アルミニウム合金の真空中での GHTA 溶接現象*

吹田 義一**, 永井 宏和***, 新池 修平***, 佃 芳行**, 寺嶋 昇**,
藤澤正一郎****, 増渕 興一*****, 今川 吉郎*****, 山下 雅弘*****

GHTA Welding Phenomena of an Aluminum Alloy in Vacuum*

By SUITA Yoshikazu**, NAGAI Hirokazu***, SHINIKI Shuhei***, TSUKUDA Yoshiyuki**, TERAJIMA Noboru**,
FUJISAWA Shoichiro****, MASUBUCHI Koichi*****, IMAGAWA Kichiro***** and YAMASHITA Masahiro*****

Aluminum alloys that have high specific strengths have been widely used in constructing various space structures including the International Space Station (ISS) and launch vehicles. Considering space applications, a series of welding experiments were performed in vacuum on an aluminum alloy using the GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) welding processes under d. c., a. c., and d. c. - pulsed conditions. Results observed in the GHTA welding experiments performed in vacuum can be summarized as follows:

- (1) When GHTA welding was performed using a commercial a. c. welding machine, the arc discharge did not occur during the electrode positive polarity of alternating current. As a result, it was not possible to remove oxide films from the specimen surface resulting in the cleaning action.
- (2) During the d. c. - pulsed GHTA process, it was possible to mechanically shatter and remove the oxide films covering the molten pool by the impact of the arc force.
- (3) A study has been made to determine effects of pulse current during the d. c. pulse welding on characteristics of melting and bead appearances during the d. c. - pulsed GHTA welding.

The above-mentioned results show that welding phenomena observed in the experiments performed under vacuum conditions were very different from those observed in the experiments performed in the air.

Key Words: Space welding, GHTA welding, Aluminum alloy, ISS, d. c. - Pulsed GHTA welding, Oxide film, Cleaning action, Arc force

1. 緒 論

2003年2月1日、乗員7名全員が死亡するスペースシャトル「コロンビア」の空中分解事故が発生した。テレビに映し出された墜落状況は人々に宇宙開発の危険性と安全確保の重要性を再認識させた。NASAは原因が究明されるまでスペースシャトルの打上げを凍結したので国際宇宙ステーションISS (International Space Station) の完成延期は必至の状況にある。ISSの運用期間は10年とされているが種々の理由から延長される可能性もある。そのためにデブリ衝

突やその他の原因による損傷の修理や高機能化のための改造要求が出る可能性が高い。それに応えるには宇宙溶接技術の確立¹⁾が必要不可欠になる。

旧ソ連は宇宙溶接技術の必要性を早くから認識して、1960年ごろから電子ビーム溶接^{2,3)}を中心にした研究開発を実施した。また、米国では電子ビーム溶接⁴⁾やNd-YAGレーザ溶接⁵⁾などの研究開発が行われた。日本でも微小重力下でGTA溶接実験^{6,7)}や電子ビーム溶接実験⁸⁾が行われた。

一方、著者らは中空タングステン電極を使用する安全性の高い宇宙GHTA (Gas Hollow Tungsten Arc) 溶接法を提案⁹⁾した。そして、これまでに航空機を利用した模擬宇宙環境での溶接実験^{10,11)}などを実施し、実用化に向けての研究を行っている。宇宙材料のアルミニウム合金の突合せ溶接継手をDCEN極性の宇宙GHTA溶接で製作したところArガス噴流やアーク力によって溶接金属にくぼみが発生した。そのためにのど厚が部分的に母材板厚よりも小さくなり、また軟化によって溶接金属部で破断する現象¹²⁾が発生した。従って、継手強度を向上させるには溶添加材添加の必要があるが溶添加材と溶融金属を十分に融合させるにはぬれ性向上の観点から溶融池上の酸化膜除去が望まれる。このような状況を考慮して、本報告ではインバータ制御交流/直流両用ティグ溶接機を使用して直流GHTA溶接、交流GHTA溶接および直流パルスGHTA溶接によるメルトラン溶接実験を実施した。そして、それらの溶接現象の特徴

