加工用ビームの最近の進歩

電子ビーム加工機における陰極の長寿命化*

安永 政司**, 佐々木 茂雄**, 村上 英信**

Long Lifetime Cathode for Electron Beam Processing*

by Seiji Yasunaga**, Shigeo Sasaki** and Hidenobu Murakami**

キーワード：電子ビーム加工，電子ビーム溶接，長寿命陰極，棒状陰極，リボン型陰極，LaB₆陰極，イオン衝撃

1. はじめに

電子ビーム加工の特徴は，真空中で電子ビームの発生・加速・集束・偏向が電磁界により高速制御できることである。この特徴を加工熱源の観点からみると， $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ に達するエネルギー密度およびその照射位置を高速かつ高精度に制御可能な加熱源であると言える。

この特徴は，K. H. Steigerwald による電子ビーム穴明け，J. A. Stohr による電子ビーム溶接の研究に端を発し¹⁾，溶接，表面熱処理，穴明けなどの加工分野で利用されている²⁻⁵⁾。

特に電子ビーム溶接法は，熱歪みが小さく熱影響層も狭いなど溶接品質が極めて優れている。そのため，生産現場で稼働している電子ビーム加工機は，ほとんどが溶接を対象にしており，生産形態，生産量，部品サイズ，加工の種類に応じて様々な種類がある。用途別に分類すると，小物部品を対象にした 6 kW 級の量産型電子ビーム加工機と特殊材料や大型構造部品を対象にした 15 kW～100 kW 級の汎用型電子ビーム加工機に大別され，自動車や重工業産業分野を中心に，現在国内で 500 台以上の設置台数に達している⁶⁾。

しかし，これらの電子ビーム加工機を生産工程に導入する際の基本的な条件である，安定した加工品

質と安定した生産性を維持するためには，電子ビーム加工機用電子銃の陰極の長寿命化が重要な課題となる。

量産型電子ビーム加工機では，1 個あたりの加工に要する時間（タクトタイム）が短く，生産性の高い装置構成であることが要求される。加工雰囲気圧を約 7 Pa 以下にすれば^{7,8)}，高真空の加工雰囲気圧で行った場合と同等の安定した加工品質が得られる。したがって，安定した生産性を維持・向上するために，電子ビーム加工機の稼働時間の多くを占める真空排気時間が短縮できる低真空型が主流を占めている。ところが，陰極の消耗は加工室の真空度が低くなるほど加速され，陰極の寿命が急速に短くなる。その結果，陰極の取替周期が短くなり，取替に伴うロスタイムが多くなるため，生産ライン全体にも多大の影響を与える。即ち，陰極の寿命は装置およびラインの稼働率を決める主要因になっている。

また，大型構造部品を対象にした汎用型電子ビーム加工機では，陰極の寿命が短いと，装置の稼働率の低下を招くばかりでなく，長い加工時間の途中で陰極が破断する恐れがあり，実用化にあたって大きな障害となる。また，陰極の寿命は，溶接電力が増加するほど短くなるため，陰極の長寿命化は大出力の汎用型電子ビーム加工機においても必須な課題である。

ここでは，生産現場で安定して連続稼働できる電子ビーム加工機用電子銃陰極の消耗現象と寿命の関連，陰極の長寿命化の方策などについて，陰極の長

*原稿受付 平成 4 年 9 月 18 日

**正 員 三菱電機㈱ Member, Mitsubishi Electric Corp.

寿命化を実現するには、一番厳しい加工法である溶接への適用を中心に述べる。

2. 陰極の消耗と寿命

2.1 陰極の消耗に関連する現象

電子ビーム加工機用として実用化されている陰極は、電子ビーム電流が 10 mA~1 A 必要なため、ジュール加熱や電子衝撃などにより加熱された陰極面に電界を印加し熱電子を放出させる熱陰極（単に陰極と呼ぶ）型が用いられる。

この型の陰極が消耗するのは、主として次の原因によるものと考えられている^{9,10)}。

- ①陰極が高温に加熱されることに伴う蒸発。
- ②残留ガスとの高温反応に伴う腐食。
- ③イオン衝撃による局部過熱に伴う蒸発と腐食。
- ④イオン衝撃によるスパッタリング。

