5) 冷却速度が大きくなるほど母材と溶接金属の硬さが増大するが、変点は母材の A_{1r} 点が低下する以外あまり変化しない。

終わりに、本研究に御協力いただいた日立製作所 日立工場の小山高一、米村秀雄、及び矢田良男各氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 火力発電技術協会：電気工作物の溶接の技術基準，昭和45年，p. 29～81
- 2) 浅尾，梅原他4名：曲げ加工の基本特性の解明，昭和57年度秋季塑性加工連合講演会論文集，昭和57年11月，p. 571～574
- 3) 本井，田村，平戸，大沼：高周波誘導加熱曲げによる小半径曲げ管の諸性質，石橋技報，昭和55年1月，Vol. 20, No. 1, p. 41～45

アーク溶接過程における鉄溶接金属の酸素吸収と酸化物系介在物について

桑 名 武**，佐 藤 嘉 洋**

Oxygen Absorption and Oxide Inclusion of Iron Weld Metal during Arc Welding

by Takeshi Kuwana** and Yoshihiro Sato**

Pure iron plates were welded using pure iron electrode wire in a controlled arc atmosphere. Effects of the oxidizing gas partial pressure in the welding atmospheres of Ar- O_2 and Ar- CO_2 gas mixture and welding conditions on the oxygen contents and the nonmetallic inclusions of the iron weld metals were systematically studied.

The results are as follows:

1. The mean temperature of the iron weld pool is about 1910 K.
2. The oxygen contents and the inclusions of the iron weld metals decrease with increasing the welding current and increase with increasing the arc voltage.
3. The oxygen contents and the inclusions of the iron weld metals decrease slightly with increasing the traveling speed.
4. In Ar- O_2 welding atmosphere, the oxygen contents and the inclusions of the iron weld metals increase with increasing the oxygen partial pressure, but the oxygen contents become constant value at about 0.26 wt.% in high oxygen partial pressure atmosphere. In Ar- CO_2 welding atmosphere, the oxygen contents and the inclusions of the iron weld metals increase with increasing the carbon dioxide partial pressure. The oxide inclusions are seemed to be FeO.
5. Behavior of the oxygen absorption into the iron weld metal is discussed using thermodynamic data.

Key Words: Arc welding, Welding atmosphere, Pure iron weld metal, Oxygen absorption, Oxide inclusion, Chemical reaction.

1. 緒 言

鋼溶接金属に吸収された酸素は、気孔^{1,2)}や非金属介在物などの溶接欠陥の原因となることから、その低減化が計られてきた。また近年、鋼溶接金属の酸素は溶接金属組織に影響をおよぼし、微量の酸素量の変化が溶接金属の靱性改善に大きな役割を持つことが知られてきた³⁻⁶⁾。このため溶接金属の酸素量および介在物を制御調整することが重要な課題となっている。しかし、溶接金属の酸素吸収挙動および介在物についての研究は比較的少ない。

著者らは、前報^{7,8)}においてアーク溶接過程の鉄溶接金属の酸素吸収について報告した。本研究はこれに引き続き、鉄溶接金属の酸素吸収と酸化物系介在物との関係について基礎的資料を得ることを目的としている。すなわち、最も基本的な材料として純鉄に近い組成の試験片および電極線を用いて、酸化性ガス雰囲気中でアーク溶接を行い、鉄溶接金属の酸素吸収挙動を調べた後、この

場合の介在物について検討することにより、鉄溶接金属の酸素吸収機構について考察を行ったものである。

2. 実 験 方 法

溶接は、内容積が約 1.5 m³ の容器内に消耗電極型自動溶接機のヘッド部を設置した溶接雰囲気調整装置内で行った。

試験片および電極線は、本実験のために特別に作製したものである。いずれも純鉄に近い成分である。供試材の化学組成を Table 1 に示す。なお、試験片の寸法は 150×50×12 mm であり、電極線直径は 1.6 mm である。

供試材の表面酸化物などを除去した後装置内にセット

Table 1 Chemical compositions of base metal and electrode wire.

