論文および報告

アルミニウム溶接金属の窒素含量および気孔*

小林 卓郎**桑 名 武**青 島 勇**

Nitrogen Content and Porosity of Aluminum Weld Metal*

by Takuro Kobayashi**, Takeshi Kuwana** and Isamu Aoshima**

Abstract

Effect of nitrogen partial pressures in the welding atmospheres of several gas mixtures on the nitrogen content of aluminum weld metals was systematically studied.

The important conclusions are as follows;

1. Aluminum weld metals absorb a large quantity of nitrogen in the welding atmospheres containing nitrogen.
2. The nitrogen contents of weld metals increase with increasing arc voltage and decrease with increasing welding current.
3. Anomalous nitrogen absorption by weld metal is observed at low atmospheric pressures.
4. The existence of an oxidizing gas in arc atmospheres does not contribute to the enhancement of nitrogen absorption by aluminum weld metals.

1. 緒 言

著者らは窒素ガスを含む雰囲気中で各種金属材料をアーク溶接した場合、溶接金属に吸収される窒素量を系統的に求めるため一連の研究を進めている^{1)~6)}。アルミニウムは窒化物形成元素として知られ、アーク溶接に際し、多量の窒素吸収が予想されるが、これに関する文献はほとんど見当たらない。

そこで本研究では工業用純アルミニウムを用い N_2 , N_2 -Ar, N_2 - O_2 , N_2 - CO_2 および N_2 - H_2 の5系の溶接雰囲気中でガス・メタル・アーク溶接を行ない雰囲気中の窒素分圧 (P_{N_2}) と溶接金属の窒素含量 (N 量) および気孔との関係を系統的に求めることにした。

2. 実験方法

2.1 試験材料

工業用純アルミニウム母材および電極線の化学組成を Table 1 に示す。母材の寸法は、 $150 \times 200 \times 10.8$ mm であり、電極線の径は 1.6 mmφ である。

これらの母材および電極線はあらかじめ CCl_4 で脱脂してから $50^\circ C$ の 5% NaOH 液に1分間浸し、水洗後、15% HNO_3 に3分間浸漬、水洗熱湯洗滌処理をしてのち $150^\circ C$ で1時間乾燥したものを使用した。

2.2 溶接雰囲気

溶接雰囲気は窒素雰囲気の場合 1 atm 以下の減圧雰囲気とし、混合ガスの場合は窒素分圧 (P_{N_2}) を 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 1.0 atm に変化させ、その全圧を 1 気圧 ($P_{N_2} + P_{Ar} = 1$ atm, $P_{N_2} + P_{O_2} = 1$ atm, $P_{N_2} + P_{CO_2} = 1$ atm, $P_{N_2} + P_{H_2} = 1$ atm) とした。

2.3 実験装置

使用溶接機は消耗電極型全自動溶接機で電源はセレン整流定電圧型のものである。この溶接機のヘッド部を内容積約 1.5 m³ で内部圧力 1×10^{-3} mmHg ~ 6 atm 保持可能な溶接雰囲気調整装置⁷⁾内に設置して、直流逆極性で溶接した。装置内に封入する各種ガスはすべてシリカゲルを通して脱水した。

2.4 実験操作

洗滌処理した試験片および電極線を雰囲気調整装置内に設置し、装置内を 1×10^{-2} mmHg 以下に排気したのち所定のガスを所定の圧力までシリカゲルを通して封入し、ガス・メタル・アーク溶接を行ない、ビード・オン・プレート試片を作成した。

窒素減圧雰囲気の場合の溶接条件はアーク電圧 20 V、溶接電流を 170 A, 240 A, 300 A とした。また窒素 1 atm の雰囲気の場合については溶接電流を 240 A とし、アーク電圧 15 V, 20 V, 25 V, 30 V, 35 V, 40 V と変化させて溶接した。混合ガス雰囲気の場合にはすべて

*原稿受付 昭和45年2月18日(44, 45年度春季全国大会にて発表)

