電子ビーム加工技術

安永 政司*・村上 英信*

(受付1991年6月3日, 掲載決定1991年8月3日)

Electron Beam Processing

Seiji YASUNAGA and Hidenobu MURAKAMI

(Manufacturing Development Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation, 8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo)

(Received June 3, 1991, Accepted August 3, 1991)

1. はじめに

電子ビーム加工は、真空中で高速に加速した電子を集束して物質に衝突させ、電子の運動エネルギーを熱エネルギーや化学エネルギーに変換して物質を加工するものである。熱加工としては、物質の加熱、溶融、蒸発作用を利用した表面熱処理、溶接、溶解、穴あけ、蒸着などの分野で、また、化学加工としては、重合、分解作用を利用した露光などの分野で実用化されている。

これらの中で、特に、電子ビーム溶接は、量産性と信頼性が重視される自動車関連の産業分野に広く普及しており¹⁾、1990年末で、国内で約500台が稼働していると推定される。また、高品質と高精度が要求される原子力、航空、宇宙産業分野においても、従来より電子ビーム溶接が個別生産用として使用されて来たが、ムービングガン式装置（真空室内を自在に移動する小型電子銃を有する装置）の性能が向上するにつれて大型構造物の量産にも適用されてきている²⁾。さらに最近、エレクトロニクス技術の急速な進歩により電子ビームの制御技術が飛躍的に向上し、マイクロ加工分野への適用も増大している³⁾。

ここでは、電子ビーム溶接を中心に、電子ビームによる熱加工の原理と特徴および加工例と加工装置の最近の動向について紹介する。

2. 電子ビーム加工の一般的特徴

2.1 高パワー密度熱源

電子ビームの集束パワー密度は $10^5 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ と極めて高く、同程度の集束パワーが得られる CO_2 、YAGレーザーと比較しても次の特長を有する。

- (1) ビーム発生効率が90%以上と高いため、100 kW程度の大出力ビームも比較的容易に得られる。
- (2) 電子ビームは回折の影響をほとんど受けないため、長焦点で集束角が小さくても高パワー密度特性が得られる。その結果、集束レンズと被加工物間の距離を数百 mm と大きくでき、また、焦点深度も数 mm ～数十 mm と深くできるので、厚板の加工に対して、溶接時の溶け込み形状や穴あけ時の加工形状をビームの進行方向に対してほぼ平行にすることができ。
- (3) 電子の被加工物表面での反射が少なく、また、被加工物が表面付近で発生する蒸気の影響も比較的受けにくい。ため、電子ビームを被加工物に高パワー密度のまま直接かつ効率よく伝達できる。

電子ビーム加工の特長を最も発揮できる大出力ビームの集束特性は、陰極、グリッド電極、陽極で構成されるビーム発生部の形状でほぼ定まるため、最近、コンピュータ・シミュレーションを活用して収差の少ない最適な電極形状を決定し、集束特性の改善を図っている⁴⁾。

図1に、中出力(60 kV-6 kW)と大出力(150 kV-100

* 三菱電機株式会社生産技術研究所 (〒661兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1)

図1 電子ビームの電流密度分布と溶接ビードの横断面形状⁵⁾

kV) における集束点のビーム電流密度分布と溶接ビードの横断面形状を示す⁵⁾。

2.2 真空中の加工

電子ビーム加工では、気体分子によるビームの散乱を防止するためビーム通路を真空雰囲気に保持することが必要である。図2に、溶接ビードの横断面形状の加工室真空度依存性を示す⁶⁾。加速電圧が60 kVの場合、7 Pa以下の溶接雰囲気で溶け込み比の大きい良好な溶接ビードが得られる。

真空は極めて清浄な加工雰囲気を形成するので、冶金的には酸化や窒化の影響が少なく、加工品質が安定するという長所となる。また、 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Paまで排気すると、Nb, Al合金、Ti合金など酸化を極力避けたい活性金属の加工や金属蒸気の発生が著しい極厚肉部材の溶接も可能になるため、ムービングガン式装置の開発の進展に伴って、電子ビーム溶接の原子力、航空、宇宙産業分野への適用が活発化している。