	C	Si	Mn	P	S	Al	O
Base metal	<0.004	<0.007	<0.006	<0.003	<0.005	<0.003	0.008~0.009
Electrode wire	0.008	0.017	0.028	0.005	0.006	0.001	0.007

*原稿受付 昭和61年8月2日 昭和61年度春季全国大会で発表

**正 員 東北大学 Member, Tohoku University

し、装置内部を 10 Pa 以下に排気後、各ガスを所定の圧力に封入しビード・オン・プレート溶接を行った。

溶接極性は電極線が陽極であり、コンタクトチップ先端から試験片表面までの距離は 20 mm である。溶接雰囲気は Ar-O₂ および Ar-CO₂ 混合ガス雰囲気であり、全圧は 0.1 MPa とした。

溶接終了後、外観および X 線透過検査により気孔の有無を調べた。溶接金属の酸素量はアルゴン気流中溶融電量測定法を用いて定量した。また、溶接線方向に垂直な断面を研磨し、光学顕微鏡を用いて溶接金属の介在物を観察するとともに画像解析装置により介在物の面積分率などを定量的に測定した。この場合、溶接金属内の介在物の分布などに大きな偏りは見られなかったので、以後各試料の中央部を検査面とした。なお、介在物成分の検討を行うために X 線マイクロアナライザーを用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 溶融池温度

実験に先立ち、直径 0.09 mm の Pt-40 Rh-Pt-20 Rh 熱電対により溶融池温度を測定したところ、その温度は 1860~1960 K 程度であった。これより本実験の溶融池平均温度は 1910 K 程度と考えられる。

3.2 鉄溶接金属の酸素量

Ar-O₂ および Ar-CO₂ 雰囲気において、酸素分圧 (P_{O₂}) 0.005 MPa および CO₂ 分圧 (P_{CO₂}) を 0.003 MPa として溶接を行った。この場合の溶接電流と溶接金属の酸素量 (%O) の関係を Fig. 1 に示す。Ar-O₂ および Ar-CO₂ 雰囲気において、溶接電流の増加とともに溶接金属の酸素量は減少することがわかる。

Fig. 2 にアーク電圧と溶接金属の酸素量の関係を示す。両溶接雰囲気において、アーク電圧の増加とともに溶接金属の酸素量は増加することがわかる。

走行速度と溶接金属の酸素量の関係を Fig. 3 に示す。Ar-O₂ 雰囲気の場合には、走行速度の増加とともに酸素量はやや減少する傾向を示す。一方 Ar-CO₂ 雰囲気では、

Fig. 1 Relation between the oxygen content of the iron weld metal and the welding current.

Fig. 2 Relation between the oxygen content of the iron weld metal and the arc voltage.

Fig. 3 Relation between the oxygen content of the iron weld metal and the traveling speed.

は、酸素量が低く走行速度による変化はあまり見られない。

溶接条件により溶接金属の酸素量が変化する理由については、著者らの以前の報告^{7,8)}で考察されている。

■溶接雰囲気の酸素分圧 (P_{O₂}) を 0~0.03 MPa および CO₂ 分圧 (P_{CO₂}) を 0~0.006 MPa の範囲で溶接した場合の溶接金属の酸素量を Fig. 4 に示す。

Ar-O₂ 雰囲気の場合には、酸素分圧が 0.01 MPa 程度まで酸素量は増加するが、それ以上高い範囲では一定の値を示すことがわかる。この酸素量は、約 0.26 wt. % である。Ar-O₂ 雰囲気の場合には、溶接金属に気孔は認められなかった。一方、Ar-CO₂ 雰囲気では、CO₂ 分圧

Fig. 4 Relation between the oxygen content of the iron weld metal and the oxygen partial pressure and the carbon dioxide partial pressure.

の増加とともに酸素量は増加し Ar-O₂ 雰囲気の場合と同様な挙動を示しているが、酸素量は低いことがわかる。なお、CO₂ 分圧が高い範囲では溶接金属に多数の気孔が発生し、酸素量を定量することが不可能となる。本溶接条件の場合に健全な溶接金属が得られるのは、CO₂ 分圧が 0~0.006 MPa の範囲であった。

3.3 鉄溶接金属の介在物について

3.2 で酸素量を示した溶接金属について介在物の観察

Fig. 5 Nonmetallic inclusion in the iron weld metal.

(a) Ar-O₂ $P_{O_2}=0.005$ MPa

(b) Ar-CO₂ $P_{CO_2}=0.003$ MPa

Fig. 6 Histogram of inclusion sizes associated with the welding current in Ar-O₂ welding atmosphere.