**正 員 東北大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Tohoku University

Table 1 The chemical analyses of the materials used

	wt. %							
	Cu	Si	Fe	Mn	Zn	Al	N	H(ppm)
Base metal	0.03	0.10	0.29	0.009	—	Rest	tr	0.9
Electrode wire	0.058	0.20	0.51	0.01	0.04	Rest	tr	2.7

アーク電圧 20 V, 溶接電流 240 A とした。なおいずれの場合も走行速度は 50 cm/min., コンタクトチップの先端から試験片までの距離は 20 mm とした。溶接後外観検査および X 線透過検査をし, 気孔の発生状況を調べたのち, ビード表面をブラッシングして窒素分析を行なった。分析試料はビードの余盛の部分から採取し水蒸気蒸溜法により窒素を定量した。

3. 実験結果

3.1 溶接金属の窒素含量におよぼすアーク電圧の影響

1 atm の窒素雰囲気中で溶接電流 240 A, 走行速度を 50 cm/min としてアーク電圧を変化させて溶接を行なった場合のアーク電圧と溶接金属の窒素含量との関係を Fig. 1 に示す。これによると窒素含量 (N 量) はアーク電圧が高くなると, すなわちアーク長が長くなると著しく増加することが知られる。そこで 40 V, 240 A の場合の溶接部横断面について組織および硬さをしらべてみた。その結果を Fig. 2 および Photo. 1 に示す。Fig. 2 にはこのときのとけ込み状態を示す写真を添付しているが余盛の部分で高い硬度を示していることがわかる。余盛の部分には Photo. 1 に示されるように析出物が層状をなして生じているのが示される。この析出物

Fig. 1 Effect of arc voltage on the nitrogen content of aluminum weld metal.

Fig. 2 Hardness distribution in the transverse section of aluminum weld metal.

Photo. 1 Lamellar nitride in aluminum weld metal (unetched, $\times 100$)

を X 線ディフラクトメーターで回折した結果 AlN の窒化物であることが知られた。このような層状をなした窒化物は 20 V 前後のアーク電圧の場合にはほとんど観察されなかった。アーク電圧の高い範囲では余盛の部分がこのような窒化物の存在のため N 量が非常に高くなりまた窒化物の存在により硬度が高くなったものと考えられる。

とくに 20 V をこえるとこれらの影響が顕著にあらわれるように判断されたので、他の条件によって多少の変化は予想されるが、以後の実験ではアーク電圧をすべて 20 V 一定とすることにした。

3.2 溶接金属の窒素含量におよぼす雰囲気気ガスの影響

3.2.1 窒素雰囲気 ($P_{\text{N}_2} \leq 1 \text{ atm}$) の場合

Fig. 3 はアーク電圧を 20 V とし、溶接電流を 170 A, 240 A, 300 A と変化させて、1 atm 以下の窒素雰囲気中で溶接した場合の溶接電流および窒素圧 (P_{N_2}) と溶接金属の窒素含量 (N 量) との関係を示したものである。 P_{N_2} の高い範囲では溶接電流が増加すると N 量が減少している。溶接電流の増加により N 量が減少する傾向は軟鋼¹⁾、ステンレス鋼²⁾ およびチタン⁵⁾ などの溶接の場合とも一致している。溶接電流が高くなると電極線の溶融速度が大きくなりアーク中の溶滴移行速度も大きくなること、入熱量が増加するため冷却速度が減少し、吸収ガスの逸出が容易になることなどによるものと考えられる。

Fig. 3 Effect of the welding current and the pressure of nitrogen welding atmosphere on the nitrogen content of aluminum weld metal.