①は通常の蒸発消耗、②は水蒸気を主成分とする残留ガスの一部が陽極孔から電子銃に流れ込み、高温に過熱された陰極を腐食消耗する現象である。③、④のイオン衝撃による陰極の電子放射面が消耗に至る過程を図 1 に示す。加工チャンパー内において、電子ビームの照射で形成された熔融池から放出される金属蒸気あるいは残留ガスは電子ビームにより電離され正イオンが発生する。この正イオンは電子ビームの空間電荷が形成する電界に拘束されながら陰極方向にドリフトし、その一部は陽極孔を通過し、陽極から陰極に向かって電子ビーム加速電界で加速される。高速の正イオンが陰極の電子放射面に衝突すると、③の陰極面が局部的に温度上昇による蒸発

図 1 陰極電子放射面の消耗過程

消耗とともに、④のスパッタリング作用による消耗が発生する。

2.2 陰極の寿命

電子ビーム加工機用電子銃の陰極は、加工対象物に対応して集束性に優れた電子ビームを引き出すために、陰極の熱電子放出面積を制限して陰極温度をできるだけ高く設定する傾向があり、陰極の蒸発消耗速度が速い。また、電子ビームの加工雰囲気を低真空化あるいは照射電子ビーム電力を高出力化すると、腐食蒸発に伴う消耗とイオン衝撃に伴う消耗が促進される。

その結果、陰極の破断が発生した時、あるいは破断には至らないまでも陰極面の局所消耗などに伴う電子ビーム電流密度分布が著しく変化するため、照射部における電子ビームの集束特性が低下し、実用上の加工性能に大きな影響を及ぼす時が陰極の寿命であると判断できる。

2.3 生産現場における陰極の取替周期

前述したように、生産現場で稼働している電子ビーム加工機は、生産形態、生産量、部品サイズ、加工の種類に対応し多岐に渡っており、それらに使用されている陰極も様々な種類があるため、全ての陰極取替の実情を把握することは難しい。そこで、他の電子ビーム加工装置に比べて、陰極寿命が短い電子ビーム溶接機の場合を例に取る。

生産現場における陰極の取替周期は、量産性の高い低真空型電子ビーム溶接機に使用されている直熱型陰極で、通常、2~3 日程度である。さらに、陰極交換作業、電子銃室の高真空排気、耐放電コンディショニング、ビームアライメント調整、溶接性能の再現確認など、一連の頻繁な装置復旧作業には、1 時間程度の時間が必要である。

したがって、安定した生産性を維持するためには、陰極の長寿命化を図り、陰極の取替周期が少なくとも 1 週間以上にすることが不可欠である。特に量産用の低真空型電子ビーム溶接機を、2 シフトの生産

表 1 陰極の寿命試算

使用例		A	B
稼働条件	陰極の取替周期 (week)	2	
	1 日の稼働時間 (hr/day)	16	
	1 週間の稼働日数 (day/week)	5	
	タクトタイム (sec)	45	15
使用条件	溶接時間の占める割合	1/3	1/2
	陰極使用時間 (hr)	160	160
	溶接時間 (hr)	54	80
	溶接電力 (kW)	6	4
	積算溶接電力 (kW·hr)	324	320

ラインで使用するような場合には、陰極の取替周期を2週間にすることも望まれる。表1に、陰極の取替周期を2週間にするための必要条件を、2つの稼働条件について試算した結果を示す¹¹⁾。

3. 開発の現状と今後の展開

3.1 陰極の長寿命化に関する研究開発動向

陰極の長寿命化については様々な研究が行われている。電子の発生源で分類すると、プラズマ陰極方式と固体型陰極に大別される。その主だった研究内容を以下に紹介する。

陰極の長寿命化を最重視し、中空陰極異常グロー放電によって形成されたプラズマから電子ビームを発生するプラズマ陰極方式の電子銃に関する研究が行われた¹²⁻¹⁴⁾。しかしこの方式は、固体型陰極と比較した場合、電極の寿命が長い反面、電流密度分布の裾野が広く加工断面がワインカップ状になる傾向が強い。また、ビームの高出力化を図ろうとしたとき、電子ビームの集束性と電子ビーム電流の制御性とを同時に満足することは困難であることが判明したため、実用化に至っていない。

