

学 位 論 文 題 名

高エネルギー密度ビームによる溶接特性に関する研究

学位論文内容の要旨

最近の産業を取り巻く環境が大きく変化する中で、わが国の工業製品が国際競争力を維持するためには、加工技術のレベルアップが不可欠になっている。本研究の対象とする「金属材料の熱を利用した溶融接合技術の性能向上」は製造のコストダウンと能率向上を図る上で重要な課題の一つである。従来から種々の溶融接合方法が製造プロセスに採用されているが、その性能には限界があり、昨今の製造業からの能率、精度、品質などに対する高いレベルの要求を十分満足できない。その根本的理由は従来法で使用される熱源のパワー密度が低いことにある。そのため、継手部を接合に必要な温度まで加熱するのに時間がかかる上に、材料へのトータルの入熱が大きくなる結果、溶接の能率が低く、材料の熱ひずみや熱影響などが増加する。

そこで、パワー密度の高い熱源として高エネルギービームを利用したキーホール溶接法への期待が高まってきた。数MW/cm²以上の高いパワー密度のビームを照射することにより金属材料を瞬時に溶融、蒸発させてキーホールを形成し、材料内部までビームで直接加熱、溶融することにより低入熱で高能率の接合を得るという新しい概念の溶接方法である。現在実用されている高エネルギービーム溶接法は電子ビーム溶接とレーザビーム溶接である。前者は各種金属材料に対するビームの吸収率が高く適合性が広いが、實際上真空中での利用に限定される。また後者は大気中で利用できるが、金属に対するビームの吸収率が低く溶接可能な材料に制限がある。このように現状の高エネルギービーム溶接技術の性能は、製造業の要求を満足するレベルにはまだ到達していない。

本研究では、高エネルギービーム溶接に対する製造業からの要求を、「鉄鋼、アルミニウムなど広範囲の金属材料に対して、大気中にて安定した狭幅深溶込みが得られること」と捉えて、効率性と実用性の視点から、大気中にて大出力が利用できる炭酸ガスレーザビーム溶接に着目し、その性能を向上させることが有益と考えた。そのためには、高エネルギービーム溶接の基本特性を解明し、それに基づいて炭酸ガスレーザビーム溶接の基本技術を確認し、適用拡大を図る必要がある。本研究は、とくにわが国の中核産業である電気・電子、自動車、機械などの工業からの要求に対応した課題としてつぎの3項目を採り上げて実施した。

① 高エネルギービーム熱源による深溶込みの基本特性の解明

② 鉄鋼材料に対する大出力レーザービーム溶接の基本技術の確立

③ アルミニウム材料に対する高効率レーザービーム溶接法の開発

まず最初に、①の課題に対して、ビームエネルギー、材料の物性および溶接雰囲気に関する因子と溶込み結果を関係付ける溶接の基本特性を、定量的に表現することを狙いとした。そこで、制御性に優れ、各種金属にほぼ100%吸収されて現象が比較的簡明な電子ビームによる鉄鋼材料、アルミニウム、銅に対する溶接実験結果の解析から、溶接入熱条件パラメータと溶込み断面形状との関係式を、溶接プロセスのモデルを仮定して熱伝導論的に導いた。

つぎに、②の課題に対して、比較的レーザービームの吸収率が高く、溶接現象が安定な鉄鋼材料の大出力炭酸ガスレーザービーム溶接の基本特性を解明することを狙いとした。そして、レーザービーム溶接実験の結果を、電子ビーム溶接特性と比較することにより、前記関係式のレーザービーム溶接に対する実効性を検証した。

最後に、③の課題に対して、レーザービームの吸収率が低いアルミニウム材料に対する活性ガスシールドによる炭酸ガスレーザービーム溶接法の確立を狙いとした。そして、溶接実験の結果を基に、前記関係式を使用してその溶接特性を確認するとともに、溶接部の品質を評価することにより、本研究で開発した溶接方法によって実践的に深溶込みが得られることを検証した。

本研究で得られた成果をまとめると、つぎのようになる。

- (1) くさび形移動体積熱源を仮定して熱伝導計算から求めた、入熱条件（ビーム出力と溶接速度）、溶込み断面形状パラメータ（溶込み深さと平均溶融幅）および材料の熱物性値の関係式は、高エネルギービームによる溶接特性の評価指標として有効であることが分かった。
- (2) 炭酸ガスレーザービームによる鉄鋼材料の溶接特性は、ビームと溶接雰囲気との相互作用を除外すれば、上記関係式を利用することにより、熱伝導論的に電子ビームによる溶接と同じ概念で説明できることが分かった。
- (3) 炭酸ガスレーザービームの吸収率が極めて低いアルミニウム材料に対しても、活性ガスでシールドして表面での吸収効率を高めることにより、狭幅深溶込み形状が得られ、電子ビームと同等の溶融効率で溶接できることが分かった。

以上のことから、大気中雰囲気で利用できる炭酸ガスレーザービーム溶接は、電子ビーム溶接と同じく、各種金属材料に対して適合性があることが実証された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 池 田 正 幸