* 原稿受付 平成15年7月7日 平成15年度春季全国大会で発表
** 正 員 高松工業高等専門学校 Member, Takamatsu National College of Technology
*** 学 生 員 高松工業高等専門学校 Student Member, Takamatsu National College of Technology
**** 高松工業高等専門学校 Takamatsu National College of Technology
***** 推薦会員 マサチューセッツ工科大学 Guest Member, Massachusetts Institute of Technology
***** 宇宙開発事業団 National Space Development Agency
***** 正 員 香川県産業技術センター Member, KAGAWA Prefectural Industrial Technology Center

を調査するとともに直流パルスGHTA溶接による溶融池上の酸化膜除去について検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

真空環境でのGHTA溶接実験に使用した真空環境GHTA溶接装置をFig. 1に示した。真空ポンプには油回転ポンプ ($0.26 \text{ m}^3/\text{s}$) と油拡散ポンプ ($0.35 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) を採用した。内径約 0.5 m 、高さ約 0.5 m のステンレス鋼製真空容器に中空タングステン電極を装着したGHTA溶接トーチと供試母材を載せて直線移動する走行台車を内蔵した。Fig. 2は内蔵したGHTA溶接トーチの詳細である。中空タングステン電極は外径 $D = 4 \text{ mm}$ 、内径 $d = 1.8 \text{ mm}$ の2%酸化ランタン (La_2O_3) 入りタングステン電極で、電極先端は 60°

Fig. 1 Apparatus for GHTA welding experiments.

Fig. 2 Detail of welding torch and hollow electrode.

に成形した。Arガスの流量制御にはマスフローコントローラを使用した。溶接機には市販のインバータ制御交流/直流両用ティグ溶接機を使用して直流GHTA溶接、交流GHTA溶接を行った。なお、直流パルスGHTA溶接では直流パルス電源を使用してメルトラン溶接実験を行った。溶接電流と溶接電圧の計測・記録はデジタルクランプメータ、デジタルオシレコーダを使用した。また、アーク放電、溶融状況はビデオカメラで撮影した。

2.2 供試材と実験手順

供試母材は長さ 150 mm 、板幅 75 mm 、板厚 4 mm のアルミニウム合金 A2014-T6 で表面は受け入れ状態のままとした。母材の板幅中央部を長手方向にメルトラン溶接を行った。直流および交流GHTA溶接では溶接電流 $I = 125 \text{ A}$ 、Arガス流量 $Q_{\text{Ar}} = 3.34 \text{ ml/s}$ とした。一方、直流パルスGHTA溶接ではパルス電流 $I_p = 80 \sim 200 \text{ A}$ 、パルス幅比率 $W_p = 15 \sim 27\%$ 、パルス周波数 $F_p = 3 \sim 20 \text{ Hz}$ および Arガス流量 $Q_{\text{Ar}} = 1.25 \sim 3.34 \text{ ml/s}$ の範囲で変化させた。なお、ベース電流 $I_b = 40 \text{ A}$ 、溶接速度 $v = 6.6 \text{ mm/s}$ と溶接開始前の初期真空容器内圧力 0.4 Pa は一定値とした。また、一部の実験では溶融金属と溶加材のぬれ性を調査するために直径 2 mm のアルミニウム合金溶加材 (A5356-BY) を溶接線と垂直方向に母材上に仮付け溶接して溶加材を横切るようにメルトラン溶接を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 直流GHTA溶接と交流GHTA溶接の溶融現象

