拡散する電流場の電磁力による対流と溶込み*

石崎 敬三**, 岡田 恒男***, 横谷真一郎***

Convection and Penetration due to Electro-Magnetic Force in Diverging Current Field*

by Keizo Ishizaki**, Tsuneo Okada*** and Shinichiro Yokoya***

Electro-magnetic flow pressure in the mercury pool was tested in various containers and conditions. The total pressure P along the center line was measured by the Pitot tube at the distance z from electrode tip. Obtained results showed that P increased proportionally to $(I/D)^2$ at the fixed z , and $P/(I/D)^2 = a - bz$, a and b are dependent on the test container, especially current flow pattern. Low temperature fusible metal (Wood's metal) was melted by the soldering iron of various shape of copper rod, through which heat and current were applied on the metal. The width/depth ratio of penetration was nearly 2 at zero current, while it increased considerably with increase in time and $(I/D)^2$ values. Cause of axial force acting on the pendent drop in welding was considered. It is the dynamic pressure due to electro-magnetic pressure difference in diverging currentfield.

Key Words: arc welding, penetration, convection, electro-magnetic force, pressure

1. 結 言

電磁力による溶融池内の対流は、古くから認められているが、これについての実験的研究は少ない。

Kublanov ら¹⁾は径100 mmの放物線回転体の容器中のGa浴に20 mm径の銅電極を差し込み、400 Aの電流を流したときの流速分布を測定し、最大値12 cm/secを得ている。著者らは銅電極に通電して、広い条件で軸線上の水銀中ピトー管圧力を測定し、また電流と熱による易融合金の溶込み形状を求めた。拡散する電流の電磁力による電磁圧力と、これによって生じる対流について考察し、溶融池における電磁対流の性質を明らかにした。

2. 水銀中の電磁力対流

2.1 電極先端形状の影響

50 d×20 hの鉄容器に水銀を差し込み、円錐形の底の孔に連結したU字管により圧力を測定した。電極は溶接棒を用いその先端を30°, 90°, 半円に削った。棒側面の被覆は絶縁になる。結果はFig. 1に示すように、圧力は電流 I に比例し、電極径 D に反比例する。また先端形状が、30°円錐、90°円錐、半円の順に低くなった。

2.2 水銀中の電磁力対流圧力の測定

Fig. 2に示したS2, S3; 直径20, 30 mmの半球状の容器中では、3~10 mmDの電極を上から1 mm浸漬し、またC; 直径50 mmの円筒状の浴では、絶縁した底板を下から貫通する電極を通じて、50~300 Aの電流 I を流し、電極面から1~4 mmの距離 Z における全圧 P を水銀柱の変位により測定した。ピトー管は内径1.7外径2.1 mmのステンレスで、先端および側面に0.5 mmの孔がある。Fig. 3はS型、図中に書き入れた条件で、Fig. 4はC型、 D は4, 5, 6 mm, I は100, 200, 300 Aで実験した。 P は $(I/D)^2$ に比例する。

Fig. 1 Total pressure measured. $D=2, 3, 4$ mm, $I=250, 300, 350$ A.

Fig. 2 Mercury container for measuring electro magnetic flow.

*原稿受付 平成4年3月2日 昭和59年11月 アーク物理研究委員会発表

**特 別 員 Special Member

***正 員 日本工業大学 Member, Nippon Institute of Technology

Fig. 5はその比例係数が距離 Z にたいして直線関係がある事を示している。 P は浴の大きさにあまり影響されない。またC型で、側面だけに電流が流れる時はS型の圧力 P に比べ約倍の P が出るが、側面が絶縁され鉄の蓋部分にのみ電流が流れるときは半分以下である。したがって水平方向に電流が流れる薄板の溶接では同じ条件でも電磁軸流はより強いであろう。Fig. 6は全圧と静圧の測定結果であり、Fig. 7は h =水銀中の動圧mmHgから $v=\sqrt{2gh}$ により計算した速度である。 $D=3\text{ mm}$, 100 Aで最大7 cm/sであった。

Fig. 4 Total pressure measured with C5.

Container; S2, Dia of electrode; 3mm

Fig. 6 Total and static pressure along the center line.

