先進的なレーザビーム制御による異種金属溶接

マイケル・ベルント、マーカス・ダナー、アーンスト・トレファーズ

自動車やエレクトロニクス分野の製造要件に応える技術。

銅とアルミニウムや銅とステンレス鋼といった異種金属のレーザ溶接には、常に課題が伴う。しかし、特にeモビリティやエレクトロニクスの分野において、そのような溶接に対するニーズは高まっている。その典型的な例が、銅製のバスバーをステンレス鋼またはアルミニウム製のバッテリー部品にレーザ溶接する処理である。本稿では、米コヒレント社（Coherent）のSmartWeld+技術に基づく取り組みを紹介する。この技術は、自動車やエレクトロニクス製造の要件を満たす、高い品質とスループットレートで、そのようなレーザ溶接を行う能力が実証されている。

異材溶接の課題

eモビリティ分野のバスバー溶接には、複数の必須要件が存在する。まず、レーザ溶接部は、優れた導電性と熱伝導性を有する必要がある。これらの特性（特に導電性）が低いと、航続距離が短くなったり、必要な充電頻度が増えたり、所有者のランニングコストが高くなったりといった、望ましくない結果につながる。また、バスバー溶接部は高い機械的強度を備える必要がある。車載部品は継続的に振動にさらされ、時に衝撃を受ける場合もあるためである。

同一材料または類似材料をレーザ溶接する場合は、溶接シームには真の金属結合が形成される。つまり、溶融領域の組成や、理想的な場合は、機械的性質（引張強度や延性など）が基材と同一になる。異種材料によって、望ましい性質を持つ安定した合金が形成される場合もある。例えば、銅と亜鉛が結合すると黄銅が形成される。しかし、それ以外の多くの材料は、結合して金属的に安定した合金や許容できる性質を備えた合金を形成することはない。

使用する金属の間に真の金属結合が形成されない場合、1つの解決策は、機械的な「エンタングルメント」（もつれあい）を生成することである。つまり、異種合金を空間的に混合し、接合部に十分な機械的強度を持たせる形でそれらを物理的につなぎ合わせる。ねじれた「突出部」の列を材料の中に生成して、それらを互いに貫通させることによって接合部をつなぎ合わせる、と考えることができる。

このような機械的結合を実現するための1つの方法は、2つのパーツを物理的に圧着させ、一連のレーザパルスによって、局所的かつ空間的に定義された方法で溶融することである。しかし、この方法では溶融池の挙動がまったく制御されないため、満足のいく表面品質は得られない場合が多い。良好な機械的結合を得るには、このパルス照射をかなりの回数繰り返さなければならない。そのため、この処理はあまり一貫性が高いとは言えない。基本的に、レーザ溶接でなくても超音波接合によって、同じ結果を達成することができる。

従来のはんだ付けは、eモビリティ分野においては特に不都合である。はんだ接合部は融点が低く、機械的強度と安定性に欠けるためである。また、はんだには鉛が含まれている場合が多く、環境上の懸念がある。

レーザビーム制御

多くのファイバレーザ溶接は、大きめのマルチモードの集光レーザスポットで行われる。生成された溶接シームが細すぎるために、機械的強度が不十分になるといった問題が生じないようにするためだ。しかし、マルチモードのレーザスポットであっても、パーツ間の物理的なすき間（ギャップ）は比較的小さくする必要があり、そのためには、パーツのエッジ処理とフィットアップを適切に行うことが、メーカーに求められる。このような要件は、製造コストの増加につながる。

ビームウォブルは、（所望の溶接シームに沿ってビームを単に直線的に動かすのではなく）シングルモードまたはマルチモードの小さな集光レーザビームを、溶接シームに垂直に高速に走査する処理で、上述の制約を克服するための手段として既に確立されている。ビームウォブルは、ビームの有効サイズを拡大しつつ、キーホール溶接に必要なレーザ出力強度を効率的に供給する。そのため、比較的大きな隙間を埋められるだけでなく、シーム幅や浸透深さといった溶接パラメータをより確定的に制御することができる。ビーム

ウォブルをシングルモードまたはマルチモードのスポットで使用することにより、複数の用途に対して従来のマルチモードのスポット溶接よりも優れた結果が得られることが実証されている。

コヒレント社独自のビーム制御技術であるSmartWeld+は、この手法の他のバージョンよりもいくつかの点で技術的に優れている。特に優れているのは、エネルギー入力が予測可能であることだ。スポット径30μmの赤外波長（1070nm）の集光シングルモードビームに対応し、振動パターンの数と種類も拡大されていて、楕円形やらせん形、さらにはそれ以上に複雑なパターンにも対応する（**図1**）。これらのパターンは、サイズの拡大縮小が可能で、溶接パスや輪郭に沿って自動的に回転させることができる。スポットまたはシーム内のエネルギー分布は、微細パターン内の軌跡に沿った走査速度を調整し、場合によっては、レーザの出力変調と組み合わせることにより、正確に制御される。これにより、パターンまたは材料の異なる部分のエネルギー入力を個別に調整することが可能であるため、あらかじめ加熱する領域、加工する領域、冷却する領域を定義して、溶接池の挙動を正確に操作することができる。その結果として、溶接の精度と再現可能性が向上するとともに、熱影響部（Heat Affected Zone：HAZ）が最小限に抑えられ、ポロシティが低減する。以下では、この手法のメリットを具体的に示す加工例を紹介する。

