接触している部分が

図 1 共晶圧接法の原理。

しかし、Al と Cu の接合は非常に困難を伴うことが多く、単なる融接や圧接では脆弱な共晶や金属間化合物相が生成⁽¹⁾したり、また Al の酸化皮膜が母材間の完全な接合を阻害する⁽²⁾。特に薄肉パイプの圧接では加圧力に限界があり、気密性の高い継手が得難い。

そのため、フラッシュバット法⁽³⁾、超音波ろう付法⁽⁴⁾、爆接法⁽⁵⁾などの特殊な方法が開発されているが、信頼性や生産性の面で一長一短がある。

そこで著者らは Al と Cu の共晶反応を利用して酸化皮膜の除去を行い、共晶融液が凝固する前に接合面から排出すれば、小さい加圧力で強靱かつ気密性の高い継手が得られるものと考え研究に着手した(以下、この方法を共晶圧接法と称す)。以下、Al-Cu パイプ接合法、Al-Al 接合への応用および実用化状況などについて紹介する。

生ずる。第 2 段階で、このような接触点から相互拡散が進行し、最初の共晶反応が起こる。いったん共晶融液が形成されると母材表面の酸化皮膜が融液中に巻き込まれて、次々と下地金属がむき出しになり、さらに共晶反応が進行する。この結果、急速に接合面全体で反応が進むようになり、母材表面の溶け出しが生ずる。第 3 段階では、加熱を停止し冷却して新しい共晶融液が生ずるのを防ぐと共に、より大きな加圧力(2 次加圧)によって接合部の共晶融液を外部に排出する。これにより清浄な Al と Cu 面は比較的小さい圧力で容易に圧接される。冷却に際しては相互拡散による金属間化合物の生成、成長を防止するため高温域を急冷する必要がある。

3. 装置の開発

上記の圧接プロセスを工業化する際のポイントは試料の温度管理であった。予備検討の結果、共晶反応が始まるとパイプ母材の溶け出し速度は非常に速く、50°C/s で加熱した場合で 3 mm/s に達することが分かり、試料毎に反応開始時点を正確に把握しなければ接合部の形がくずれ、安定した品質を有する継手が得難いことが分かった。

* 株式会社日立製作所

1) 日立研究所主任研究員 2) 日立研究所主管研究員 3) 栃木工場主管技師長

Development of High Speed Pressure Joining Method for Aluminium; K.Miyazaki, T.Tamamura, I.Ochiai (Hitachi Ltd.)

1985 年 1 月 31 日受理

このため、急速加熱過程における共晶反応の開始を母材の溶け出しによる変位で把握することを考え、加熱停止と2次加圧の作動タイミングを決めた。図2に接合変位と温度、圧力の関係を示す。接合面を初期圧 P_1 で接触させ加熱すると、まず試料の熱膨張による伸びの変位 δ が生ずる。共晶温度に達すると母材が溶け出すことにより逆方向の変位が生ずる。

この変位を高精度の変位計で検出し、酸化皮膜の除去に必要な最小限の溶け出しが得られた時点(変位量 ΔL_1)で加熱を停止し、Arガスを吹き付けて試料の冷却を行うと共に、2次加圧を行う。これにより、サーモカップルで試料毎の温度を直接測定することなくプロセスを自動的に行うことができ、量産化が可能となった。

図2 接合プロセス中の温度、変位、および圧力の関係。

図3 実験用接合装置。

図3は実験用の接合装置で、試料の着脱は手動で行い、加圧および加熱停止タイミングはマイクロコンピュータにより伸びから収縮への変位の極値判定によって自動的に行うことができる。また、加熱手段には高周波誘導を用いた。図2における各プロセスの所要時間は第1段階が約8秒、第2段階が約0.5秒である。

4. Al-Cu パイプの接合

(1) 試料および形状

接合試料には外径8mm、内径5.5mm、長さ85mm

のAlパイプ(A-1100材)と同一外径および長さで内径6mmのCuパイプ(OF-Cu材)を用いた。

(2) 継手の強靱性

継手の強さおよび伸延性に大きな影響を及ぼす因子は共晶生成量と残留共晶層の厚さである。図4は共晶生成量(パイプ溶け出し長さ)と引張り強さの関係を示す。トータルパイプ長さとして400 μ m(Al:約350 μ m, Cu:約50 μ m)以上共晶熔融することにより、酸化皮膜が除去され、母材と同等の引張り強さが得られる。しかし、2次加圧を行っていないこの状態では界面に厚い共晶層がみられ、継手は伸延性に乏しいことが分かった。