3. 易融合金の溶込み

3.1 円錐電極による溶込み

融点 60.5°C のBi-Pb-Sb-Cd系易融合金を $50\text{ d}\times 30\text{ h}$ の鉄パイプに鋳込み、これにアース線を結んだ。熱源としては市販のハンダこて(150 w)を用い、電極は 350°C に余熱し、 0°C の合金に浸した。電極先端形状を30, 45, 60度の円錐とし、先端をウッドメタル中に3, 5, 7 mm浸漬して、浸漬部の径が4 mmになるようにした。DC電

Fig. 3 Total pressure measured with S2, 3.

Fig. 5 Relation between electrode. Pitot tube distance; z , $P/(I/D)^2-z$, e-m pressure; P , current; I , electrode diameter; D .

Fig. 7 Calculated flow velocity along the center line.

流を5 sec 通電してからハンマリングし、溶込み形状を調べた (Fig. 8)。浸漬深さにより、熱伝達の差で、溶込み体積が著しく異なるが、形状比;溶込み幅 w /深さ d に注目した。

幅 w は電流50 Aでやや増加するが、100 Aで減少するのは形状比 w/d の減少の影響である。形状比は通電なしではほぼ2で、100 Aではほぼ1になる。浸漬深さ3, 5 mmは単純な中央溶込みであるが、7 mmでは深い中央溶込みと共に、上部が広い周辺溶込みが出来る。

3.2 平坦電流による溶込み

電極と合金の接触が切れるとアークが発生することがあり、この困難を避けるために最初は円錐状の電極を用いたが、浸漬部の影響が大きいの为先端を平坦にし、1 mm 浸漬した。D = 2 ~ 10 mm, I = 100 A 60 sec. Fig. 9 は円柱電極の結果である。

通電の有無にかかわらず、電極径 D が大きいと w が直線的に増加するのは、対流効果と入熱量が増加するためである。無通電では w/d は 2 であるが、通電すると 1 になる。

また 3 mm 電極を浸漬深さを 1 ~ 4 mm に変えて溶込みを調べた。4 mm 浸漬で 25 mm の極端に深い溶け込みが得られた (Fig. 10)。

Fig. 8 Penetration by means of heat and current with fusible metal.

Fig. 9 Growth of penetration with time for various electrode diameter.

4. 電磁圧力についての考察

4.1 拡散する電流の電磁圧力

まず半球状の先端部をもつ電極表面に沿う流れ (Fig. 11) を考える。半球面での電流分布は表面に垂直かつ一様とする。中心軸から $x = R \sin \theta$ の表面の点 P における磁束密度 B は

$$B = \mu_0 I (1 - \cos \theta) / 2\pi R \sin \theta$$

半球面 $dx \times dy$ 面を貫いて流れる電流の dz 長さによる体素 $dx dy dz$ に働く電磁力 dF は、

$$dF = \mu_0 I (1 - \cos \theta) / 2\pi R \sin \theta \times I dx dy / 2\pi R^2 \times dz \quad (1)$$

$dF/dv = dP/dx$ であるから、Fig. 11 の x と $x+dx$ 間の $dy dz$ 面に対する圧力差 dP は、 $dx = R d\theta$, 半径 R の円柱導体の中心圧力 $P_0 = \mu_0 I^2 / 4\pi^2 R^2$ として

$$dP = P_0 (1 - \cos \theta) d\theta / \sin \theta \quad (2)$$

円柱導体の場合は、電磁力は軸対称で、軸方向にも一様だから、 dP は圧力として積分でき、 P_0 は円柱導体の中心圧力である。先端が平坦な電極に接した液の中心圧力も同じと考えられる。半球面に沿って液体も同様に流動しないとして、 P を $\theta = 0 \sim \pi/2$ まで積分すると

$$P = 0.69 P_0 \quad (3)$$

平坦な先端を持つ電極の中心下 R の距離の同じ C 点では、液は自由に流動するが、仮に流動しないとして求めた圧力を (3) とする。平坦に切った棒状電極の中心から

Fig. 10 Growth of penetration for various electrode immersion depth.

Fig. 11 Electro-magnetic force acting on a volume cell in diverging current field.