Fig. 3は真空環境において直流GHTA溶接 (DCEN) でアルミニウム合金のメルトラン溶接を行ったときのビード外観である。溶接条件は溶接電流 $I = 125 \text{ A}$ 、電極高さ $H_E = 2 \text{ mm}$ 、Arガス流量 $Q_{\text{Ar}} = 3.34 \text{ ml/s}$ 、溶接速度 $v = 6.6 \text{ mm/s}$ である。DCEN極性の溶接ではクリーニング現象がないので Fig. 3のビード表面には白いき裂やシワを持つ灰黒色の酸化膜が残留している。母材表面の酸化膜は未溶融状態でその下の母材内部が溶融する現象が起きている。溶融池上面を覆う未溶融酸化膜が溶融池の表面流動を制限するために溶接金属にはArガス噴流やアーク力によって生じた凹凸が残留している。溶接線に直角に母材上に置かれた溶加材の酸化膜も除去されないために溶加材は溶融金属と十分に融合していない。この実験結果から宇宙環境では溶加材の添加を必要とするアルミニウム合金の突合せ溶接には直流GHTA溶接は適用できないことが予想される。

次に、クリーニング現象による母材表面の酸化膜除去を期待して真空中で交流電源による交流GHTA溶接実験を試みた。溶接条件はFig. 3と同じである。Fig. 4にメルトラン溶接後のビード外観を示したがクリーニング現象が起きた状況は確認できない。ビード外観はFig. 3のビード外観と同じようにシワを持つ灰黒色の酸化膜がビード表面上に残留

し、溶接金属には凹凸が発生している。クリーニング現象が起きなかった原因を調査するために溶接中の電流、電圧波形を測定した。Fig. 5がその測定結果である。図から明らかのように、ACのEN極性期間では溶接電流125 A、溶接電圧約20 Vのアーク放電が起きている。しかし、ACのEP極性期間では再点弧電圧が約250 Vまで上昇しても再点弧

しないために溶接電流が流れない現象が確認できる。この測定結果から市販のインバータ制御交流／直流両用ティグ溶接機を使用した場合は、真空環境ではACのEP極性でアークが消失するためにクリーニング現象が起きないことが確認できた。

3.2 直流パルスGHTA溶接の溶接現象

3.2.1 溶融池上の酸化膜除去機構

次に、直流パルス電源を使用する直流パルスGHTA溶接(DCEN)によって溶融池上面を覆う酸化膜除去の可能性を検討した。溶接条件がパルス電流 $I_p = 200$ A、ベース電流 $I_b = 40$ A、パルス幅比率 $W_p = 22\%$ 、パルス周波数 $FP = 3$ HzおよびArガス流量 $Q_{Ar} = 3.34$ ml/sでメルトラン溶接したときのビード外観をFig. 6に示した。Fig. 6のビード表面には、Fig. 3の直流GHTA溶接やFig. 4の交流GHTA溶接のビード表面に見られた灰黒色の酸化膜が残留していない。ビード表面はアルミニウム金属光沢を示し、パルス電流によるリップルが認められる。また、溶接金属と母材上に置かれた溶加材は良好な状態で融合している。目視あるいは実体顕微鏡でビード表面を観察するとビード表面の一部に灰黒色の酸化膜小片が付着しており、この酸化膜小片の量が少ないほどビード表面のアルミニウム金属光沢が強くなることが分かった。また、Fig. 3やFig. 4のメルトラン溶接では観察できなかったアルミニウム合金の金属蒸着が母材表面やノズルなどに確認できた。これらの観察結果から溶融池上面を覆っていた未溶融酸化膜が次に述べるような機構によって除去されたと考えられる。

Fig. 7 (a) は Fig. 6 の直流パルス GHTA 溶接中の溶接電流、電圧波形、Fig. 7 (b) はそのアーク放電と溶融状況である。200 A のパルス電流時に溶接電圧は約 15 V から 45 V に急上昇し、その後 5 V 程度まで急落する。このパルス区間ではベース電流時のアーク圧力とパルス電流時のアーク圧力の差に依存する大きなアーク衝撃圧力が溶融池に働いていると予想される。図では分かりにくいがビデオ観察から

Fig. 3 Bead appearance by DC-GHTA welding in a vacuum.

Fig. 4 Bead appearance by a.c.-GHTA welding in vacuum.

Fig. 5 Current and voltage waveforms of a.c.-GHTA welding in vacuum.