P_{N_2} の低い範囲で N 量の異常吸収があらわれたが、これも軟鋼、ステンレス鋼、チタンの場合と同様な現象である。なお 170 A の場合 $P_{\text{N}_2} = 1 \text{ atm}$ では溶接は困難であった。

アーク電圧 20 V, 溶接電流 240 A で窒素雰囲気中で

溶接した場合の窒素圧と気孔発生状況およびけ込み状況を Photo. 2 および Photo. 3 にそれぞれ示す。 P_{N_2} の低い範囲では大きな気孔が多数発生しているのが観察される。

Photo. 3 によると P_{N_2} が 0.4~1 atm の範囲ではとけ込みが裏面まで達しているのが観察される。この範囲では電極端が板面より内部につつまみその底でアークが発生していることが観察された。したがって、このような場合にはアーク周辺はアルミニウム蒸気の分圧が高くなり、溶接雰囲気中の P_{N_2} が増大しても N 量にはほとんど影響をあたえなかったものと考えられる。 P_{N_2} が 0.15 atm 以下では大きなビードとなり、母材との稀釈の割合も少なくなる。このことが P_{N_2} の低い範囲で N 量が異常に高くなる一つの原因と考えられる。

3.2.2 N_2 -Ar 雰囲気 ($P_{\text{N}_2} + P_{\text{Ar}} = 1 \text{ atm}$) の場合

N_2 -Ar 混合ガス雰囲気中でアーク電圧 20 V, 溶接電流 240 A の条件で溶接した場合の P_{N_2} と溶接金属の N 量との関係を Fig. 4 に示す。 P_{N_2} が増加するにつれ N 量が増加する傾向は軟鋼やチタンの場合と同じであるが、増加の傾向はやや異なった様子を示している。

20V—240A ($P_{\text{N}_2} \leq 1 \text{ atm}$)

Photo. 2 Radiographs of Al welds deposited in a nitrogen welding atmosphere.

20V—240A ($P_{N_2} \leq 1$ atm)

Photo. 3 Transverse macro-sections of bead-on-plate specimens made in a nitrogen welding atmosphere.

Photo. 4 はこの系における溶接部の気孔発生状況を X線透過写真で示したものである。 $P_{N_2}=0 \sim 0.8$ atm ($P_{Ar}=1 \sim 0.2$ atm) の範囲では気孔の発生状況にあま

20V—240A ($P_{N_2} + P_{Ar} = 1$ atm)

Photo. 4 Radiographs of Al welds deposited in N_2 -Ar gas mixture welding atmospheres.

Fig. 4 The relation between the nitrogen content of aluminum weld metal and the partial pressure of nitrogen in a N_2 -Ar atmosphere.

り変化が見られず全般に気孔は少ないようである。

3. 2. 3 N_2 - O_2 雰囲気 ($P_{N_2} + P_{O_2} = 1$ atm) の場合
 N_2 - O_2 混合ガス雰囲気中で溶接した場合の P_{N_2} と溶接金属の N 量との関係を Fig. 5 に示す。 P_{N_2} が増加するにしたがい N 量は一様に増加することがわかる。なお、 $P_{N_2} < 0.4$ atm の範囲では満足な溶接ができなかった。軟鋼およびステンレス鋼の N_2 - O_2 雰囲気中における溶接の場合には雰囲気中に酸素が存在すると溶接金

Fig. 5 The relation between the nitrogen content of aluminum weld metal and the partial pressure of nitrogen in a N_2 - O_2 atmosphere.

Fig. 6 The relation between the nitrogen content of aluminum weld metal and the partial pressure of nitrogen in a N_2 - CO_2 atmosphere.

20V-240A ($P_{N_2} + P_{O_2} = 1$ atm)

Photo. 5 Radiographs of Al welds deposited in N_2 - O_2 gas mixture welding atmospheres.

20V-240A ($P_{N_2} + P_{CO_2} = 1$ atm)

Photo. 6 Radiographs of Al welds deposited in N_2 - CO_2 gas mixture welding atmospheres.

