電子ビーム溶接の現状について

高 屋 明 弘*

(昭和51年4月1日受理)

On the Situation of Electron Beam Welding

Akihiro TAKAYA

(Nippon Electric Company, Limited, 1753, Shimonumabe, Nakahara-ku, Kanagawa, Japan)

(Received April 1, 1976)

1. はじめに

電子ビーム溶接が我が国に導入された当初は、もっぱら研究が目的であったが、ハードウェアの発展およびソフトウェアの開発が進み、現在では生産手段として重要な位置を確立するに至った。既に国内の保有台数も100台を突破したと言われ、今後も多面的な普及が見込まれている。

電子ビーム溶接を積極的に取り入れようとする現われとして、これまでの機械加工を合理化するための、或いはその工程の一部としての補完的機能という概念から一歩進んで、精密部品をプレス成形後電子ビーム溶接で完成するという大胆な試みを実行するためのキーポイント的役割を果たすところまで来ている。

また装置の面では、底辺拡大を意図した小形低価格機種種の出現、真空の壁にいとむ真空外電子ビーム溶接機の実用拡大、局部真空型電子ビーム溶接機の開発、さらに超厚板溶接への適用を目的とした大出力電子ビーム溶接機の開発などが目立つものである。

本稿では真空との関連を意識して電子ビーム溶接の現状を紹介する。

2. 電子ビーム溶接の概説

電子ビーム溶接法を簡単に説明すると、高速に加速され、且つ高パワー密度に集束、制御された電子ビームを熱源とする溶接法である。溶接熱源として用いられる電子ビームのパワー密度は通常 10^6 watt/cm² 以上であるが、一般のアーク熱源の場合には最高でも 10^4 watt/cm² 程度である。この著しいパワー密度の差が図1に示す

図1 電子ビーム溶接とアーク溶接の溶け込み形状の比較

図2 電子ビーム溶接の溶融機構

とく溶け込み形状の差となって現われる。つまり、同じ板厚を溶接するのに、電子ビーム溶接の場合にはTIG溶接に比較して1/25の入熱ですむ。これはアーク熱源が主として熱伝導を利用する表面加熱の点熱源として働くのに対し、電子ビーム溶接の場合には図2にその溶融機構を示すごとく高度に加熱された金属蒸気に満ちた細孔を形成しつつ電子ビームが侵入し、同時にエネルギーを直接周囲に与えて溶融し、電子ビームの通過直後に閉そく、凝固して溶接が進行する、すなわち瞬時に深部まで溶け込みを与える一種の線状熱源として働くためであ

* 日本電気株式会社（神奈川県川崎市中原区下沼部）

る。

このように電子ビーム溶接の溶け込み形状は、巾が狭く深いことを特徴としているが、ここから派生する大きな利点は“歪みや熱影響が極めて少ない高品質の溶接が高速に行なえる”ということである。

また、“高融点材料の溶接ができる”、“異種金属の溶接の適用範囲が広い”も特長であり、高真空中では“活性金属の溶接ができる”ということもあげられる。更に電子ビーム溶接はいわゆる非接触溶接法であり、溶接パラメータはいずれも電磁気的および機械的に制御できるため、熟練した技能者を要せずに“制御性、再現性に優れ、溶接工程の自動化、省力化に適している”ことも大きな特長である。

以上、電子ビーム溶接の主な特長を述べたが、高品質かつ高速溶接のみならず、機械加工部品の組立溶接が可能となり、材料の節約、工数節減による製品コストの低減ができ、また新製品開発の有効手段にもなり得る。こうなると電子ビーム溶接はもはや従来の溶接法の代替えではなく、溶接の概念を超えた新しい加工技術と見るべきであろう。

次に装置について簡単にふれてみよう。

電子ビーム溶接機の種類方法として、加速電圧による分類（高電圧低電流形式と低電圧高電流形式に大別）と溶接雰囲気（溶接室の真空度）による分類があるが、ここでは後者の分類で話を進める。

図3に概略構造図を示す。尚、ここで全真空型とは低真空にても使用できるが、通常は 10^{-4} Torr 程度のいわゆる高真空に使用される形式を意味する。この形式は多目的の汎用機として用いられることが多い。