2.3 ビーム・パラメータの電磁界制御

ビーム・パワーや照射位置などの重要な加工パラメータが電磁界で高速かつ高精度に制御できることは電子ビーム加工固有の優れた特長であり、制御技術の向上に伴って種々の加工特性の改善が可能となってきた。その例としては、

(1) ビーム・パワーをバイアス電圧で高速制御して急

図2 溶接ビードの横断面形状の加工室真空度依存性⁶⁾

峻なパルスビームを発生し、穴あけなどの蒸発、除去加工において熱影響層を小さくする、

(2) ビーム照射位置を高精度に高周波振動させ、溶接

図3 電子ビームによる溶け込み特性⁹⁾
 (a) 6 kW 量産用装置, (b) 100 kW 大出力装置

欠陥防止などを目的としたビーム・オンレーションを行ったり、局所表面熱処理などにおけるビームの照射パワー密度分布を制御する、

- (3) 多数の微小溶接や微細穴あけ箇所に対し、ビームの照射を磁界偏向で高速かつ高精度に位置決めして加工時間を短縮する、

などがある。

電子ビーム加工ではビームの照射位置制御に磁界偏向を用いており、偏向磁界を大気中に配置された偏向レンズからビーム通路である真空中に低損失で導入する必要がある。この場合、偏向器付近の真空隔壁に半導電性材料を用いることにより、隔壁中に発生する渦電流や真空側表面のチャージアップを防止して、数100 kHzの高周波の偏向を精度良く行うことが可能となってきた⁷⁾。

3. 電子ビーム溶接

3.1 電子ビーム溶接の原理

$10^5 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ の高パワー密度の電子ビームを集束して被溶接物に照射すると、熔融、沸騰、蒸発、飛散といった一連の現象が瞬時に発生し、電子ビーム軸に沿ってビームホールと呼ばれる細孔が形成される。電子ビームが細孔に侵入すると、細孔の底に衝突してさらに穿孔を進める。穿孔速度は、被溶接物の材料、電子ビームのパワー密度にもよるが、穿孔開始後数10 ms 以内では1 m/s 程度である⁹⁾。この細孔は、熔融金属の蒸気圧、表面張力、重力などとの平衡によって維持される。この状態で電子ビームと被溶接物を相対的に移動させると、細孔前方の熔融金属が細孔の側壁に沿って後方に移動し、熔融池が形成され、さらに、後方からの凝固の進行と共に溶接ビードが形成される。

3.2 電子ビーム溶接の特徴

電子ビームによる溶け込み特性はビームの集束特性に依存するため、各装置によって多少異なるが、図3に、

その一例を示す⁹⁾。溶接時の各パラメータは次のように選定される。

- (1) 溶接電力：加速電圧とビーム電流の積で与えられ、微小な溶接を対象とする場合は100 W 級、極厚肉部材を1パスで溶接する場合は100 kW 級が用いられる。加速電圧は30～180 kV の範囲であるが、出力が30 kW 以下の装置ではX線の遮蔽管理を容易にするため60～70 kV の低加速電圧タイプが、また、100 kW 級の大出力機ではビームの集束特性を維持するため100～150 kV の高加速電圧タイプが用いられている。一般に、ビームの集束特性を重視する場合は高い加速電圧が、アーキング（電子銃室内の真空放電）が発生しやすい材料の溶接を対象とする場合は低い加速電圧がそれぞれのタイプにおいて選択される傾向にある。
- (2) 集束ビーム径：通常、数百 μm 程度である。溶接欠陥を防止するため、焦点位置を被溶接物の表面から上下に多少ずらす場合もある。
- (3) 溶接速度：溶接速度が速い場合は割れ、ブローホールなどの溶接欠陥が発生し、遅い場合は溶接歪みが増大する。溶け込み深さ10 mm 以下の鉄系材料の場合は1～4 m/min の範囲が多く、板厚が増すにつれて適正速度は減少し、100 mm 程度の厚肉部材を対象とする場合は、20～40 cm/min の速度が選ばれる。