属の N 量が異常に増大する傾向が認められたが¹⁾⁻³⁾、アルミニウムの場合には、チタンの場合⁵⁾と同様そのような傾向は認められなかった。これはアルミニウムが雰囲気中の酸素と容易に反応するため、熔融状態のアルミニウム表面に急速に酸化膜が生成され、窒素吸収をむしろ遅らせることが予想されること、および軟鋼などの場合に考えられる NO 形成を介しての窒素吸収がアルミニウムあるいはチタンの場合おこらないことによるものであろう。

Photo. 5 はこの系における気孔の発生状況を X 線透過写真で観察した結果である。全域にわたって多数の気孔が発生していることがわかる。

3. 2. 4 N_2 - CO_2 雰囲気 ($P_{N_2} + P_{CO_2} = 1$ atm) の場合
 N_2 - CO_2 混合ガス雰囲気中で溶接した場合の P_{N_2} と溶接金属の N 量との関係を Fig. 6 に示す。 N_2 - O_2 系

雰囲気の場合にくらべ窒素含量が全般的にやや低くなっていることがわかる。このことはアーク下で $CO_2 \rightarrow CO + \frac{1}{2}O_2$ の反応がおり、 N_2 - O_2 雰囲気の場合の見掛け上の同一窒素分圧の場合にくらべ、実質的にアーク周辺の窒素分圧が下がることにもよるのではないかと考えられる。

この系での溶接金属の気孔発生状況を Photo. 6 に示す。全域にわたって気孔は多数発生している。

3. 2. 5 N_2 - H_2 雰囲気 ($P_{N_2} + P_{H_2} = 1$ atm) の場合
 N_2 - H_2 混合ガス雰囲気中で溶接した場合の P_{N_2} と溶接金属の N 量との関係を Fig. 7 に示す。 P_{N_2} が高くなると N 量は次第に増加する傾向にあり、 $P_{N_2} = 0.8$ atm 以上になると、増加の度合は大きくなっている。本系の場合、他のガス系雰囲気の場合に比較して、最も

Fig. 7 The relation between the nitrogen content of aluminum weld metal and the partial pressure of nitrogen in a N_2 - H_2 atmosphere.

20V—240A ($P_{N_2} + P_{H_2} = 1$ atm)

Photo. 7 Radiographs of Al welds deposited in N_2 - H_2 gas mixture welding atmospheres.

低い N 量を示している。この理由は詳しくは不明であるが、後述の Fig. 9 で示すように本雰囲気の場合、他のガス系雰囲気にくらべ電極線の送給速度が大きくなることおよびアーク長が短くなることが一因であろうと考えられる。このことはチタンの場合と類似した傾向である。この系での溶接ではスパッタが多く生成されるが、ほとんど付着せず球形の状態でビード周辺に飛散した。なお P_{N_2} の低い範囲では満足な溶接は不可能であった。

Photo. 7 にこの系での気孔発生状況を示す。気孔が他のガス系の場合にくらべ、こまかく多数発生しているのがわかる。

3.2.6 各種混合ガス系についてのまとめ

アーク電圧 20 V, 溶接電流 240 A, 走行速度 50 cm/min. の条件の場合における各種ガス系の雰囲気中の P_{N_2}

と溶接金属の N 量との関係を Fig. 8 に示す。これによると、雰囲気中に O_2 , CO_2 , H_2 が存在すると溶接金属中の N 量はかなり減少することが一見してわかる。

軟鋼やステンレス鋼の場合と様相が異なり、チタンの場合とやや似た傾向を示していることがわかるであろう。

1)–3), 5)

Fig. 8 Summary of the relation between the nitrogen content of aluminum weld metal and the partial pressure of nitrogen in various welding atmospheres.

3.3 溶接雰囲気と電極線の送給速度

アーク電圧 20 V, 溶接電流 240 A, 走行速度 50 cm/min. の条件での各種雰囲気における P_{N_2} と電極線送給速度との関係を Fig. 9 に示す。これより、他のガス系の場合に比較して、 N_2 - H_2 系における送給速度が著るしく高くなることが知られる。このことはチタン溶接⁵⁾の場合にも認められた現象であるが、その理由の詳細は明らかでない。

一般に逆極性でのガス・メタル・アーク溶接では雰囲気ガスの種類は電極線の溶融速度に影響をおよぼさないとされている⁷⁾が、アルミニウムおよびチタンの溶接で

Fig. 9 The wire feed rates in various welding atmospheres.