副 査 教 授 岡 田 亜紀良

副 査 教 授 武 笠 幸 一

副 査 教 授 福 迫 尚一郎

学 位 論 文 題 名

高エネルギー密度ビームによる溶接特性に関する研究

工業製品が国際競争力を維持するためには、加工技術の高度化による市場性、生産性の向上が不可欠である。わが国製造業の中心である加工組立型産業では、製品の品質向上、原価低減のために加工組立の中核技術として接合技術の活用が進められる中で、金属材料に対する溶融接合の高性能化が重要になっている。とくに、鉄鋼やアルミニウム合金などからなる複雑形状部品あるいは大面積部材に対し、開放された空間での高速度、低変質、低ひずみ溶接の性能を兼ね備えることが強く要求される。これに対して、従来の溶融接合の溶込み能力は限界にきているので、多くの特長をもつ電子ビームやレーザービームなど高エネルギー密度ビーム熱源による溶接の活用に期待されるが、まだ技術的、経済的に種々制約がある。

電子ビームは溶込み能力は優れているが真空雰囲気が必要とするのに対して、炭酸ガスレーザービームは大気圧雰囲気で行うことができるが、深溶込みが可能な金属の種類はまだ限定される。しかも、大気中の炭酸ガスレーザービーム溶接は現象が複雑であり、溶接因子の種類も非常に多いので、各種金属への適用に必要な、最適ビーム特性と溶接条件の抽出が困難である。鉄鋼厚板やアルミニウム合金に対する溶込み形成能力を向上するには5 kW 以上の大出力炭酸ガスレーザービームの利用が不可欠である。そこで、入熱効率の改善を効率的に進めるためにレーザービームによる溶接特性の理解が必要であるが、その基礎となる、高エネルギー密度ビームによるキーホール溶接の基本特性はまだ工学的に解明されていない。

このように、現状の高エネルギー密度ビーム溶接は工学的に理解がまだ不十分で、適用が困難な対象領域である。そこで大気中で利用できるという特長をもつ炭酸ガスレーザービーム溶接を、生産技術として完全なものにして広く普及させるために、本研究はつぎの3つの課題の解明を目的として実施した。

- ① 高エネルギー密度ビーム熱源によるキーホール溶接の基本特性の解明
- ② 大出力炭酸ガスレーザービームによる溶込み形成の基本技術の確立

③ 炭酸ガスレーザビームによるアルミニウムの溶込み形成方法の開発

まず最初に、①の課題に対しては、溶接の基本特性である、溶接の定常状態におけるビームエネルギーおよび材料の物性と溶込み結果との関係を、定量的に表現した。すなわち、出力およびパワー密度の制御性に優れ、鉄鋼材料、アルミニウム、銅などの各種金属に対する吸収率がほぼ100%の電子ビームを使用して、雰囲気との相互作用が単純な真空中で、条件を種々変化させて溶接実験を行い、結果の解析から、溶接入熱条件と溶込み断面形状との関係式を、溶接プロセスの移動熱源モデルを仮定して熱伝導論的に導いた。

つぎに、②の課題に対しては、炭酸ガスレーザビームの制御パラメータ(出力、パワー密度)と溶接速度が深溶込み形成に及ぼす影響を把握し、溶接条件を最適化した。すなわち、鉄鋼材料に対して、大出力リングモード炭酸ガスレーザビームを使用して、プラズマの発生が抑制されて溶接現象が安定になるヘリウムガスシールド下で、条件を変えて溶接実験を行い、結果を、電子ビームによる溶接結果と比較するとともに、前記関係式を用いて評価した。

最後に、③の課題に対しては、炭酸ガスレーザビームの高反射材料である純アルミニウム材料に対し、シールドガスの適正化により溶込み形成の効率を向上させるとともに、溶接部の品質を確認した。すなわち、アルミニウム表面との化学反応物の生成によりビームの吸収効率の向上が期待できる活性ガス(酸素、窒素)シールド下で、条件を変えて溶接実験を行い、結果を、前記関係式を使用して、電子ビームによるアルミニウムの溶接結果ならびに炭酸ガスレーザビームによる鉄鋼材料の溶接結果と比較しながら評価するとともに、溶接部の機械的、冶金的品质を評価した。

本研究で得られた知見をまとめると、つぎのようになる。

くさび形の体積熱源が、熔融温度を維持したままで金属材料中を熱を伝導しながら一定速度で移動するという溶接プロセスモデルを仮定して、熱伝導計算から求めた、入熱条件(ビーム出力と溶接速度)、溶込み断面形状パラメータ(溶込み深さと平均溶融幅)および材料の熱物性値で表現される溶融効率式は、高エネルギー密度ビームによる溶接特性の評価指標として有効である。

大出力炭酸ガスレーザビームによる鉄鋼材料の溶接特性は、ビームと溶接雰囲気との相互作用を除外すれば、上記溶融効率式を利用することにより、熱伝導論的に電子ビームによる溶接と同じ概念で説明できる。

炭酸ガスレーザビームの吸収率が極めて低いアルミニウム材料に対しても、活性ガスでシールドして表面での吸収効率を高めることにより、狭幅深溶込み形状が得られ、電子ビームと同等の溶融効率で溶接できる。そして、溶接部は実用上十分な品質を有する。

以上のことから、炭酸ガスレーザビーム溶接は、各種金属材料に対して電子ビーム溶接法と同等の特性が得られ、大気圧雰囲気中で利用できる点が有利になることを明らかにした。

これを要するに、著者は各種金属材料に対する高エネルギー密度ビーム溶接について溶接効率に関して実験的、理論的に新知見を得たものであり、生産工学、溶接工学および加工組み立て製造産業に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。