図5は2次加圧による継手の伸延性を繰返し曲げ破断試験によって評価した結果を示す。残留共晶層の厚さが0.1~0.2 μ m以下になると共晶層からの脆性的な破断面はみられなくなり、すべて延性的な破断面(Cu側)に

図4 共晶生成量と引張り強さの関係。

図5 残留共晶層の厚さと繰返し曲げ破断による延性。

Al が付着) となる。残留共晶層の厚さを $0.1\mu\text{m}$ 程度に薄くするには 3kgf/mm^2 の 2 次加圧が必要である。図 6 はこの条件で接合した継手概観とマイクロオージェ電子分光装置による Al-Cu 界面の分析結果を示す。

図 6 Al-Cu パイプ継手と接合面の観察。

(3) 気密試験

Al-Cu 継手の耐漏れ性を調べるため、2 次圧力 3kgf/mm^2 で接合した 1000 本の継手を用い He の漏れ試験を行った。この試験では予め継手に冷熱サイクル ($-30^\circ\text{C} \leftrightarrow 70^\circ\text{C}$, 1000 回)、繰返し曲げ変形 (± 0.75 度, 10 回) および加熱処理 (250°C , 240 h) などの過酷な処理を行った。その結果、いずれの処理の場合でも He の漏れ速度は $1 \times 10^{-8} \text{atm} \cdot \text{cc/s}$ 以下であることが分かり、本方法による継手は高い気密性を有することが確認された。

5. Al-Al 接合への応用

Al-Cu パイプ接合で示したプロセスは Al の同種材接合に対しても応用できる。この場合、Al と共晶反応を起こすためのインサート材が必要である。Ag, Cu, Si などを使用し得るが、コストや耐食性の点から Si を用いた。この場合、Al-Si の過共晶合金を溶湯急冷法により作製したリボンを用いた場合、最も良好な接合結果が得られた。図 7 は溶湯急冷法による Al-20 wt% Si 合金リボンを用いた時のプロセス中の接合面の状態

を示したものである。予め Al 表面に埋め込んでおいた W ワイヤ (直径 $50\mu\text{m}$) の位置によって、共晶反応による Al 表面の溶け出し状態が分かる。インサート材中の Si 量が共晶組成 ($11.7\text{wt}\%$) 以下である場合には、このような Al 母材表面の溶け出しは見られず、過共晶組成 (望ましくは $20\text{wt}\%$ 以上) で酸化皮膜が除去され良好な接合が達成される。また、この方法による特長は Ar や N_2 雰囲気中より大気中や酸素富化雰囲気中で良好な接合が得られることである。

図 7 プロセス中の接合界面の状態変化 (Al-Al)。

6. 実績と発展性

本接合方法は現在冷蔵庫の Al 製エバポレータとコンプレッサを接続する Al-Cu 配管継手として量産、実用化されている。量産設備としては高周波加熱による接合機のほか、パイプの供給、後加工が一貫して行える自動化ラインを作製し、現在順調に稼動している。これまでの実績から、不良率が非常に低く品質の安定した継手が製造されており、冷蔵庫のコスト低減と信頼性向上に大きく貢献している。

そのほか、電気機器のコイルなどに使用される Cu 導体の一部を Al で代替して軽量化する要求が強く、接続部に本技術の適用を検討中である。さらに、Al-Al がフラックスレスで大気中接合できることから、配管接続などへの応用発展が期待できる。

7. 特 許

特公昭 59-48714, 特開昭 54-133450, 米国特許第 1331286, 西独特許第 2914314, その他 10 件出願中

文 献

- (1) 渡辺 潔, 針木宗伸: 溶接技術, **22**(1973), 77.
- (2) 齊藤哲夫, 山路賢吉: 溶接学会誌, **30**(1961), 2.
- (3) *Metals Handbook*, 8th Edition, Vol.6, ASM, (1971), 495.
- (4) D.Oelschlägel, H.Abe and Y.Yonezawa: Weld. J., **56**(1977), 21.
- (5) 馬場, 石谷, 山浦: メタルと火薬, **13**(1972), 18.