Fig. 6 Bead appearance by d.c.-pulsed GHTA welding in vacuum.

(a) Current and voltage waveforms of d.c.-pulsed GHTA welding in vacuum

(b) States of arc discharge and molten pool during d.c.-pulsed GHTA welding

Fig. 7 Current and voltage waveforms and welding phenomena during d.c.-pulsed GHTA welding.

パルス電流時に発生するアーク衝撃圧力によってFig. 7(b)の③のように溶融池が掘られ、後方に押しやられた溶融金属が半球状化して、その表面の未溶融酸化膜が機械的に細かく粉砕される現象が確認できる。すなわち溶融池上の薄い酸化膜がアーク衝撃圧力によって粉砕され、粉砕された酸化膜小片の一部は溶融金属中に混入され、また一部はビード表面に付着残留する。この酸化膜除去機構を裏付けるようにビード表面だけでなく溶接金属の横断面中にも灰黒色の酸化膜小片が存在するのが確認された。この酸化膜除去機構は従来のクリーニング現象すなわち陰極点からの電子放出の際に酸化膜上の陰極点が超高温になって蒸発除去される酸化膜除去機構とは全く異なる。

3.2.2 溶接パラメータが酸化膜除去と溶融特性に及ぼす影響

先に記述したようにビード表面に残留する酸化膜小片の量が少ないほどビード表面のアルミニウム金属光沢（銀白色）が強くなる。溶接パラメータが酸化膜除去状態に及ぼす影響を簡易的に調べるために次の評価値 R を導入した。溶接終端から 10 mm ～ 40 mm の範囲のビード表面に注目し、白から黒までの輝度を 256 分割にした輝度と、各輝度の画素数（約 12000）との積の総和を画像処理によって検出し、それを指数値程度の値にするために基準値 10 万で除した値を酸化膜除去状態を示す評価値 R とした。従って、評価値 R が大きいほど酸化膜がよく除去されたことになる。

パルス電流を $I_P = 80 \sim 200$ A の範囲で変化させて直流パルス GHTA 溶接でメルトラン溶接を行った場合の評価値 R とビード表面状況を Table 1 に示した。実験範囲ではパルス電流値が増加するほど評価値 R が大きく、酸化膜がよく除

Table 1 Effect of pulse current on bead appearance.

Pulse current I_p [A]	Evaluation value, R	Bead surface
80	4.6
120	5.7
160	6.2
200	10.9

(a) Effect of pulse current on penetration depth

(b) Effect of pulse current on bead width

Fig. 8 Effect of pulse current on melting characteristics.

去される。この理由の一つとしてパルス電流が高いほどアーク衝撃圧力すなわち酸化膜への機械的破壊力が大きくなることが考えられる。

パルス幅比率の影響については $W_p = 15 \sim 27\%$ の範囲で調査した。パルス幅比率が 15, 17.5, 22 および 27% のとき、評価値 R は 10.7, 10.3, 10.9 および 8.7 であった。また、パルス周波数が 3, 5, 10 および 20 Hz のときは、評価値 R は 10.9, 7.4, 7.6 および 4.8 を示した。このようにパルス幅比率やパルス周波数がある範囲を超えて大きくなると評価値 R が低下するのはパルスによる衝撃効果が低下するためと考えられる。

Fig. 8 (a), (b) は図中の溶接条件でパルス電流が溶込み深さとビード幅に及ぼす影響である。パルス電流が増大すると溶接入熱量が大きくなるために溶込み深さ、ビード幅ともにほぼ直線的に増加する。Fig. 8 (b) で○印の 200 A のビード幅が 160 A の場合より小さい理由は、溶落ちが発生したために母材に入る有効溶接入熱量が低下したためである。

4. 結 論

真空環境でインバータ制御交流／直流両用ティグ溶接機を使用してアルミニウム合金の直流 GHTA 溶接、交流 GHTA 溶接および直流パルス GHTA 溶接実験を行い、次のことを明らかにした。