電子ビーム溶接では、溶接欠陥を防止するため、ビームオンレーションがしばしば利用される。例えば、ビード幅の制御には振動の横方向成分が、縦割れ、ブローホールの発生を防止するためには、振動の縦方向成分が主に効果を発揮する。通常、オンレーションパターンは直線、円、面、周波数は10～1000 Hz、振幅は0.1～2 mm である。図4に、ガス含有量の多いアルミダイカストのオンレーション溶接例を示す⁹⁾。溶け込みが浅い場合

ビーム電流 (溶接速度)	オシレーション条件	縦断面ビード形状
12mA (2m/min)	精円パターン $X = \pm 0.4 \text{ mm}$ $Y = \pm 0.1 \text{ mm}$ $f = 1 \text{ kHz}$	$h_p = 1.5 \text{ mm}$
40mA (2m/min)	精円パターン $X = \pm 0.4 \text{ mm}$ $Y = \pm 0.1 \text{ mm}$ $f = 1 \text{ kHz}$	$h_p = 3.6 \text{ mm}$
33mA (1.5m/min)	時分割して2本の ビームを使用	$h_p = 4.0 \text{ mm}$

図4 Alダイカストのオシレーション溶接³⁾

は、オシレーション条件を適切に設定することにより含有ガスを除去して、ブロー・ホール、ブロー・アウトの発生を防止することが可能である。溶け込みが深くなると単純なオシレーションでは十分な効果が得られないが、1本の電子ビームを時分割で2本に分割し、主ビームの後方にガス抜き用の副ビームを配置することにより、溶け込みが深い場合でもブロー・ホール、ブロー・アウトの発生を少なくすることができる。

また、電子ビーム溶接では種々の異種金属の溶接が可能である¹⁰⁾。電子ビームを適用すると、急熱・急冷加工のため、冶金的に脆い組織の析出を抑制でき、また、溶融幅が狭いため、合金層の幅も狭くできるので、健全な継手が実現できる。また、これらの溶接では、融点など異種金属間の冶金的相違を、ビーム照射位置の精密制御により補正している。適用例としては、耐熱材料であるインコネルと快削鋼、冷熱部品によく見られるSUSとCuの溶接などがあり、最近では、Niなどをインサートメタルとしてダイヤモンドカッタの溶接などにも用いられている。

3.3 電子ビーム溶接の適用

電子ビーム溶接の最大の特長は、深溶け込み特性による低入熱、低歪み溶接であり、自動車関連部品の生産において、製造工程の簡略化のため、機械加工後の組み立て溶接に広く利用されている。図5に、量産部品への適

図5 電子ビーム溶接のトランスミッションギアへの適用例¹¹⁾

用例を示す¹¹⁾。この例では、従来機械加工による削り出しを行っていたが、小形軽量化によるコストダウンを図るため、別個に歯切りした部品を圧入して低歪み溶接したものである。自動車関連部品にはレーザー溶接も適用されるようになっているが、高精度の部品に対しては今後も電子ビーム溶接が適用されると考えられる。

大型構造物に対しては、溶接品質の向上と工期短縮の両面から適用が拡大しつつある²⁾。対象としては、压力容器の厚肉一層溶接と、原子力、航空、宇宙関係で使用されるNb、Al合金、Ti合金などの活性金属の溶接がある。電子ビームは300 mm以上の一層貫通能力を有するが、溶接品質面から実用範囲は100~150 mmにとどまっている。

電子ビームを熱源として用いると、極めて低入熱の溶接が可能であり、圧力センサやベローズなど、数十~数百 μm の薄板などで構成された精密部品の最終組立溶接に適用されている。対象部品が小形化するにつれ、部品の熱容量が小さくなり、高速溶接が要求されるようになってきている。例えば、1カ所の溶接時間が0.1 s以下のものも少なくない。このような場合、ステージ移動による溶接は困難であり、高速制御性の点で有効な電子ビーム偏向によるビーム移動溶接が用いられる傾向にある。

図6に、電子ビームの偏向機能を活用したプリンタ印字ヘッドにおける多数の微小溶接例を示す³⁾。この例では、ビーム照射位置の高速制御機能を活用して、溶接施工上、次の改善を図っている。