また、中真空型とは 10^{-2} Torr 程度で溶接を行なうもので、低真空型もしくは部分真空型と呼ばれることもあり、生産用専用機として用いられることが多い。最近開発が進んでいる局部真空型（ローカルチャンパー方式）や既に実用化されている連続部分真空型もこの中に入る。前者は溶接物自体が溶接室の構成要素となるもので、後者は大気中でローディングされた溶接物が順次真空領域に入っていく、所定の位置で溶接が完了すると順次大気中へ取出されるものであるが、いずれの場合も真空シール技術が重要である。

さらに、真空外型または大気中型は電子ビームを大気中へ取出すという画期的なもので自動車部品のような量産物、パイプのような連続長尺物への実用が進んでいる。

以上3種に大別できるが、どの形式を適用するかは溶接対象物によって判断する必要がある。

さて、図4は高電圧型電子ビーム溶接機を用いて、高真空中でステンレス鋼にビード・オン・プレートした際の溶け込み深さ曲線の一例を示したが、低電圧型の場合には同じ溶け込み深さを得るのに2～3倍のビームパワーが必要と言われている。

図3 電子ビーム溶接機の構造概略図

図4 溶け込み深さの一例 (25 kW/6 kW)

3. 電子ビーム溶接における溶接雰囲気

電子ビームの発生源は通常、グリッド アノード、カソード（フィラメント）から構成される三極管であり、その部分の真空度は 10^{-4} Torr 以下である。加速、集束された電子ビームをエネルギーの損失なく溶接熱源とするためには溶接物も同じ真空雰囲気に置くことが望ましいが、溶接性、生産性、設備コスト等からみて、必ずしも高真空を要しない場合が出てくる。ここでは真空を主とした溶接雰囲気の影響について述べてみたい。

3.1 溶け込み深さに対する影響

図5は高真空から 10^{-1} Torr 程度の低真空までの範囲で、ステンレス鋼（25mm厚）における真空度と典型的な溶け込み形状の関係を示したものである。また、図6は真空度と各真空度における溶け込み深さと高真空における溶け込み深さの比の関係を示したものである。

これは加速電圧が150 kVの場合であるが、電圧が低いほど、また、ワークまでの距離が長いほど溶け込みが減少しはじめる雰囲気は高真空側に移る。

この関係は材質によっても多少の差はあるものの、

図5 真空度と溶け込み形状

図6 真空度が溶け込み深さに及ぼす影響

図7 溶け込み形状 (左: 大気中, 右: 高真空中)

図8 真空外型電子ビーム溶接機による溶け込み深さ

10^{-1} Torr 程度までは低真空中でも高真空中と溶接能力にあまり差がないとみなすことができる。

次に、電子ビームを大気中に取出す技術も確立され実用化が進んでいる。これには段階的に真空度の差をつける真空技術とともに、溶接熱源として有効な電子ビームを得るために120 kV以上の加速電圧が必要で、通常150～175 kVに設定される。図7は溶け込み形状を高真空中の場合と比較して示したものである。又、図8は溶接速度に対する溶け込み深さの関係を示したものである。

3.2 溶接金属に対する影響

溶接雰囲気は真空であることは溶接金属の大気汚染防止の面からは好都合である。例えば 10^{-4} Torrの真空雰囲気中の不純物の割合は0.000013%である。

図9は真空度が溶接金属の曲げ角度に及ぼす影響につ

いて示したものであるが、チタンやジルコニウムのような活性金属を除けば真空度の影響をさほど受けないようである。

一方、真空雰囲気であることの不都合さも考えねばならない。一つは蒸気圧の高い合金元素の蒸発による組成変化、例えばステンレス鋼中のマンガン、アルミニウム合金中のマグネシウムなどがあげられる。また一つは残存ガス多く気孔が生成しやすい材料の場合である。これらの場合には高真空よりむしろ低真空で行なう方が好ましい。

4. 電子ビーム溶接装置の現状と将来

電子ビーム溶接法は先に述べたとおり、ふつうは真空中で行なわれるため溶接部は大気で汚染されることがな

図9 真空度が曲げ角度に及ぼす影響 (板厚 2 mm, 曲げ半径 2 mm)

く、溶接品質の面からは大きな利点がある。

一方、真空中で溶接することの欠点として、被溶接物を真空の容器に封入しなければならないことがあげられる。そのために、その都度排気操作が必要となり、また被溶接物の大きさにも制限が生じてくる。