一方、固体型陰極では、通電加熱陰極材料の選択による陰極の長寿命化および新しい陰極構造と加熱方式の開発による陰極の長寿命化が図られており、実用化されている陰極方式を図2に示す¹⁵⁾。一般的に陰極材料は、タングステン、タンタルが多く用いられるが、近年、低温で動作し高輝度ビームが得られる6ボロン化ランタン(LaB₆)も採用される傾向にある。

通電加熱方式陰極に関しては、板状陰極の材料を純タンタルから折り曲げ加工性のよいレニウム添加のタングステンに代え、板を厚くすることで寿命の改善が図られているが、その適用は高電圧・小電流型装置に留まっている。また、リボン型陰極の電子放出面にLaB₆の焼結材を張り付けて陰極の動作温度を低くすることも試みられているが、寿命の報告はない。

新しい陰極構造と加熱方式の開発による陰極につ

図2 各種熱陰極形状¹⁵⁾

いては、長寿命と大出力が両立できる可能性の高い方式として、ボタン型と棒状型の電子衝撃加熱方式の陰極の開発が進められている。ボタン型陰極は、同心円状のフィラメントをボタン状陰極背面に配置し、その陰極背面に電子を衝撃加熱する方式であるため、電子ビーム溶解などの大きな陰極面積が必要な用途に適しているが、Sayeghらはビーム電流1 A、出力100 kWの大出力電子ビーム溶接機用として直径5 mmの電子衝撃加熱方式のボタン型陰極を報告している¹⁶⁾。一方、棒状型陰極は、円柱状の棒状陰極の周りに螺旋状フィラメントを同軸に配置し、棒状陰極の側面を電子衝撃加熱する方式であり、陰極面積に構造上の制約がないことが最大の特長である。この陰極構造はE. B. Bassによって提案され¹⁷⁾、電子ビーム溶解、溶接、蒸着の発生源に用いると、棒状陰極の寿命は電子放射面の消耗で決ると報告されている⁹⁾。また、ウェスティングハウス社のLampertらは、Bassが報告した棒状型陰極を大気中電子ビーム溶接機に適用し、陰極寿命が約45時間であり、陰極側面の蒸発消耗が支配的であると報告している¹⁸⁾。日本では荒田らによって研究され、同様に棒状型陰極側面の局所消耗が問題であるとの報告がなされている¹⁹⁾。

著者らも、電子ビームの集束性から要請される高い放出密度と、電子ビーム溶接法の実用性から要請される長寿命との両立を狙いに、棒状型陰極の研究開発を行っている²⁰⁻²²⁾。具体的には、タングステン製の棒状陰極や螺旋状フィラメントのたわみ、棒状陰極の局所的側面消耗などの技術課題に対処した独自構造の棒状型陰極の開発を行っている。その陰極寿命を支配する要因の分析と定量把握を行った結果、低真空型電子ビーム溶接機の陰極においては、前記の陰極消耗の諸現象の中で、④のイオン衝撃によるスパッタリングに起因する消耗が、陰極の寿命を決定する重要な要因であることが判明し、以下の主要な結論も得られた。