被溶接物の外観 スポット状溶接のビード外観

図6 電子ビーム溶接のプリンタ印字ヘッドへの適用例³⁾

図7 汎用型CNC電子ビーム溶接機の構成例⁵⁾

- (1) 電子ビームの照射位置を矩形に微小距離移動させ、クレータ部における割れの発生を防止すると共に、接合面積を増大させる。
- (2) 電子ビームの照射位置の固定・移動を精密制御し、溶接時のスプラッシュの発生を防止する。

これらの制御は1カ所の溶接時間～35 ms以内に行われており、72カ所の重ね溶接の全加工時間は2.5 sである。

3.4 電子ビーム溶接装置

図7に、汎用型のCNC電子ビーム溶接機を例に、電子ビーム加工装置の基本構成を示す⁵⁾。

電子銃の陰極には安定度の高いLaB₆やWなどの熱電子放出材料が用いられているが、最近は、電子銃や高電圧電源の小形化を図るため、低温動作が可能で消費電力の小さいLaB₆陰極が使用される傾向にある。陰極は1900～2800 Kの高温状態にあるため、10⁻² Pa以下の高

真空雰囲気を形成して酸化による劣化を防いでいる。電子銃室の排気には、準備時間の短い160 l/s程度のターボ分子ポンプが使用される傾向にあり、比較的低真空の溶接室との差圧には直径数 mm のオリフィスが使用される。

高電圧電源系は、装置のコンパクト化の要請を受けて、高周波インバータ、ガス絶縁、光ファイバー制御の採用による小型・軽量化が進んでいる。また、加工中に発生するアーキングの対策として、大形の真空管を電子銃と直列接続したり、高周波インバータを高速で制御して、アーキング後のパワー回復を極めて短時間に行ってアーキングが発生しても欠陥なく溶接を継続できる電源が開発されている¹²⁾。

溶接室や真空排気系は、対象とする加工物の寸法・形状によってその方式は大きく異なる。

図8 2ステーション型電子ビーム溶接機の外観¹³⁾

図9 量産型電子ビーム溶接機の真空排気特性例¹¹⁾

- (1) 量産部品を対象とする小型の装置では、小型の加工室に、加工テーブルを備えた2または4ステーションの底蓋が昇降とインデックス機構によって順次に着脱され、排気と吸気が高速度で繰り返される。

図8に、2ステーション形電子ビーム溶接機の外観を示す¹³⁾。加工室の真空排気時間は生産タクトに関係する重要なパラメータであり、排気装置は、通常、メカニカルブースタポンプと油回転ポンプで構成される。図9に、量産型電子ビーム溶接機の真空排気特性の例を示す¹¹⁾。1500 m³/hrのメカニカルブースターポンプ、7500 l/minの油回転ポンプで40(リットル)の小型の加工室を排気した場合、真空排気時間は数秒であり、サイクルタイムは20～30 sである。また、図10に示すように、溶接物を大

図10 連続差圧排気系のブロック図¹⁴⁾

図11 ムービングガン式電子ビーム溶接機の外観¹⁵⁾

- 気中から真空加工室まで、差圧排気された8ステーションの中間室を介して間欠的に搬送する装置も開発されており¹⁴⁾、約12 sのサイクルタイムが実現できる。
- (2) 個別生産を対象とした汎用装置の場合は、加工室内を有効利用するため、加工室の外壁面にスライドシール機構を取り付けて真空を保持したまま電子銃を移動する構成が一般的である。最近は、対象とする被溶接物の大形化に伴って、例えば2.5 m^W×2.5 m^H×6.4 m^Lの大形真空加工室を有する装置も開発されている。
- (3) 多様な形状の大型部品を対象とする場合、例えば5 m^W×5 m^H×8 m^Lの大型真空加工室内に移動式の小型電子銃を配置し、溶接姿勢を自由に選択できるムービングガン式装置が用いられる傾向にあり、図11にその例を示す¹⁵⁾。電子銃の制御軸数はX, Y,