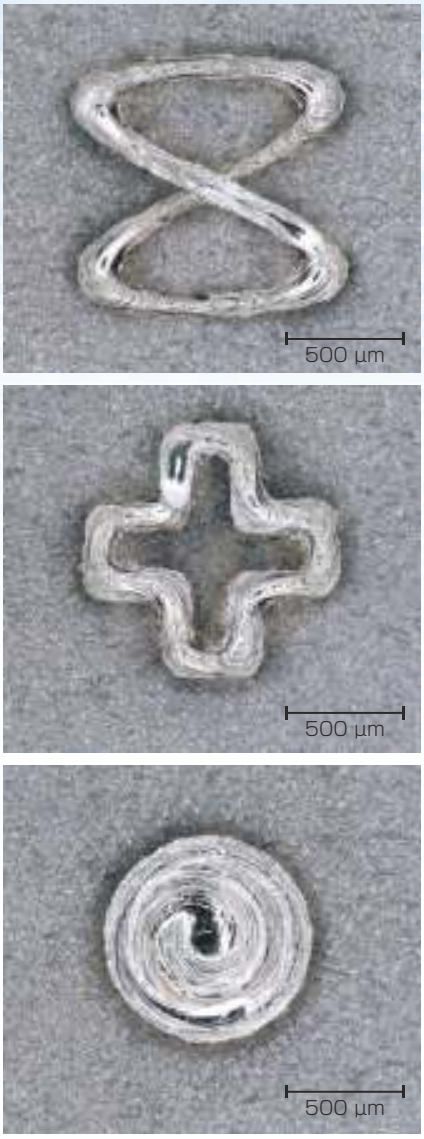

図1　SmartWeld+のパターンは、従来のビームウォブルよりはるかに洗練された動きで、楕円形やらせん形などの複雑な形状を作り出すことができる。これによって、レーザエネルギーの空間的供給を、非常にきめ細かく制御することができる。

バスバーとコネクタの溶接結果

SIGMAcladは、eモビリティなどの分野で電気的コネクタとして使用することを特に目的として開発された、複数の材料からなる積層材料である。リチウムイオンバッテリーの接続に一般的に用いられているニッケルの代替として設計された。ニッケルは、機械的、化学的、電気的性質を望ましい組み合わせで併せ持つが、電気抵抗が高いために熱を生成し、それが効率の低下につながる。SIGMAcladは、ニッケル、ステンレス鋼、銅、ステンレス鋼、ニッケルの5層構造となっている。

SmartWeld+を使用した比較試験として、SIGMAcladを対象とした2つの異なる溶接試験を最近実施した（**図2**）。最初の試験では、厚さ0.3mmのSIGMAclad製バスバーを、同じ厚さの別のSIGMAclad製ストリップに、2つめの銅層に影響を与えることなく溶接した。これは、1つのバスバーを隣接するバスバーに溶接する処理を表している。次に、同じSIGMAclad製ストリップを、厚さ1mmのニッケルめっき銅板に溶接した。こちらは、円筒形のバッテリーをバスバーに接続する処理を表している。

どちらの溶接においても、250～350Wの平均レーザ出力を使用し、らせん形の微細パターンでビームを走査した。最終的な溶接シームの直径は1mm、深さは400μmだった。直径1mmの溶接スポットを生成するための溶接サイクル時間は40msだった。

図2は、生成した2つの溶接部の断面図の写真である。どちらにおいても、溶接断面はほぼ矩形で、強力かつ均一に接合されていることがわかる。また、溶接は、適切に定義された深さ（2つのバスバーを接続する処理では、2つめの銅層）で停止している。これは、エネルギー入力が空間的にも時間的にも正確に制御されることの直接的な結果である。

2つめの試験では、厚さ0.2mmのニッケルめっき銅板3枚を、500Wの平均レーザ出力でアルミニウムに溶接した（**図3**）。ここでは、無限大（∞）または数字の「8」の形のウォブルパターンを使用した。その縦横比はフィード速度に応じて調整できる。溶接シームの長さは20mm、幅は1.4mmだった。深さ1mmのこの溶接部の生成にかかった時間は0.6秒だった。

図3は、この溶接部の上面図と断面図である。ここでも、金属的均質性が

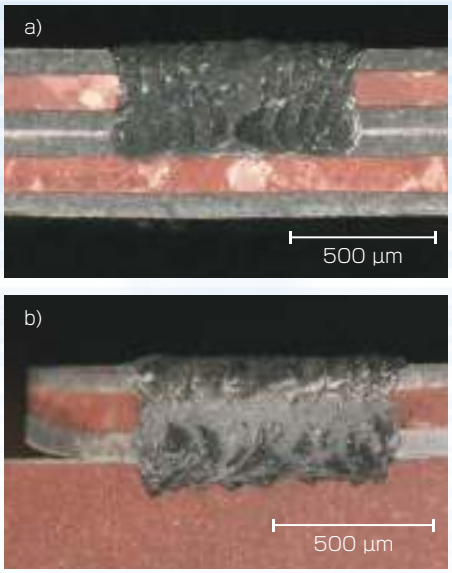

図２　(a)はSIGMA Cladを SIGMACladに溶接した様子、(b)はSIGMACladを ニッケルめっき銅に溶接した様子を示している。どちらにおいても、銅、ニッケル、ステンレス鋼の合金からなる、均質で矩形の溶接部が形成されている。