- 1) 直流 GHTA 溶接 (DCEN) によるメルトラン溶接では、溶融池表面の酸化膜が除去されないために溶融金属と母材表面に置かれた溶加材は十分に融合しない。
- 2) 市販ティグ溶接機による交流 GHTA 溶接では、電極プラス期間 (AC の EP) にアーク放電が消失するためにクリーニング現象が認められない。
- 3) 直流パルス GHTA 溶接では、溶融池表面の酸化膜はパルス電流時のアーク衝撃圧力によって機械的に粉砕除去される。その結果、溶融金属と母材上に置かれた溶加材は十分に融合する。
- 4) 直流パルス GHTA 溶接では、パルス電流が大きいほど酸化膜がよく除去される。パルス幅比率は 15～22%，パルス周波数は 3～10 Hz の範囲で酸化膜がよく除去される。
- 5) 溶込み深さとビード幅はパルス電流にほぼ比例して増大する。また、パルス周波数が変化しても溶込み深さはほぼ一定である。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金 (15560634) の助成により遂行された。また、財団法人南海育英会のご支援に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Y. Suita: Challenge to Space: Development of Space Arc Welding Process, Journal of High Temperature Society, 21-2 (1995), 33-42. (in Japanese)
- 2) Paton, B.E.: WELDING IN SPACE, Welding Engineer, 57-1 (1972), 25-29.
- 3) Dzhaniyev, V.A., Zagrebelny, A.A., Gavrish, S.S., Stesin, V.V., Shelyagin, V.D., Yurchenko, N.N., Markov, A.V.: Welding Equipment for Space Applications, Proc. Conf. Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by Welding, 1991, New Carrollton, USA, 49-58.
- 4) Schollhammer, F.R.: Electron Beam Welder for Space, Society of Aerospace Material and Process Engineers, Nov., 1963, 51.
- 5) Kaukler, W.F. and Workman, G.L.: Laser Welding in Space, Proc Conf. Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by Welding 1991, New Carrollton, USA, 318-334.
- 6) M. Nayama, T. Imada: Aircraft Experiment of the Fusion Welding under low-gravity, Prep. Nat. Meet. JWS, 48 (1991), 156-157. (in Japanese)
- 7) K. Nezaki, S. Kaihara, M. Kuribayashi, A. Tanji, K. Kawachi: Study on welding phenomena under micro-gravity, Prep. Nat. Meet. JWS, 54 (1994), 210-211. (in Japanese)
- 8) K. Nogi, Y. AOKI, H. FUJII, K. NAKATA: BEHAVIOR OF BUBBLES IN WELD UNDER MICROGRAVITY, Acta Materialia, 46-12 (1998), 4405-4413.
- 9) Y. SUITA, Y. TSUKUDA, T. TAKAGI, T. OHJI, K. MASUBUCHI: Study of Gas Tungsten Arc Welding in Space (1st Report), Welding Int., 8-4 (1994), 269-273.
- 10) Y. SUITA, Y. TSUKUDA, N. TERAJIMA, T. HATTA, T. KONO, R. INOKUMA, K. KAWATA, T. OHJI, H. NISHIKAWA, K. YOSHIDA, K. MASUBUCHI: Gas hollow tungsten arc welding experiments in aircraft-borne simulated space environment, Welding Int., 15-2 (2001), 100-107.
- 11) SUITA Y., SHOBako S., SATO J., KUROKAWA T., TAKAI D., TSUKUDA Y., TERAJIMA N., FUJISAWA S., OHJI T., MASUBUCHI K.: GHTA Welding Experiments in the Space Station Orbital Pressure, Quar. J. JWS, 21-1 (2003), 33-38. (in Japanese)
- 12) Y. SUITA, Y. TSUKUDA, N. TERAJIMA, H. TAKAHASHI, M. OGASAWARA, T. OHJI, K. MASUBUCHI: Welding aluminium alloy by hollow electrode TIG in a vacuum, Welding Int., 11-8 (1997), 605-614.