水素が顕著な影響をあたえることは興味ある現象と考えられる。さらに Fig. 9 から N_2-O_2 , N_2-CO_2 系のごとく含窒素酸化性雰囲気の場合は N_2 , N_2-Ar 系の場合より溶融速度が小さくなるといえそうである。また窒素雰囲気の場合に認められるように、溶接雰囲気圧が低くなると ($P_{N_2} < 0.2$ atm) 電極線の溶融速度が大きくなっている。

4. 結 論

溶接雰囲気調整装置を使用して、工業用純アルミニウムを種々の雰囲気中で溶接し、溶接金属の窒素含量 (N 量) を測定した。また気孔の発生状況を観察し、次のような結果を得た。

- 1) 1 atm の窒素雰囲気中で溶接した場合、アーク電圧を高くすると溶接金属の N 量は著しく増加する。
- 2) 窒素雰囲気 ($P_{N_2} \leq 1$ atm) で溶接した場合、溶接金属の N 量は他の混合雰囲気の場合に比して多量存在し、溶接電流が高くなると、溶接金属の N 量は減少する。また雰囲気圧が低圧の場合窒素の異常吸収が認められる。
- 3) N_2-Ar 雰囲気 ($P_{N_2} + P_{Ar} = 1$ atm) の場合、溶接金属の N 量は P_{N_2} の増加とともに一様に増加するが、 P_{N_2} が 0.4 atm をこえると、増加の傾向は鈍化する。
- 4) N_2-O_2 および N_2-CO_2 雰囲気 ($P_{N_2} + P_{O_2} = 1$ atm および $P_{N_2} + P_{CO_2} = 1$ atm) の場合のように雰囲気中に酸化性ガスが存在する場合には、軟鋼およ

びステンレス鋼の場合のような N 量の変化を示さず、チタンの場合と同様 P_{N_2} の増加とともに単調に増加する傾向を示す。

- 5) N_2-H_2 雰囲気 ($P_{N_2} + P_{H_2} = 1$ atm) の場合、溶接金属の N 量は他のガス系の場合にくらべ最も低い値を示す。
- 6) 気孔の発生は N_2-Ar 雰囲気 ($P_{N_2} + P_{Ar} = 1$ atm) の場合が最も少ない。
- 7) 逆極性での溶接にもかかわらず溶接雰囲気により電極線の送給速度の変化が認められた。特に N_2-H_2 雰囲気 ($P_{N_2} + P_{H_2} = 1$ atm) の場合最も送給速度が大きくなることが知られた。

参 考 文 献

- 1) 小林卓郎, 桑名 武, 菊地靖志, “軟鋼溶接金属の窒素含量および気孔”, 溶接学会誌, Vol. 35 (1966) No. 3, 237~245.
- 2) 小林卓郎, 桑名 武, 菊地靖志, “ステンレス鋼溶接金属の窒素含量および気孔”, 溶接学会誌, Vol. 35 (1966) No. 4, 330~338.
- 3) T. Kobayashi, T. Kuwana and Y. Kikuchi “Arc Atmosphere and Nitrogen Content of Weld Metal”, *Welding in the World*, Vol. 5 (1967) No. 2, 58~72.
- 4) 小林卓郎, 桑名 武, 木口立面, “溶接金属の窒素含量におよぼす電極鋼線中の Ti, Zr および Al の影響”, 溶接学会誌, Vol. 37 (1968), No. 2, 171~180.
- 5) 小林卓郎, 桑名 武, 二戸信明, “チタン溶接金属の窒素含量および気孔”, 溶接学会誌, Vol. 38 (1969) No. 11, 1249~1256.
- 6) T. Kobayashi, T. Kuwana, Y. Kikuchi and R. Kiguchi “The Effect of Alloying Elements on the Nitrogen Content of Steel Welds”. Paton 生誕100年記念シンポジウム提出論文 (1970).
- 7) A. Lesnewich “Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding”, *Welding J.*, Vol. 37 (1958), No. 8, 343-s~353-s.