この問題に対処し、応用分野を拡大するために種々の方策が講じられているが、ここでは代表的な方式を例によって説明してみよう。

4.1 大型チャンパー方式

図10は内径1.5m、長さ9mの大型チャンパーを具備した装置で、X方向はテーブル走行、Y方向は電子銃系が電子ビームを出しながらの走行によりチャンパー内が有

効に使えるようになっている。この電子銃系移動にはスライディング・シール技術が採用されており、後述するローカルチャンパー方式を実現するためにも極めて重要な技術である。なお、この装置の真空排気時間は 5×10^{-4} Torr まで約10分であり、部分真空変換装置により 10^{-2} Torr 程度の低真空でも溶接できるようになっている。

また、チャンパーの大きさが巾6.2m、奥行3.4m、高さ1.3mの装置も既に実用化されている。

チャンパー方式は汎用性があり、溶接雰囲気制御しやすいという利点があるため、今後も更に大型化が進むであろうが、排気装置の強化も必要となってくる。

4.2 連続部分真空方式

真空中で溶接することの欠点として作業時間に対して排気時間の占める割合が大きいことがあげられるが、この連続部分真空方式では見かけ上の排気時間が0となっており、量産効果を増大したものである。

図11は自動車用トランスミッションギア専用の電子ビーム溶接機である。本装置は120 mmφ×70 mmの溶接室を12個具備したインデックステーブルを有している。大気中には5ステーションが露出しているが、その内4ステーションを使って2種のギアが搬入搬出される。ギアがセットされた溶接室はインデックスされながら3段階に順次真空排気され、溶接ステーションに送られるとすぐに溶接可能な 10^{-2} Torr に達している。

溶接が完了すると再び大気中に導き出される。従ってタクトタイムはインデックスタイムと正味溶接時間の和となり、この種のギアの標準処理能力は約10秒/個と極

図10 EBW (7.5) 1.5 mφ × 9 m

図11 PCW (6) 12S

図12 電子ビーム溶接ラインの例

めて生産性が高い。

本装置もスライディングシールを用いた代表的なものである。

さて、本装置は全自動であるが、前後の工程も含めた溶接ラインの自動化を計った事例につき簡単にふれてみよう。

図12はその一構成例である。別個に加工された各2種類のギアピースとスプラインピースはトリクロールエチレン槽中で、予備浸漬→超音波洗浄→冷却→蒸気洗浄が自動的に行なわれる。汚れが完全に落された両ピースは乾燥され、コンベアで油圧プレスに送られ圧入される。圧入されたギアはオートローダーで電子ビーム溶接機の

図13 真空シールの例

所定のステーションの治具にセットされ前述のように溶接が行なわれる。

溶接が終ったギアはコンベアで超音波探傷器に運ばれ溶接不良がないか全数検査される。なお、一部のギアは浸炭焼入後溶接されるが、溶接部の脆化と割れ防止のために炉中で低温焼鈍される。

このように洗浄機のコンベアにセットされてから検査までまったく人手をかけないため、ワークは完全に清浄であり、また電子ビーム溶接の高速性能を最大に発揮できるのである。

4.3 局部真空方式

大型構造物の溶接に電子ビーム溶接が適用できたらという声は昔からあった。そこで溶接物自体を溶接室の底板の一部として利用するローカルチャンバー方式が考え出された。この方式は限定された形状の溶接物には成功したとの報告もあるが、総じて開発途上の技術であり各方面からの期待も大きい。

図14 NVW (25)

図15 EBW (25) 52 44 44

この方式を実用化するには装置メーカー単独では解決できない問題がある。それは溶接物の粗い表面や銜合部の隙間をどのように真空シールするかという大きな問題である。シールに必要な項目をあげると

- (1) シールは変化する隙間にまたがり、かつ粗い表面をシールできるものであること。
- (2) シールは銜合部を横切ることが可能なこと。
- (3) シールは何回でも使用できること。
- (4) シールは迅速に作動するものであること。
- (5) シールは衝撃や多少の動きにも充分耐え得ること。
- (6) シールは真空室に不当な力を与えないものであること。

などのほか溶接部からの熱に対する配慮が必要であり、また継手形状に適したシール構造が必要となる。

図13にシールの一例を示す。(a)はネオプレンチューブで内圧をかけて溶接物表面の粗さに対応させている。これは曲面のシールに有効である。又、(b)は平滑面をシールするのに有効でシール材としてネオプレンやテフロン等が用いられる。

4.4 真空外方式

図14は真空外型電子ビーム溶接機の一例であるが、通常 175 kV の高加速電圧で加速された電子ビームは 10^{-4} Torr 台の電子銃室から特殊オリフィスで形成される数段階の真空度領域を経て大気中に放出される。

