

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	同種・異種金属電磁圧接材の波状界面形態を支配する諸因子の探索
Title(English)	
著者(和文)	木村慎吾
Author(English)	Shingo Kimura
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11771号, 授与年月日:2022年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:熊井 真次,村石 信二,中村 吉男,史 蹟,小林 郁夫,多田 英司
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11771号, Conferred date:2022/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

博士論文要約

論文題目 「同種・異種金属電磁圧接材の波状界面形態を支配する諸因子の探索」

論文要約

異種金属衝撃圧接材の接合界面形態は、 V_i や β に代表される接合条件に加え、接合する両金属の密度差や状態図的特徴のような材料（物質）学的条件によっても変化する。電磁圧接では放電大電流によって生じる電磁力を駆動力とするため、電流変動に伴い接合時の V_i や β が時々刻々と変化し、 V_c も変化する。よって、波状界面の形成の有無や波状界面の形態や大きさと衝突速度や衝突角度との関係について検討を行う場合には、この点について十分注意する必要がある。また、実際に電磁圧接を行うと、通常波状界面が形成するはずの衝突速度、衝突角度で接合しても、接合界面に波状模様が観察されなかったり、あるいは非常に大きな波が形成されたり、また、予め金属板表面をグラインダーで研磨して荒らしておく安定した波状接合界面が形成されて接合強度が増加する等、従来の波状界面形成機構だけでは説明できない現象を経験する。よって、衝突速度や衝突角度以外の因子、例えば Flyer plate や Parent plate の大きさ(厚さ)、表面状態等が波状界面の形成条件や形態、大きさにどのような影響を及ぼすかについて調査することは重要であり、そのためにはまず所定の同種・異種金属の組合せにおいて、所定の衝突速度や衝突角度の下で電磁圧接材を作製し、その接合界面を比較検討できるようにする必要がある。

そこで本研究では、極短時間に起こる波の形成や急激な温度上昇および冷却現象について、実験と数値解析を組み合わせる様々な条件下で調査し、電磁圧接界面形態に及ぼす諸因子の影響を明らかにしている。

本論文は6章で構成され、各章において得られた成果をまとめると以下のようなになる。

第1章「緒論」では異種金属接合の重要性および衝撃圧接の異種金属接合に対する有効性について述べた。また、爆発圧接と電磁圧接の2種類の衝撃圧接について原理および研究に関する現状を述べた。最後に本研究の目的と独創性について述べた。

第2章「電磁圧接界面形成機構を調査するための電磁圧接手法と数値解析手法」では本研究において用いた電磁パルスによって同種・異種金属板を接合する実験手法、およびその過程を再現するための数値解析手法について述べた。数値解析において使用した(I)電磁力を受けて Flyer plate が Parent plate に高速で傾斜衝突する過程を再現する ANSYS Emag-mechanical による有限要素法解析、(II)衝突点からのメタルジェット放出挙動および波状界面の形成過程と(III)衝突面での温度上昇の過程を ANSYS Autodyn による SPH 法を用いた解析、(IV)接合界面の冷却過程を再現する OpenFOAM を用いた有限体積法による解析の3つの解析モデルについて解説した。

具体的には、まず、(I)電磁力を受けて変形する Flyer plate の飛翔挙動を ANSYS Emag-mechanical を用いた有限要素法解析 (Model 1) で再現した。回路解析、電磁場解析、構造解析を連成させ、電磁力による金属板の変形挙動を再現し、2枚の金属板が衝突する際の衝突速度 V_i および衝突角度 β を求めた。

Model 1 で得られた衝突条件(V と β)をもとに、(II)および(III)を、ANSYS Autodyn を用いた SPH model(Model 2)を用いて再現した。ソルバーには、大変形の解析に適した SPH 法を用い、波状界面の形

成過程とそれに伴う温度上昇過程を明らかにした。さらに、得られた波状界面の物質分布と温度分布から、接合界面に生じる局所融解領域の位置、形状ならびにその化学組成を推定することができることを示した。

Model 2 で得られた物質分布、温度分布に関する知見をもとに、(IV)および(V)を、OpenFOAM を用いた有限体積法解析モデル(Model 3)によって再現した。ここでは、熱伝導方程式を、OpenFOAM の laplacianFoam により解くことで接合界面の温度低下(冷却過程)を再現した。さらに、凝固温度を設定することで、接合界面に生じた局所融解領域の凝固過程を再現することができた。

以上によって再現された電磁圧接界面形態は実験によって得られた接合界面組織とよく一致し、電磁圧接界面形成過程を明らかにするために有効な手法であることが明らかになった。そこで次章以降では、本実験手法および解析手法を用いて電磁圧接挙動を再現し、電磁圧接界面形態に影響を及ぼす諸因子を探索した。

第3章「同種・異種金属電磁圧接界面の波状界面形態」では第2章で述べた手法を用いて実際に Cu/Ni および Al/Cu 電磁圧接材を対象として衝突速度 V_i および衝突角度 β を変化させて電磁圧接を行い、併せて数値解析によってこれら電磁圧接材の波状界面形成過程を再現し、両金属の密度差、 V_i 、 β が波状界面形態に及ぼす影響について明らかにした。その結果、以下のような知見を得た。

