論文および報告

アルゴン溶接におけるアーク力の測定 (その1)*

内 田 彰**

A Measurement of Arc Force in Argon Arc Welding (Part 1)*

By A. Uchida**

Abstract

As the arc force is considered to be an important factor in the problems of the penetration in arc welding and of the characteristic of welding rod, we made some measurements of it in the argon-tungsten arc, using a kind of electromagnetic balance (Figs. 1 and 2). The experimental results are summarized as follows:

- (1) The impinging force of shielding gas is found to be additive to the arc force. (Figs. 5 and 6)
- (2) The arc force varies little with the arc length or the thickness of electrode in the usual range. (Fig. 6)
- (3) The arc force depends principally upon the arc current and is proportional to the square of it. (Fig. 7)
- (4) The arc force in DCRP is almost 15% less than that in DCSP, and these are given by the following experimental formulae.

$$f_{\text{arc. S.P.}} = 0.455 \times 10^{-4} I^2$$

$$f_{\text{arc. R.P.}} = 0.385 \times 10^{-4} I^2$$

- (5) The addition of hydrogen into shielding gas is found to increase the arc force.
- (6) The main part of the arc force in argon-tungsten arc is considered due to the impinging force of high temperature gas of arc.

1. ま え が き

アーク溶接において溶融金属のとけ込み深さ、巾、熱歪計算のための温度分布等は Rosenthal の理論¹⁾の線に沿って種々解析が行なわれ、最近では熱源の大きさを有限分布のもの²⁾としたり³⁾、あるいは溶融潜熱を計算に入れる³⁾などの試みもなされてきた。これらは薄板かまたはとけ込みの浅いとき⁴⁾、あるいは溶融部から比較的離れた部分で考えた全体の歪等⁵⁾については良い結果を与えているが、それらはアーク力や溶融池の攪拌等の要素は考慮していない。したがって一般にとけ込みについて、特にサブマーゲドアークのような比較的深いとけ込みの深さに対しては、必ずしも理論との定量的一致が得られないようである。他方溶接棒の作業性等に関してもアーク力は重要な要素の一つにちがいないのであるが⁶⁾、現在までの所我々のアーク力についての定量的知識はいまだ不十分といわねばならないであろう。すなわち後にも論議するように、Spraragen, Lengyel⁷⁾の総合報告によると、これまでに二三の測定結

果が与えられているがそれは必ずしも一致していない点もある。したがってこれらを合理的に考慮に入れるにはなお若干の実験研究が必要と考えられる。そこで筆者はまづ最も取扱い易いアルゴンアークの場合について、アーク力に関するやや組織的な一測定を試みた次第である。

アーク力の定義については多少問題もあろう。いわゆるアーク力として測定された例の一つは電極棒に中空棒を使用し、この中空孔における圧力上昇をそれにつないだマンメーターによって測ったものがあるが⁸⁾、これはアーク全体の圧力分布を与えるわけでわかないしまたあまり直観的でもない。また Doan 等⁹⁾や Nieburg¹⁰⁾は電極棒を弾性的に支持しそれが受ける力を測定しているが、これは板の側のうける力と必ずしも同じとはいえない。そこでここでは被溶接材に相当する電極を可動電極とし、それが受ける力の全体を測定してこれをアーク力とした。本報の実験はタングステンアークに限られるが、なるべく組織的なデータを得て基礎的知識を確立することに努めた。

2. 測定方法および装置

装置が直接アークの高熱を受けねばならず、また溶接アークのような比較的大きな電流を使用する工業的装置で

* 原稿受付、昭和34年8月15日昭和34年度溶接学会秋季学術講演会において発表

** 正員、鉄道技術研究所 Member, Railway Technical Research Institute.

Fig. 1. The experimental apparatus for the measurement of arc force

電源の多少の変動その他の disturbance を避け難いが、そのような条件で10分の 1g ないし数 g の範囲のややデリケートな測定を行なわねばならぬために装置に若干の工夫を要した。方法の要点を列挙すれば、

(1) 一定のアーク長さで迅速な測定ができるために、一種の電磁バランスを使用し、溶着金属が付着する場合等をも考えて電極の重さ等が関係しないように、測定する力を水平方向に働かすようにした。