この際電子ビームは散乱によりエネルギー密度の低下を招くが、通常の TIG 溶接に比較して熱入力は 1/5 以下、溶接速度は 5 倍以上になり、しかも真空排気時間が不要となるため高速溶接に威力を発揮している。

本法は既に実用化も進み、米国では自動車工業を中心に 40 台近くが生産ラインに投入されている。国内ではまだ 3 台の稼動であるが、用途が広いため各種の分野への進出が見込まれている。

4.5 その他

以上は真空との関連で溶接雰囲気を主体とした各種方式につき述べたが、その他の例について紹介する。

図15は N/C、マイクロコンピュータ付きの電子ビーム溶接機で、ビーム出力は 25 kW でステンレス鋼における最大溶け込み深さは 100 mm 以上あり、N/C によるテーブル駆動、マイクロコンピュータによる溶接条件設定等、電子ビーム溶接機の将来を示唆するものである。

図16は小型専用機の一例である。ワークは約 $15\phi \times 60$ のパイプ状を呈しており 2 か所の円周溶接を行なう。同時に 30 コのワークが装填でき、真空排気から溶接完了まで自動化を計り、タクトタイムも 15 秒/コ以内である。本装置は低価格で、一般工作機械並みの扱い易さから、電子

図16 EBW (0.75)

ビーム溶接機の広範囲の普及を計ったものである。

5. 応 用 例

最後に電子ビーム溶接の特長を生かした応用例について一部紹介しよう。

5.1 バイメタルバンドソーブレード (図17)

高電圧型電子ビーム溶接機を使用し、高速度鋼からできている歯の部分に低合金鋼からできている背の部分に溶接、その後歯が刻まれ熱処理される。

ブレードの歯の部分以外は低合金鋼であるため、材料費の節減のみならず、延性に富み、溶接性が良いためにクラックが発生しにくく、ソーブレードループを製造するために従来の設備と技術(抵抗溶接)が流用できる。

これは大幅な性能向上とコストダウンに成功した例である。

5.2 トランスミッションギア (図18)

従来の一体加工ではハスバギアとスプラインのショルダーが接近しているので、その間に大きい間隔が必要で

図17 バイメタルバンドソーブレード

図18 トランスミッションギア

大形となる上、最適の設計ができなかった。

これを分割して別個に加工するようにした結果、歯車諸元が自由になり、性能改善が図れ、また加工面ではホブを使用できるので精度や加工能率が向上した。

さらにスプラインは歯切りを能率と材料歩留りの良い冷間鍛造を採用し、大幅なコストダウンが果たされた。

5.3 ダイアフラム (図19)

計器用ダイアフラムは肉厚0.1 mm 前後のステンレス鋼やベリリウム銅でできており、最終的に真空封じ込めが必要であるが、真空中で行なう電子ビーム溶接の場合には、薄肉部品を歪みなく良好な溶接ができると同時に真空封じもできるという特長がある。

5.4 タイヤチューブ (図20)

角チューブを3段階重ね、1パスで一体化を計ったものである。本溶接には発散角の小さな電子ビームが有効である。

5.5 ステアリングカラムジャケット (図21)

従来は肉厚の薄い冷間引抜鋼管を使用し、これに24工程の機械加工を施していたが、現在では板状の素材を使用し、1工程のブランク成形、それに続いてチューブ状にフォーミングし、最後に真空外電子ビーム溶接をするという簡単な工程に変更した。この例は真空外電子ビーム溶接の利点を十分に生かし、大きな原価低減と高い生産効率を実現した代表的なものである。

その他、活性金属の溶接、異種金属の溶接、厚板の1パス溶接(ステンレス鋼で100 mm 以上)、厚板と薄板との溶接、各種製品の補修溶接等々、従来の方法では不可

図19 ダイアフラム

図20 タイヤチューブ

能もしくは困難と言われた対象物への適用が進められている。

6. おわりに

以上述べてきた事例はほんの一部にすぎず、電子ビーム溶接の全体を把握するにはいささか偏重しているので最後に参考文献を紹介しておきたい。

図21 ステアリングカラムジャケット

〔文 献〕

- 1) 黒田：電子ブーム溶接（日刊工業新聞社，1971）
- 2) A.H. メレカ，寺井：電子ビーム溶接—原理と実

際（産報，1972）

- 3) 上野：電子ビーム溶接とその実例（金属材料
第14巻，第3号）