ならびに定量的測定を行った。

溶接電流を変化させて溶接金属の介在物を観察した結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a) は Ar-O₂ 雰囲気の結果であり、Fig. 5(b) は Ar-CO₂ 雰囲気の結果である。Ar-O₂ 雰囲気の場合に比べ、Ar-CO₂ 雰囲気の場合の介在物量はいずれの溶接電流においても少ないが、両雰囲気とも溶接電流の変化にともなう介在物の変化の傾向は似ており溶接電流が低いほど小さな介在物が多数観察されるように見える。また、介在物粒子は、ほとんどが球形に近い粒子として観察される。これより、介在物粒子の分布を各溶接電流について調べた結果を Fig. 6 に示す。なお、これは Ar-O₂ 雰囲気の結果である。溶接電流が 150 A

Fig. 7 Relation between the fractional area of the inclusion and the welding current.

の場合には、直径 $1\mu\text{m}$ 以下の小さな介在物が多数存在するが、溶接電流の増加とともに、介在物の個数は減少し、粒子径は増大することがわかる。溶接電流が高い場合には介在物は比較的大きな粒子に成長することから、溶融金属量が増加するために溶融池が凝固するまでの時間が低溶接電流の場合に比べて長かったことが考えられる。次に、溶接電流と介在物の面積分率の関係を Fig. 7 に示す。両雰囲気において、溶接電流の増加とともに介在物の面積分率は減少することがわかる。これは、溶接金属の酸素量 (Fig. 1 参照) の変化と似ていることから、介在物の数や大きさは、溶接金属の熱的履歴により異なるが、面積分率は酸素量に対応して変化していると考えられる。

Fig. 8 に Ar- O_2 雰囲気中でアーク電圧を変化させた場合の介在物粒子の分布を示す。アーク電圧の変化により介在物粒子数は大きく変化しないが、アーク電圧が高い場合には、粒子径はやや増大する傾向を示すことがわか

Fig. 8 Histogram of inclusion sizes associated with the arc voltage in Ar- O_2 welding atmosphere.

Fig. 9 Relation between the fractional area of the inclusion and the arc voltage.

Fig. 10 Histogram of inclusion sizes associated with the traveling speed in Ar- O_2 welding atmosphere.

る。この場合のアーク電圧と介在物面積分率の関係を Fig. 9 に示す。面積分率は、アーク電圧の増加とともに増加しており、酸素量と同様な変化をしている。

Fig. 10 は、Ar- O_2 雰囲気中で走行速度を変化させた場合の介在物の分布を示したものである。走行速度が遅い場合には $1\mu\text{m}$ 以下の粒子の個数は減少し、比較的大きな粒子が増加していることがわかる。また、粒子数は走行速度が遅くなるとやや減少する傾向がある。走行速度が遅くなると、溶融池が凝固するまでの時間が長くなり介在物粒子同士の結合などが進行するために粒子数はやや減少し粒子径は増大すると考えられる。Fig. 11 に走行速度と介在物面積分率の関係を示す。この場合にも溶接金属の酸素量に対応した変化をすることがわかる。

Fig. 12 に、酸素分圧を変化させた場合の溶接金属の介在物の光学顕微鏡観察結果を示す。酸素分圧が 0 MPa では介在物はほとんど観察されないが、酸素分圧が

Fig. 11 Relation between the fractional area of the inclusion and the traveling speed.

Fig. 12 Nonmetallic inclusion in the iron weld metal at the welding current of 250A, the arc voltage of 25V and the traveling speed of 20 cm/min in Ar-O₂ welding atmosphere.

増加し溶接金属の酸素量が増加すると、介在物量は増加しており粒子径および粒子数も増加していることがわかる。溶接雰囲気酸化性ガス分圧と溶接金属の介在物の面積分率の関係を Fig. 13 に示す。Ar-O₂ 雰囲気の場合には、酸素分圧が 0.01 MPa 程度まで面積分率は増加し

Fig. 13 Relation between the fractional area of the inclusion and the oxygen partial pressure and the carbon dioxide partial pressure in Ar-O₂ and Ar-CO₂ welding atmospheres.

Fig. 14 Relation between the fractional area of the inclusion and the oxygen content of the iron weld metal in Ar-O₂ welding atmosphere.