図12 セラミックの電子ビーム穴あけ加工例¹⁷⁾
 (a) Al_2O_3 : 0.635 mm^t, 100 $\mu\text{m}\phi$, 200 穴/分
 (b) Al_2O_3 : 0.1 mm^t, 30 $\mu\text{m}\phi$
 (c) Si_3N_4 : 1.0 mm^t, 100 $\mu\text{m}\phi$, 200 穴/分

Zおよび回転のU, Wの計5軸であり、テーブル駆動軸やビーム電流、レンズ電流などと共にCNC制御される。

4. その他の電子ビーム加工

4.1 微細除去加工

電子ビームのパワー密度を $10^7 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ に高め、ビームをパルス的に照射すると、照射部が瞬時に気化し、穴あけ、溝切り、切断などの除去加工が可能になる。SUS板0.2 mm^tを例にとると、 $1 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ の場合、穿孔速度は10 m/sに達する¹⁶⁾。電子ビームを連続して被加工物に照射した場合は、被加工物内部での熱の蓄積を招き、加工部周辺に加工変質層が現れる。一方、電子ビームをパルス化すると、電子ビームが被加工物を貫通した直後にビーム照射を停止して、入熱を必要最小限に止めることができる。また、パルス列で加工する場合は、ビーム照射の休止中に熱拡散による冷却が行われるので、加工変質層を極めて小さくすることができる。さらに、昇華性材料のように加工中に大量の蒸気が発生する場合は蒸気によるビームの散乱が生じるが、パルス化するとビーム照射の休止中に蒸気を消失させることができる。電子ビーム穴あけは真空中の加工であり、レーザ加工のようにアシストガスが使用できないので、大量の除去加工には適さず、用途はもっぱらビームの高速移動を利用した多数の微細穴あけに適用されている。電子ビーム穴あけが対象とする穴径は10 $\mu\text{m} \sim 1 \text{ mm}$ であり、

図13 電子ビームによる局所表面熱処理の加工例¹⁸⁾
 (a) ギヤー焼き入れ状態
 (b) 焼き入れ部拡大
 (c) 硬度分布

通常、電子ビームの集束ビーム径と同程度である。しかし、ビームの裾野部分を蒸発・除去のしきい値以下にすることにより、集束ビーム径よりも小さい穴をあけることも可能である。

電子ビーム穴あけが利用される場合として、

- (1) 材質が耐熱合金などの難削材である、
- (2) 部品の表面に曲率を持っていて、ドリル加工に適さない、
- (3) 加工穴径が小さく、しかも穴数が一部品数100～数1000個にも及ぶ、

などが挙げられる。

金属の穴あけの代表的な用途としては、航空機エンジン部品、グラスファイバ製造用スピンドルなどがある。金属に代表される溶融性材料の場合、加工中に発生する蒸発物が比較的小ないため、通常、穴あけは単一のパルスで行われる。一方、金属の穴あけ加工の場合、加工内壁に残存溶融物が再凝固して付着する場合はしばしばある。この場合、被加工物の裏面に蒸発しやすい材料を置き、被加工物を貫通したビームでその裏当て材料を蒸発させ、その圧力で穴内壁の溶融物を吹き飛ばすことにより穴品質を改善することができる。

図12に、最近の応用例として、セラミック基板などを対象とした微細穴あけ加工例を示す¹⁷⁾。セラミックは絶縁物であるが、ビーム照射時の蒸発・除去作用により大量のプラズマが発生するため、プラズマを介して電子ビーム電流が接地部に流れチャージアップが発生せず正常な加工が行われる。セラミックには、 Al_2O_3 に代表される溶融性材料と SiC などに代表される昇華性材料があるが、加工中に大量の蒸気が発生するため、通常、パ

ルス列で加工が行われる。この場合、ビーム照射の休止期間による加工時間の増大を避けるため、複数の穴あけ箇所を高速のビーム偏向により走査して、順次繰り返して加工する方法が取られる。この場合、ビーム偏向を1段で行うとビームが被加工物に対して斜め入射となり、加工の深さ方向に対する精度が悪くなるので、偏向レンズを2段重ね、2回偏向することにより被加工物に対してビームを垂直入射させる技術も開発されている。