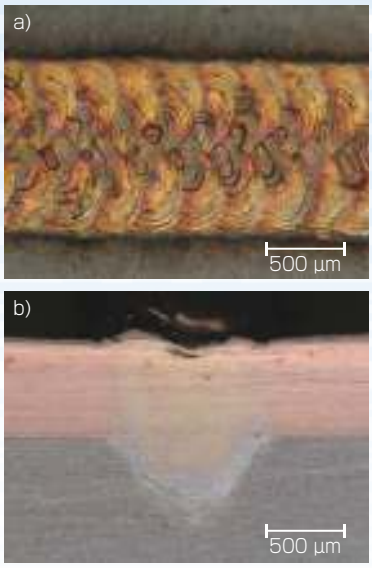

図３　厚さ0.2mmのニッケルめっき銅板３枚をアルミニウムにレーザ溶接した部分の上面図(a)と断面図(b)。

高く(ポロシティが少ない)、最上層にテーパーがほとんどないのが見てとれる。アルミニウム板の裏面に、溶接の影響は見られなかった。機械的試験により、この溶接部のせん断強度は1700N以上であることが示された。

3つめの試験(**図4**)では、セルへの電気接続を生成するためにバッテリーメーカーに必要になることが多い、スポット溶接を行った。ここでは、厚さ0.2mmの銅製ストリップを、厚さ0.3mmのステンレス鋼(円筒形バッテリーのケースに一般的に用いられる)に溶接した。平均レーザ出力は500Wとし、ビームパターンはらせん形とした。最終的なスポット溶接部の直径は1mm、深さは約300μmだった。この溶接部の生成に要した時間は26msだった。

図4の写真は、上記の溶接パラメータによって材料が適切に混合されていることを示している。溶接部は、高い導電率と、溶接スポットあたり150Nというせん断強度を示した。

また、バッテリーセルの内側に熱影響は観測されなかった。エネルギー入力が慎重に制御されているためである。バスバーはバッテリーに電解液を注入した後に接続されるため、これはバッテリーにおいては特に重要なことである。熱入力は、リチウムイオンセルにダメージを与え、爆発の危険性を生む恐れがある。

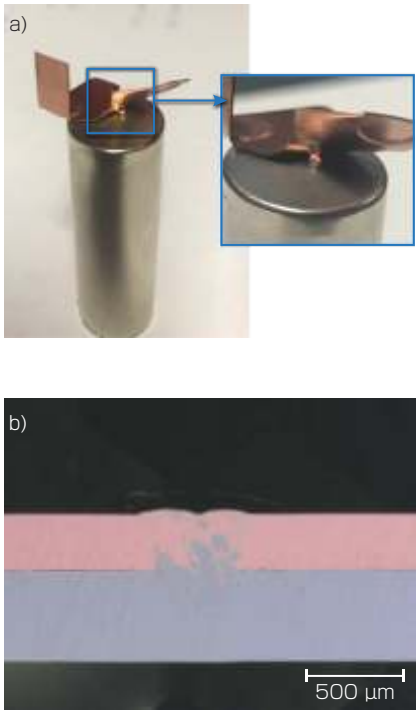

図４　この試験では、銅製コネクタをバッテリーケースにレーザスポット溶接した(a)。溶接断面図(b)は、材料が物理的に混合されている様子を示しており、生成された溶接部は適切な機械的強度を示した。

結論

SmartWeld+の正確で非常に動的なビーム制御は、ファイバレーザ溶接技術における著しい進歩であり、経済的で信頼性の高いこのレーザ源の適用範囲を、さらに広範な用途に拡大するものであることが実証されている。ビーム制御は今、これまでの単純な円形のビーム振動から、幅広い種類のパターンを網羅するとともに、さらに洗練された出力制御を行うものへと進化している。特に、革新的なアシストガス供給システムと組み合わせた場合は、溶接池の挙動のさらなる制御が可能となり、質の高い溶接をより確定的な形で生成することができる。そのすべてが、異種材料や薄板の高品質な溶接や、eモビリティやエレクトロニクス製造におけるその他の難しい溶接処理を可能にする。

著者紹介
マイケル・ベルント博士(Dr. MICHAEL BERNDT)、マーカス・ダナー(MARKUS DANNER)、アーンスト・トレファーズ(ERNST TREFFERS)は、米コヒレント社でドイツを拠点に産業用レーザとシステムを担当する製品ラインマネージャー。e-mail: michael.berndt@coherent.com　URL: www.coherent.com

ILSJ