ており、それ以上ではほぼ一定になることがわかる。Ar-CO₂ 雰囲気では、CO₂ 分圧の増加とともに面積分率は増加している。このように、溶接金属で観察される介在物量は溶接金属の酸素量と溶接に関連していることがわかる。

本実験で得られたすべての溶接金属について、酸素量と介在物量の関係を調べた結果を Fig. 14 に示す。酸素量と介在物量はよく対応しており、溶接雰囲気に無関係に同一直線上にあることがわかる。これは、溶接金属で観察される介在物が、溶接条件あるいは溶接雰囲気が異なっても、ほぼ同様な組成の粒子であることを示すと考えられる。Fig. 15 は Ar-O₂ 雰囲気得られた試料の介在物を X 線マイクロアナライザーで分析した結果の一例を示したものである。介在物を横切る線は電子線が通過した跡であり、介在物内で鉄は減少し、酸素は増加していることがわかる。これをもとに成分を計算すると、介在物は FeO に近い組成を持つ粒子であることが知られる。これより、本実験の溶接金属の介在物粒子は、この組成に近い酸化物であると考えられる。

3.4 鉄溶接金属の酸素吸収および介在物について

Fe-O 系状態図によれば、固体鉄に酸素はほとんど固溶しないが、溶鉄にはかなりの酸素が溶解することがわかる。溶鉄中の酸素に関して、平衡状態では次式が成立する。

$$\log K' (= \log (\% \text{O}) / a_{\text{FeO}}) = -6320/T + 2.734 \quad (1 \cdot b)^9$$

$$\log K' (= \log (\% \text{O}) / P_{\text{O}_2}^{1/2}) = 6104/T + 0.12 \quad (2 \cdot b)^{10}$$

ここで a_{FeO} : 鉄酸化物の活量

P_{O_2} : 酸素分圧 (atm)

上式 (1・b) および (2・b) より、1873 K において溶

Inclusions	Compositions (wt.%)	
	FeO	others
Particle 1	99.6	0.4
Particle 2	99.0	1.0

Fig. 15 The example of analysis of inclusion by electron probe X-ray microanalyzer.

鉄から FeO が晶出し始める O は約 0.23 wt. % であり、その時平衡する P_{O_2} はおよそ 1 mPa (10^{-8} atm) と非常に低いことがわかる。したがって本実験での P_{O_2} 範囲で溶鉄は融点 (1809 K) 以上の反応温度での平衡値まで酸素を吸収する可能性があることになる。3.1 で述べたように、溶融池平均温度は 1910 K 程度である。また溶接金属の介在物は FeO に近い組成の氧化物粒子であった。これらのことより、アーク溶接過程での酸素吸収挙動を考察してみる。

前述のごとく平衡状態では、本実験のような高い P_{O_2} ($\sim 0.03 \text{ MPa}$) のもとでは、溶鉄は溶融池温度に対応する酸素を吸収し、Fig. 16(a) に示すように O は一定値となるはずである。ところが実際の溶接過程では、 Ar-O_2 雰囲気の場合、 P_{O_2} が比較的低い範囲で酸素量および介在物量は P_{O_2} の増加とともに増加し、 P_{O_2} が比較的高い場合に一定値を示すことが知られた。Fig. 16(b) は溶接金属の酸素量の変化を示したもので一定値は約 0.26 wt. % である。Fig. 17 は溶接過程の酸素吸収挙動を示したものである。この図において、中央の斜めの曲線は (1・a, b) において $a_{\text{FeO}}=1$ とした場合の酸素溶解度を示してお

Fig. 16 Relation between the oxygen content of the iron weld metal and the oxygen partial pressure in Ar-O_2 welding atmosphere.