の距離 $r > R$ では、この圧力は R^2/r^2 に比例して減少する。ここで考察した電磁圧力は測定できる静圧そのものではないが、これに対応する。

4.2 電磁圧力と電磁対流

電磁力の作用は電極の直下に設けられた昇圧装置と考えることが出来る。重力により液中に生じる重力ポテンシャルと同様に、電磁力により電磁圧力ポテンシャルが生じ、これは液体の静圧力、動圧力に転化する。

今容器の中に棒電極を浸したとき、中心 O を通る細い流管ループを考える。 v を軸線上の B 点での流速、 r を容器の半径とすると、ベルヌイの定理により

$$P_0(1 - 0.69R^2/r^2) = \rho v^2/2 \quad (4)$$

P_0 は電極に接した液の中心圧力であり、 B 点の電磁圧力との差は静圧差に相当し、これが動圧に変化すると(4)式が得られる。静圧+動圧=全圧= P_0 。一定となるが、実験結果からは近似的に裏付けられる。また(4)式は P が $(I/D)^2$ に、したがって v が I/D に比例することを示す。

なお Kublanov の得た最大速度から、この時の動圧を計算すると、0.3 mmHg で、 I, D 条件を 100 A, 3 mm とすると 120 Pa, 本実験の 3 倍である。この速度は挿入した抵抗板の受ける力から求めており、誤差が大きいと思われる。

4.3 電流の水平成分と軸流

電流が水平方向に流れるほど軸流が強いことは次のような例がある。(1)ウッドメタルで電極を 4 mm 浸漬すると、著しく深い溶込みが生じた。(2)電極先端の形状が尖るほど水銀中の全圧が高い。(3)円筒容器の底を絶縁すると、圧力は倍になり、底のみに通電すると半分になった。

これらは電磁力が直接軸方向に液体を駆動するためと考えられる。

5. 結 論

(1) 水銀中の電磁気力による軸流の全圧 P は次の式で現される。

$$P = (a - bZ)(I/D)^2 \quad (\text{Pa})$$

Z : 電極からの距離 m , I : 電流 A , D : 電極径 m , とすると 20 mm 径の溶融池では

$$a = 0.047; b = -0.004$$

(2) 電流が横方向のみに流れる場合は圧力はこの倍に、垂直方向のみの場合はこの半分になる。

(3) $Z > 2 \text{ mm}$ では静圧はゼロで、 P から流速を求めると、 $I = 100 \text{ A}$, $D = 3 \text{ mm}$ では最大速度は 0.07 m/sec で、Kublanov の実験値の 1/3 であった。

(4) 易融合合金の電磁対流による溶込みは $I/D > 15$ では形状比 $w/d < 1$ で、強い軸流による中央溶込みになる。

(5) 半球状に拡散する電流による電磁力と電磁圧力について求め、中心軸を通る流管中の流速について考察した。

参 考 文 献

- 1) V. Kublanov, A. Erokhin: IIW Doc. 212-318-74.
- 2) 安藤, 長谷川:「溶接アーク現象」, 産報, 1962, p. 166.
- 3) W.J. Greene: A. I. E. E Winter General Meeting, New York 1960.
- 4) J.F. Lancaster:「溶接アークの物理」, 溶接学会, 1991, p. 57.

溶射皮膜をインサート材とした鋳鉄の固相接合*

—フレーム溶射に関する研究 (第2報)—

屋良 秀夫**, 生田 明彦***, 藤木 大輔****

Joining of Cast Iron Used Self-Fluxing Alloy Coating*

—Study on Flame Spraying (Report 2)—

by Hideo Yara**, Akihiko Ikuta*** and Daisuke Fujiki****

Cast iron is one of difficult material to weld. After welding of cast iron material, the heat-affected zone has higher hardness, martensite structure and high cracking susceptibility for high carbon contents.

The base metal used in this study was the nodular graphite cast iron bar (JIS type FCD 600) and the material of the thermal spray was the self-fluxing alloy (S.F.A.).

In this paper, the principal objective of the experimental study was to obtain the basic data for investigation of the mechanical and metallurgical properties.

The experimental findings may be summarized as follows:

(1) The maximum tensile strength reached about 480 MPa of which is about 80% of the tensile strength of the base metal.

*原稿受付 平成4年12月21日 平成3年度秋季全国大会で発表

**正 員 琉球大学 Member, University of the Ryukyus

***学 生 員 琉球大学大学院 Student Member, University of the Ryukyus

****正 員 日立製作所日立研究所 Member, Hitachi Research Laboratory Hitachi, Ltd.