1.衝突角度が接合界面形態に及ぼす影響

衝突角度が増加すると Cu/Ni、Al/Cu のいずれにおいてもメタルジェットの放出量が増加し、波状界面の波長および波高が増加した。Cu/Ni においては衝突角度が高角度になると波状界面を形成せず、直線状の接合界面となった。Cu/Ni、Al/Cu とともに、衝突角度が増加することにより、接合界面の温度が低下し、結果として接合界面に生成する合金化領域や中間層の量が減少した。これらの結果は衝突角度を大きくすれば接合界面での過度な温度上昇を回避し、合金化領域や中間層の生成量を抑制することができることを示唆している。

2.衝突速度が接合界面形態に及ぼす影響

Cu/Ni では衝突速度が速くなると接合界面形態が直線状から波状へと変化した。Al/Cu ではトリガー状の波の波長と波高が増加した。いずれにおいても衝突時に放出されるメタルジェットの量は衝突速度が速くなると増加した。また、衝突速度が速くなると接合界面での温度上昇が増加し、局所融解領域が広がった。衝突速度を速くしすぎるとその結果、波状界面が大きくなると同時に局所融解領域も広がり、接合界面に過剰な中間層が生成するため、接合強度が低下する可能性がある。

第4章「改良 SPH モデルによる波状界面形成挙動の解明」では第2章で述べた ANSYS Autodyn を用いた SPH 法による数値解析モデルを改良し、金属板表面からの距離に従って粒子の色を系統的に変化させることによって、表面からどの程度の深さの領域からメタルジェットが放出されているのか、接合中に衝突面近傍の各金属がどこからどこへどのように動いていくのかをより明瞭に可視化できるモデルを開発した。そして Cu/Ni および Al/Cu 電磁圧接の波状界面形成過程をより詳細に再現した。その結果、以下の知見を得ることができた。

Cu/Ni 電磁圧接材においては、それぞれの金属表面から深さ $3\mu\text{m}$ 未満の領域からメタルジェットが放

出されており、1つの波につき2つある渦部はそれぞれ Cu-rich, Ni-rich な組成となることを明らかにした。

Al/Cu 電磁圧接材においては、主として Al 表面から深さ 3 μ m の領域からメタルジェットが放出されていた。1つの波につき1つ形成される渦部には Al, Cu 両金属の表面層にあった粒子が集中することを明らかにした。

渦部では被接合金属の強い混合が起こっていることがわかった。以上の数値解析結果は実際の接合界面組織ともよい一致を示していた。

第5章「波状界面形態を支配する諸因子の探索」では、両金属の密度差, V_i , β に加えて波状界面形態に影響を及ぼす諸因子について検討を行った。ここでは接合する金属の板厚や組合せ, 表面状態を変化させることで (i)Flyer plate の運動エネルギー変化が波状界面形態に及ぼす影響, (ii)Parent plate の板厚変化が波状界面形態に及ぼす影響, (iii)Parent plate の変形抵抗が波状界面形態に及ぼす影響, (iv)Parent plate の表面粗さが波状界面形態に及ぼす影響の4つの因子についてそれらが波状界面形態に及ぼす影響を明らかにした。その結果, 以下の知見が得られた。

1. Flyer plate の厚さが波状界面形態に及ぼす影響について

厚さ 1mm の C1020 銅の Parent plate に 0.4mm~1.0mm の異なった板厚の A1050 アルミニウムの Flyer plate を同じ衝突速度および衝突角度で衝突させて電磁圧接することにより, 波状界面形態に及ぼす Flyer plate の厚さの影響について実験と数値解析の両面から調査し, 衝突エネルギーの観点から検討を行った。

電磁圧接界面には, すべての条件においてトリガー状の波状界面が形成し, 波の波長と波高は Flyer plate が厚いほど増加した。

SPH 法を用いた数値解析によって再現した波状界面においても同様にトリガー状の波状界面が形成された。波の波長と波高は Flyer plate が厚いほど増加し, 実験結果と良い一致を示した。

SPH 法を用いた数値解析によって Flyer plate が厚い条件と薄い条件それぞれにおける波状界面の形成過程を再現した。いずれの場合も衝突点から主として Al の粒子がメタルジェットとして放出され, 放出されたメタルジェットの一部が Cu 表面へ入り込み, 衝突点後方へ巻き込まれることによって波状界面が形成されていた。このとき, 衝突点後方へのメタルジェットの入り込みは Flyer plate が厚い場合の方が大きく, その結果, より大きな波が形成した。衝突中の圧力分布の変化を比較したところ, どちらも衝突点近傍は数 GPa 程度の高圧力に達していたが, 圧力上昇領域の大きさは Flyer plate が厚い場合の方が広く, より大きな力が衝突点近傍に加わっていた。これらは板厚の増加による衝突エネルギーの増加に起因すると考えられる。