(a) equilibrium state
(b) welding process

り、この曲線よりも高酸素側すなわち横線を施した領域では鉄氧化物 (FeO) が晶出する範囲である。矢印は溶融池平均温度 (1910 K) における溶融池の O 量の変化を示しており、A は溶融池でののはじめの O 量であり、B は酸素吸収反応後の O 量を示している。Fig. 17(a) に示すように P_{O_2} が低い範囲では、気相中の酸素ポテンシャルが低く、また溶接金属の溶融時間が短いため溶接金属は O を吸収できる余地を残して凝固したと考えられる。Fig. 17(b) に示すように P_{O_2} が比較的高い範囲では溶融池での酸素吸収は十分進行し、溶解度に近い酸素を吸収し、 P_{O_2} に関係なく一定値を示したと考えられる。

また、固体鉄に酸素はほとんど固溶しないために、溶接金属に吸収された酸素は凝固後に非金属介在物を生成して溶接金属に存在する。平衡論による反応生成物は

Fig. 17 Schematic illustrations of the oxygen absorption into the iron weld metal at 1910 K. A: initial oxygen content of weld metal. B: final oxygen content of weld metal.

(a) low P_{O_2} (b) high P_{O_2}

$FeO^{9)}$ であり、溶接金属の介在物も FeO に近い組成の酸化物であった。溶接金属の介在物が反応生成物に近いと考えるならば、溶接過程において本実験のように純鉄を用いる場合には、介在物は平衡論的挙動に従い FeO に近い組成となり、その量は酸素量に対応すると考えられる。

4. 結 論

純鉄に近い組成の試験片および電極線を用いて、Ar-

O_2 および Ar- CO_2 雰囲気でアーク溶接を行い、鉄溶接金属の酸素吸収挙動ならびに介在物について調べ、次のような結果を得た。

- (1) 溶融池の平均温度は、約 1910 K であると考えられる。
- (2) 両雰囲気において、溶接電流の増加とともに溶接金属の酸素量は減少し、介在物量も減少する。
- (3) アーク電圧の増加とともに酸素量および介在物量は増加する。
- (4) 走行速度の増加とともに酸素量および介在物量はやや減少する傾向を示した。
- (5) Ar- O_2 雰囲気において、酸素分圧 (P_{O_2}) が低い範囲では P_{O_2} の増加とともに酸素量および介在物量は増加するが、 P_{O_2} がある分圧以上になるとこれらは一定値を示す。Ar- CO_2 雰囲気において、 CO_2 分圧 (P_{CO_2}) の増加とともに酸素量および介在物量は増加するが、Ar- O_2 雰囲気の場合と比べるとこれらは少ない。
- (6) 溶接金属に観察される介在物は球状であり、 FeO に近い成分である。また、介在物の面積分率は酸素量とよく対応する。
- (7) 溶接金属の酸素吸収および介在物について、物理化学的立場から考察した。

終わりに臨み、本実験遂行のために協力をいただいた東北大学工学部本田 明技官ならび酒井一夫、高橋信之および伊奈正樹各工学士に対し深く感謝いたします。なお、本研究は文部省科学研究費補助金によるものであることを記し、感謝を表します。

参 考 文 献

- 1) 益本功, 篠田剛; 溶接金属の気孔について, 溶接学会誌, 39-10 (1970), 1075-1083.
- 2) 益本功, 篠田剛; 溶接金属の気孔について (第2報), 溶接学会誌, 41-7 (1972), 801-810.
- 3) P. R. Kirkwood; Microstructure and toughness control in low carbon weld metal, Met. Const., 10-5 (1978), 260-264.
- 4) 渡邊之, 小島敏文; 靱性におよぼす Ti, B および酸素の影響, 溶接学会誌, 49-11 (1980), 772-780.
- 5) 渡邊之, 小島敏文; 組織微細におよぼす B の役割, 溶接学会誌, 50-7 (1981), 702-709.
- 6) Yoshinori Ito, Mutsuo Nakanishi and Yu-ichi Komizo; Effect of oxygen on low carbon steel weld metal, Met. Const., 14-9 (1982), 472-478.
- 7) 桑名武, 佐藤嘉洋; Ar- O_2 雰囲気における鉄溶接金属の酸素吸収について, 溶接学会誌, 52-3 (1983), 292-298.
- 8) 桑名武, 佐藤嘉洋; Ar- CO_2 雰囲気における鉄溶接金属の酸素吸収について, 溶接学会論文集, 1-1 (1983), 16-21.
- 9) C. R. Taylor and J. Chipmann; Equilibria of Liquid Iron and Simple Basic Slags in a Rotating Induction Furnace, Trans. AIME, 154 (1943), 228-247.
- 10) J. Chipman; Basic Open Hearth Steelmaking, AIME, (1951), 638.