①図3に示すように、陰極の電子放出面の消耗速度は使用条件によって大きく異なり、電子ビームの発生時間（即ち加工時間）と発生電力との累積で決まる。

②棒状型陰極の総合寿命は、螺旋状フィラメントの断線で決まり、定格加熱時間で、約500時間である。

電子放射面の消耗量が電子ビームの溶け込み能力に与える影響については、図4に示すように、消耗量が0.1~0.2 mm³であっても溶け込み特性への影

図 3 積算溶接パワーと陰極の消耗量

図 4 陰極の消耗と電子ビームの溶け込み能力

図 5 陰極の温度制御のブロック図

響が少ないことを確認している。なお、大出力で溶接する場合も、陰極消耗により溶け込み特性が急速に変化する恐れがないことも確認している²³⁾。

また、生産ラインにおいては定格以下の出力で断続的に電子ビームを発生することが多いことに着目して、図5に示すような、陰極加熱電力自動補正制御方式により、さらに実用上での陰極の長寿命化を図っている²⁴⁾。この方式は、電子ビームの溶接性能が電子銃のバイアス電圧に依存する特性を利用したものであり、電子ビーム発生時における電子銃のバイアス電圧をバイアス電圧検出回路で検出し、陰極加熱電力を必要最小限に設定すること、および加工時以外は電子ビーム発生時に比べて陰極加熱電力を

10%低く設定することができる構成になっている。その結果、生産ラインにおける棒状型陰極部の交換周期は、装置の稼動時間で1000時間を越えることが確認されている。

3.2 電子ビーム加工機用陰極の今後の展開

以上の研究開発を踏まえ、現行の低真空型電子ビーム加工機と汎用型電子ビーム加工機に加え、今後適用拡大が期待される精密加工用電子ビーム加工機において、ビーム性能として重要な電子ビーム集束性および陰極の長寿命・安定性の両面から陰極方式の基本的選定条件をまとめてみると、以下の通りである。

- ①陰極の電子放射面積が可変で、その最大ビーム電流を10 mA から1 A の範囲で選定できる。
- ②電子ビームの集束電力密度を 10^6 W/cm^2 以上に高められる。
- ③イオン衝撃による消耗が著しい使用条件下でも寿命が長い。

この条件を実用化されている各方式の陰極に当てはめると、ヘアピン型は②の条件を満足することは容易であるが、電子放射面積が限定されスパッタによる消耗が大きいため①③の条件を満足することは非常に困難である。また、リボン型は①②の条件を満足することは比較的簡単であるが、板厚に制限があるため③の条件を満足することは難しい。逆にボタン型は③の条件を満足しやすいが、電子放射面積を小さくできないため①②の条件を満足することは困難である。そして棒状型は①②③をほぼ満足する。一方、陰極の製作面から見れば、電子衝撃方式は、通電加熱方式に比べ、陰極構造が複雑であるため、イニシャルコストの高いものになる。

したがって、上記の長所・短所を踏まえながら、総合的に見地から新方式の陰極を検討し、実用化への展開を図る必要がある。

著者らはその具体的な試みとして、陰極形状は棒状、陰極材料はLaB₆の焼結材、そして加熱はカーボンヒーターによる通電加熱方式を用い、電子銃が大型真空加工室内に設置された30 kW (最大ビーム電流: 500 mA) 級ムービングガン用の陰極として実用化を図っている。陰極加熱電力が、従来用いていた陰極に比べ1/4以下になり、電子銃構成の小型・軽量化を実現している。また、陰極の酸化劣化を防止するため、電子銃室を 10^{-2} Pa 以下の高真空雰囲気中に排気し、約200時間の陰極寿命を達成している。さらに、この実績に基づき、セラミック基板などの

高速微細穴あけを対象に高輝度で安定なパルスビーム発生源としての適用を図っている。

この陰極は、加熱特性やビーム出力特性の安定化、大出力やイオンスパッタが発生しやすい過酷な使用環境における陰極消耗の低減など、解決すべき課題も多いが、陰極の長寿命化を図っていく一つの突破口と位置づけたい。

4. お わ り に

以上、生産現場に適合できる電子ビーム加工機的主要構成要素である電子銃陰極の長寿命化について述べた。

電子ビーム加工機が既存の市場分野のみならず先端技術分野において、加工品質と生産性の両立する装置として生産工程に導入するためには、電子ビーム加工機的主要構成要素の中で最も寿命が短い部品である陰極の長寿命化を図ることが必要不可欠である。その結果、一般機械加工装置と同等の高精度・高信頼性が達成されたとき、電子ビーム加工機の適用範囲は、一層拡大されると確信する。