2. Parent plate の板厚が波状界面形態に及ぼす影響について

Parent plate の変形が電磁圧接の波状界面形態に及ぼす影響を明らかにするため, 厚さの異なる parent plate を用いて正弦波状の波状界面が形成される A1050 同種同士の組合せで電磁圧接材を作製し, 併せて ANSYS Autodyn を用いた SPH 法による数値解析(Model 2)による接合界面形成過程のシミュレーションを行った。

その結果, Parent plate の板厚が薄いほど Parent plate の変形が大きく, 接合界面に形成される波が小

さくることが明らかになった。Model 2 を用いた数値解析を行った結果、SPH 法で再現した波状界面も Parent plate の板厚が薄いほど波が小さくなっており、圧力分布を調査したところ Parent plate の変形が大きい条件では Parent plate と Anvil の間で大きな圧力上昇が起きていることや Flyer plate と Parent plate との衝突点近傍の圧力が低下していることが明らかになった。すべての条件で入力エネルギーがほぼ同じであることを考慮すると Parent plate の変形によって衝突エネルギーのロスが起これ、そのために波状界面形成に使われるエネルギーが減少したため、形成される波が小さくなると考えられる。

3. Parent plate の変形抵抗が波状界面形態に及ぼす影響について

Flyer plate との密度差はほぼ同じだが、異なった変形抵抗を持つ 2 種類の Parent plate を用いて Al/Cu と Al/Ni の電磁圧接を行った。どちらの接合界面も中間層を含むトリガー状の波を呈していたが、波のサイズは Al/Ni の方が小さかった。また、Al/Ni において中間層は波間で連結して層状を呈していた。波状界面の形成過程を調査するため SPH 法を用いた数値解析を行った。どちらの組合せにおいてもメタルジェットは主として Al 表層から放出されていた。波状界面はメタルジェットの一部が Parent plate に衝突し、衝突点後方へ入り込むことによって形成されていた。Al/Cu に比較してメタルジェットの衝突点後方への入り込みは Al/Ni の方が小さく、その結果小さい波が形成されていた。また、局所融解する可能性のある領域が波と波の間で層状につながっていた。Parent plate の変形抵抗が大きいと、波状界面形成時の衝突点後方へのメタルジェットの入り込みが小さくなり、その結果、形成される波が小さくなる。すると、波状界面において生成する中間層が層状に繋がることわかった。

4. Parent plate の表面粗さが波状界面形態に及ぼす影響について

Parent plate の表面粗さが波状界面形態に及ぼす影響について明らかにするため、Al/Cu 電磁圧接材の Parent plate である Cu の表面を数種類のエメリー紙を用いて接合方向に対して垂直に研磨した。これにより異なる表面粗さの Cu の Parent plate に対して Al の Flyer plate を電磁圧接した。

その結果、Parent plate の表面粗さが大きいほど、接合範囲が広くなり、かつそこには大きな波状界面が形成することが明らかになった。Model 2 を改良した表面の粗さを模擬した解析モデルを構築し、数値解析を行った結果、Parent plate 表面のこぶ(障害物)によってメタルジェットの放出方向が変化すること、また、障害物がメタルジェットの一部となり Parent plate 表面に入り込むことで大きな波が形成することが明らかになった。これは、電磁圧接においては、適度に表面を粗くすることで大きな波が形成し、より強固な接合が得られる場合があることとよく対応している。

以上より、実験と数値解析を組み合わせることで従来提唱されていた金属の密度差や衝突速度および衝突角度以外に電磁圧接の接合界面形態に影響を及ぼす因子について明らかにすることができた。

第 6 章「結論」では、以上のように本研究で得られた成果を総括し、結論とした。

本研究では、極短時間に起こる波の形成や急激な温度上昇および冷却現象について、実験と数値解析

を組み合わせて様々な条件下で調査し、電磁圧接界面形態に及ぼす諸因子の影響を明らかにした。その結果、爆発圧接とは異なり、衝突中に V_i と β が連続的に変化し、被接合材の変形などの影響を受けやすい電磁圧接においても接合する金属の密度差が小さい場合には正弦波状、大きい場合にはトリガー状の波状界面が形成すること、一定の V_i の下では、 β の上昇とともに波のサイズが大きくなり、接合界面における局所融解領域が減少すること、一定の β の下では、 V_i の上昇とともに波のサイズが大きくなり、接合界面における局所融解領域も増加することがわかった。Flyer plate の板厚を変え、Flyer plate の運動エネルギーを増加させると形成する波が大きくなること、Parent plate の厚さが薄い場合には、衝突時に大きく変形し、それにより衝突エネルギーが費やされ、波が小さくなること、Parent plate の変形抵抗が大きいと衝突点後方へのメタルジェットの入り込みが小さくなるために形成される波が小さくなること、表面粗さを変化させた Parent plate に対し電磁圧接を行うと板表面の荒れ、すなわち突起によってメタルジェットの放出方向が変化することによって大きな波が形成することがわかった。このように本研究によって、電磁圧接材の波状接合界面形態はメタルジェットの放出挙動を変化させる諸因子と密接に関係していることが明らかとなった。