4.2 表面熱処理

電子ビームによる表面熱処理とは、被加工物表面を加熱あるいは熔融後急冷することにより、金属組織の非晶質化、合金化、熔融硬化、変態硬化などを行うものである。電子ビーム表面熱処理の特長は、

- (1) 金属表面の光学的反射率の影響を受けず、安定した入熱が可能である、
- (2) 真空中の加工であり、表面酸化がない、
- (3) 加工距離を長くでき、奥深い箇所の熱処理が可能である、

などである。特に、最近では、ビームの制御性の向上と共に部品形状に適したパワー密度分布を容易に選択できるようになり、実用化が進んできている¹⁸⁾。代表的な加工としては局所表面焼き入れがあり、図13に、その例を示す。電子ビームによる焼き入れは、急峻な加熱後の自己冷却によるものであり、焼き入れ深さは母材の厚みの約10%程度、最大でも1.5 mm程度である。

5. おわりに

電子ビーム加工が本質的に真空雰囲気が必要とすることは、生産性の面では短所の要因となる。しかし、量産部品の溶接では、前後工程の簡略化、材料の節約などのコスト低減、さらには溶接対象品の重量軽減、信頼性向上などの付加価値の増加により、また、厚板の溶接では、無開先で片面一層または両面一層の高効率・自動溶接により、トータルの生産性を改善することが可能であり、電子ビーム加工は、今後も多くの産業分野に適用されて行くことが期待される。

電子ビーム加工のこれからの課題としては、高精度化

をより一層進めるための溶接箇所などのオンライン自動検出、省人化を進めるための真空排気系のメンテナンスフリー化などが挙げられ、今後の一層の進展が望まれる。

【文 献】

- 1) 内海, 大田, 平本, 山根, 丸山: 三菱電機技報, Vol. 61, No. 6 (1987) pp. 58~65.
- 2) Y. Arata and A. Matsunawa: The Laser vs The Electron Beam in Welding, Cutting, and Surface Treatment (State of the Art 1986), Reno, Nevada (1986).
- 3) 村上, 安永, 丸山, 山本: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-444-88, 溶接学会 (1988).
- 4) 桜井, 村上, 山根, 山本: 高エネルギービーム加工研究委員会資料, HEB-46-91, 溶接学会 (1991).
- 5) 安永, 村上: 精密工学会誌, Vol. 52, No. 6 (1986) pp. 20~24.
- 6) 村上, 佐々木: 機械設計, Vol. 28, No. 14 (1984) pp. 91~96.
- 7) S. Hoshinouchi, T. Iwami, M. Sakamoto, H. Murakami, S. Sasaki and R. Shimizu: Scanning Microscopy, Vol. 4, No. 3 (1990) pp. 555~561.
- 8) 菅田編: 電子・イオンビームハンドブック (第2版), 日刊工業新聞社 (1986) pp. 357~359.
- 9) 三菱電子ビーム加工機, 三菱電機カタログ (1990).
- 10) 寺井訳, メレカ, A. H. 著: 電子ビーム溶接—原理と実際—, 産報 (1972) pp. 152~157.
- 11) 安永, 佐々木, 大峯, 原, 大野: 三菱電機技報, Vol. 55, No. 2 (1981) pp. 26~30.
- 12) 村上, 安永, 山本, 原: 原子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-374-85, 溶接学会 (1985).
- 13) 日本電熱協会編: エレクトロヒート応用ハンドブック, オーム社 (1990) pp. 319~349.
- 14) 原, 桂田, 山本, 荒川, 村上: 三菱電機技報, Vol. 61, No. 6 (1987) pp. 52~57.
- 15) 原, 桂田, 山地, 村上: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-390-86, 溶接学会 (1986).
- 16) 桜井, 山根, 村上, 佐々木: 高エネルギービーム加工研究委員会資料, HEB-11-89, 溶接学会 (1989).
- 17) K. Sakurai, Y. Yamane, S. Sasaki, H. Murakami and S. Takeno: Proceeding of American Ceramic Society 93rd Annual Meeting (1991), (to be published).
- 18) 丸山, 大田: 溶接技術, Vol. 38, No. 8 (1990) pp. 75~81.