参 考 文 献

- 1) J. A. Stohr: Electronic Welding of Metals, Technical Symposium on Fuel Elements, Paris, Novenver (1957) 18-23
- 2) 精密学会エネルギービーム分科会編: エネルギービーム加工, リアライズ社(1985) 233-257
- 3) 内海, 山根, 大田, 丸山, 平本: 電子ビーム加工技術, 三菱電機技報, Vol. 61, No. 6 (1987) 482-489
- 4) 安永, 村上: 電子ビーム加工技術, 真空, Vol. 34, No. 9 (1991) 699-706
- 5) 樋口, 生田編集: マイクロメカニクスシステム実用化技術総覧, フジ・テクノシステム出版(1992) 200-210
- 6) H. Irie, S. Sasaki, H. Murakami: Apparatuses and Applications of Electron Beam Welding in Japan, International Institute of Welding, Doc. IV-585-92 (1992)
- 7) 橋本, 松田, 大橋, 入江: 溶接学会誌, Vol. 38, No. 10 (1969) 1091
- 8) A. H. メレカ: 電子ビーム溶接—原理と実際—, 寺井清訳, 産報出版(1972) 110-111
- 9) E. B. Bass: Contribution to the Problem of the Electron Beam Design for Melting Welding, Evaporation and Drilling Processes, Transaction of the 8th Vacuum Symposium and 2nd International Congress, Vol. 2 (1962) 817
- 10) A. H. メレカ: 電子ビーム溶接—原理と実際—, 寺井清訳, 産報出版(1972) 20-22
- 11) 上山, 安永, 佐々木, 奥田, 大峯: 低真空形電子ビーム溶接機用棒状熱陰極電子銃 — 量産部品の溶接を対象とした陰極寿命に関する研究 —, 溶接学会第22回電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-178-77 (1977)
- 12) M. A. Cocca, L. H. Stauffer: Grid Controlled Plasma Electron Beam, Proceeding of The Electron Beam Symposium Fifth Annual Meeting (1963) 342-367
- 13) 上山, 安永, 佐々木, 田野: 低真空形電子ビーム溶接機用プラズマ電子銃, 三菱電機技報, Vol. 46, No. 10 (1972) 1158-1162
- 14) 上山, 坂元, 安永, 田中, 奥村, 井藤: プラズマ電子ビーム溶接機の特長, 三菱電機技報, Vol. 45, No. 10 (1972) 1304-1312
- 15) 日本学術振興会第132委員会編: 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) 367-368
- 16) G. Sayegh, P. Dumonte, T. Nakamura: Design and Manufacture of a 100 kW Electron Gun, The 2nd International Symposium of the Japan Welding Society (1975) 15-20
- 17) E. B. Bass: Die Bolzen-Kathode, zur Angewandten Physik, Vol. 7 (1955) 337
- 18) J. Lampert: Preliminary Evacuation of Nonvacuum Welder for Aerospace Application, Scientific Paper 66-1C2-E WALD, 1, P. Class (1966)
- 19) 荒田: 溶接学会全国大会講演概要第10集(1972)
- 20) 上山, 安永, 佐々木, 丹羽, 田野: 低真空形電子ビーム溶接機用棒状熱陰極電子銃, 三菱電機技報, Vol. 50, No. 8 (1976) 435-438
- 21) T. Okuda, M. Ohmine, Z. Ueyama, S. Yasunaga and S. Sasaki: Bolt Type Hot Cathode Electron Gun for Medium Vacuum Type Electron Beam Welder, 2nd International Colloquium of Electron Beam Welding and Melting, September (1978)
- 22) 高野, 安永, 佐々木, 藪中, 原: 大出力棒状熱陰極形電子ビーム溶接機の特長, 溶接学会第30回電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-232-80 (1980)
- 23) S. Satoh, S. Yasunaga, S. Sasaki, F. Yabunaka and K. Hara: A High Power Electron Beam Welder with Bolt Cathode, International Institute of Welding, Doc. IV-278-80 (1980)
- 24) 石見, 山本, 大田, 桂田: 最近の電子ビーム加工の技術動向と電子ビームの高速偏向による熱加工, 溶接学会第10回高エネルギービーム加工研究委員会資料, HEB-18-92 (1992)