

研 究 主 論 文 抄 録

論文題目

ゼラチン媒体を使用した金属薄板の爆発圧接法に関する研究

熊本大学大学院自然科学研究科 産業創造工学専攻 先端機械システム講座

( 主任指導 外本 和幸 教授 )

論文提出者 稲尾 大介

主論文要旨

爆発圧接は二つ以上の同種又は異種金属間の金属結合を得るために使用する接合法の一つである。現在でも、爆発圧接の数多くの側面について、調査及び開発がなされており、化学製造、石油生産と精製、発電、造船、及び低温ガス生産産業では主要な技術として使用されている。爆発圧接法の重要な特徴は、溶融溶接、熱間圧接や冷間圧接等と比べ、接合強度が大きいことに加え、数m程度の大きな接合材を製造できることである。

これまでに開発されてきた爆発圧接技術を分類すると、大気中で行われる従来の爆発圧接法と水中で行われる水中衝撃波を利用した技術とに大きく分類することができる。従来法は爆薬をフライヤープレートの上に直接に近い形で置くため、爆発のエネルギーが直接フライヤープレートに伝わる。そのため、使用できる合わせ材は延性に富み、ある程度の厚さが必要であり、衝突特性も良好な材料であるものが好ましい。よって、プレート厚さが数十  $\mu\text{m}$  の薄板や脆性材料の接合は困難になる。このような問題を解決する手段として、高性能爆薬を用いて強い水中衝撃波を発生させて爆発圧接を達成させる手法が開発された。この方法は、PMMA製のプレートに貼り付けた高性能爆薬を、合わせ材に対して適当な角度と距離を与えた状態で水中に配置し、爆発によって生じる水中衝撃波を合わせ材に作用させることで、良好な複合板を得る方法である。しかしながら、1組の合わせ材に対して数多くのセットアップ条件が求められるためアセンブリが複雑になる。また、使用可能な爆薬は耐水性の高性能爆薬であり、コスト的な問題もある。そのため、水中法の特性も兼ね備えた新たな爆発圧接技術を提案する必要がある。

本研究では、このような問題を改善することを目的に、ゼラチンを圧力伝達媒体として使用した金属薄板の爆発圧接に関する研究を行った。この研究のゼラチン媒体を介する爆発圧接法は、大気中で行われる従来法とも水中衝撃波を利用する方法とも異なる溶接特性を示し、言うなれば両者の溶接特性を併せ持つ接合法である。ゼラチンを圧力伝達媒体として使用するにあたり、ゼラチン中を伝播する衝撃波特性の調査と、ゼラチン媒体を使用して Mg 合金への爆発圧接に関する実験的手法及び数値解析手法から調査並びに考察を行

った。この新たな爆発圧接法を確立することで、材料への強固なコーティング技術として実用化できると期待できる。

本論文の概要は以下のとおりである。

第 1 章では、接合原理、異種材料接合の意義と背景、現在主に使用されている爆発圧接法のいくつかの問題点を指摘し、本研究のゼラチン媒体を介する爆発圧接法を適用した製造アプローチの意義と目的について述べた。

第 2 章では、はじめに従来法の爆発圧接プロセスに関係するメカニズムの解説、及び接合パラメーターの簡単な説明と、その用途について述べた。次に、本研究を行う上で必要となる衝撃波に関する理論、爆薬の爆轟に関する理論について述べた。最後に、媒体中の衝撃波の伝播挙動を観測するための方法として、本研究で採用された光学観測実験の撮影方法について簡単に説明した。

第 3 章では、各媒体（水、ゼラチン）を介して製造されたグラッド材を比較して、ゼラチン媒体を介する新たな手法の妥当性を提示しつつ、過去に報告された 20 wt.% ゼラチンの衝撃波特性に関する 2 つのデータと、本研究の光学観察実験によって得られたデータと比較した結果を述べた。結果として、使用した爆薬の違いによって、爆薬との垂直距離  $y = 0$  地点での圧力値に対応するデータは異なった。しかし、異なる爆発速度の爆発物を使用しても、各媒体間の衝撃波伝播挙動に有意な差はなく、水中法で過去に適用されたデータは、ゼラチンを介する手法に適用可能であることを示した。さらに、ANFO-A 爆薬の、水平方向への衝撃波速度の変動を観察し、爆発速度が爆轟地点から 80mm 以上で安定することを光学観察実験とグラッド材の界面形態の観察結果から示した。これらの結果から、ゼラチン媒体は爆発圧接の圧力伝達媒体として使用できることを示した。

第 4 章では、Mg 合金への異種材料の接合困難性並びに、Mg 合金に接合可能な材料の組合せの説明と、それに伴う問題について述べた。また、ゼラチン媒体を介する爆発圧接法を使用した金属薄板と Mg 合金の接合実験で使用された合わせ材の材料特性、爆発圧接アセンブリの詳細、セットアップ条件、及び接合パラメーターについての詳細を述べた。さらに、回収した複合材の特性評価に用いられた光学顕微鏡 (OM)、走査型電子顕微鏡 (SEM)、元素分析 (XRD)、元素マッピング (EPMA)、硬さ試験及び 3 点曲げ試験方法について説明した。

第 5 章のはじめのセクションでは、Al/Mg 合金の組合せに対するゼラチン媒体を介した爆発圧接法適用に関する実験結果について述べた。Al/Mg 合金の組合せは、ゼラチン媒体を使用した爆発圧接法を使用して正常に接合された。また、接合に成功したすべての試験片で、接合部の界面には周期的な波が現れた。得られた微細構造を OM、SEM、XRD、及び EPMA 分析で特性評価し、界面で顕著な反応（中間層の形成）がないことを確認した。界面での結

合強度も、3点曲げ試験の結果により満足できることがわかった。次に、数値シミュレーションから得られた接合可否領域(Weldability window)に基づいて実験結果を調べ、実験に対応する条件が接合の下限に近いことがわかった。さらに、接合条件は実験結果と適切に一致し、この下限に近い爆発圧接条件を選択することにより、高品質の接合を実現できることを示した。

2番目のセクションでは、ゼラチン媒体を使用した爆発圧接技術に用いられる重要な接合パラメーターであるゼラチン層の厚みが接合界面に及ぼす影響を調査するため、厚みを2mmから10mmまで変化させて、薄いAlプレートと $Mg_{96}Zn_2Y_2$ の一連の爆発圧接実験を試みた。結果として、ゼラチン層の厚みの違いによって、界面で形成される波のサイズが接合方向に沿って違いがあることがわかった。ゼラチン層の厚みが5mm以下の場合、界面の波高さと振幅はほとんど変動しないのに対して、8mm以上のゼラチン層を使用した場合、界面で形成される波は徐々に増加した。この原因として、衝撃波が大気中から媒体中に伝播する際の反射による影響と、爆薬からフライヤープレートまでの距離の違いによって、衝突点移動速度が異なることを指摘し、原因を推定した。また、10mm未満のゼラチン層を使用した場合、接合方向に沿った接合界面ではクラックは確認されなかったが、複合板端部ではクラックが確認された。また、媒体の厚みの変動によって波サイズは変化し、媒体の厚みが薄くなると、接合界面に加わる運動エネルギーの上昇によって界面の波頭部分には渦領域が観察され、その領域では金属間化合物が形成されていることが観察された。

最後のセクションでは、ゼラチン媒体を使用したTi/Mg alloyの接合についての調査が行われた。作製された試験片の界面は、わずかに変動しながらほぼ直線であった。接合部のOM及びSEM観察により、Ti/AZ31の接合界面では結晶粒の再結晶化と断熱せん断帯(ASB)が観察された。EPMAを使用したマッピング分析により、この組合せのILの形成は非常に限られた範囲であることがわかった。また、この接合領域では、Al相が形成されていないことがわかった。さらに、界面の塑性変形領域の硬度は最大で最大216HVであり、Al/Tiの組合せで析出が予想される金属間化合物の硬度値とは大きく違うため、金属間化合物層が形成していないと結論づけた。

第6章は、各章で得られた結果をまとめ、本論文の総括とした。