(2) 測定用可動電極は中心対称に作り、アークを受ける電極面が支点の鉛直下方になるようにして、表面の溶融や金属の溶着による平衡のずれを最小にした。

(3) 適当な非対称質量とダンパーにより、必要な感度お

Fig. 2. Illustrating diagram of device for measuring arc force

よび安定を得るようにした (感度は針指の先のふれについて約 0.05g/1mm)。

(4) アーク電流通路は水銀接点によることにした。

以上の考えによって測定装置を製作したが、使用の結果は後述のようになお多少の難点があったがおおむね目的に適うものが得られた。

Fig. 1, (写真) は装置の主要部を示すものであり, Fig. 2 はその説明図である。内部に鉄を入れた 2 箇の銅の円柱形ピースが Z 字型に作られたアルミニウムの台にとりつけられ, 中心が knife ridge で支えられる。下方の銅ピースはアークを受ける電極であり, 上方のものは平衡用で, それに向き合せて設けられた電磁コイルの電流を加減して測定しようとするアーク力に釣合わすようにしてある。較正は Fig. 3 によって説明される方法によって行った。Fig. 4 はその較正曲線の 1 例である。鉄心は普通の軟鋼であるが, ヒステレシスや温度変化は実際上ほとんど問題とならなかった。繰り返して行った較正測定のばらつきなどからみて測定装置の誤差は 0.01g~0.04g 程度で, 実際に測定を行った範囲では平均約 3% 程度とみられる。

3. 測定結果

(1) シールドガスの吹付力

まづ予備実験としてアークを出さずにトーチのノズルからアルゴンガスだけを吹き出させ, 測定用電極に当たったときのシールドガスの吹き付け力を測定した。Fig. 5 はその結果で横軸に流量 (cfh) がとってある。流量計は Oxweld type の浮子式のものを使用している。この目盛の精度は必ずしもよいものとは考えられないが, 吹付力はおおむね流量の 2 乗に比例している。今 q を流量 (cfh), ρ を密度 (g/cm^3), a を衝突ガス流の断面積 (cm^2) とし, また η をサクション効果等を含めてガスの運動量が衝突力に変る割合を表わす係数とすれば, 吹付力 $f_{\text{gas}}(\text{g})$ は次式で表わされよう。

$$f_{\text{gas}} = 0.0632 \eta \rho q^2 / a$$

$\rho = 1.78 \times 10^{-3}$ とし, a をノズル ($1/2'' \phi$) 断面積と仮定すれば,

$$f_{\text{gas}} = 0.88 \times 10^{-4} \eta q^2$$

Fig. 3. Calibration device of balancing electromagnetic force

Fig. 4. Calibrated curve of balance force and coil current.

測定結果から $0.88 \times 10^{-4} \eta = 3.05 \times 10^{-4}$ 故に $\eta \approx 3.5$

Fig. 5 によると、実際はノズル径が多少変わっても吹付力は大きく変化しないが、流量の多い所ではノズル径の小さい方が、また電極とノズル間の距離の遠いものが吹付力が減少しているが、これは乱流になったりガス流が側方にそれて、電極の受ける運動量がかえって減少するからと考えてよいであろう。

(2) シールドガス流量およびアーク長さとの関係

さて、実際のアーク力の測定に際しては可動電極の下方に水冷の固定補助電極をもうけ、初めこの補助電極との間にアークを発生させておき、アークの安定ならびにほぼ所期の電流になっていることを確かめてのち、トーチを平行にずらして可動電極にアークを当てるようにした。またあらかじめほぼアーク力にバランスする電磁コイル電流が得られるように加減抵抗器を調節しておき、アークを電極に当てると同時にこの電磁電流のスイッチを入れるようにして、バランスの針が激しく振れすぎないようにして測定を行なった。測定に要した時間は、補助電極との間にアークを発生している時間がおおむね 5 ないし 20sec., 測定電極に当てている時間がおおむね 10 ないし 20sec であったが、この点についてはなお後述する。測定において、アークを受けたあと可動電極の平衡位置が若干ずれるが、これは電極に水を注いで冷却すれば元の位置に戻る所から、不均

Fig. 5. Impinging force of shielding gas of various flow rate.

等な熱膨脹によるためと考えられる。これは電極の形を設計するとき考慮に入れておらず、現在の所避け難かったので、一般に測定をできるかぎり短時間に行ない、また測定値に適当な補正をほどこしたが、測定点のばらつきはこれらを含む測定上の誤差等によるものである。

Fig. 6 はアーク電流を一定 (100A) とし、シールドガスの流量およびアークの長さを変化させたときのアーク力の測定曲線である。この結果によると相対的变化は誤差の範囲において全く Fig. 5 と同様であることが見られ、したがって全体のアーク力は固有のアーク力とシールドガス吹

Fig. 6. The relation between the measured arc force and the flow rate of shielding gas.

付力とを加算したものと見ることができ.

またアークの長さによってはアーク力はたいして変化しないようである(3ないし15mm). 細かくいえば, シールドガス流量のあまり多くない場合はアーク長の長い方がアーク力が幾分大きく, またシールドガス流量の多い所ではアーク長の長い方がアーク力が小さく出る傾向が見られる. 後者は Fig. 5 のシールドガスの吹付力のみの場合と同様の原因によると思われる. また前者については, 実はこの測定精度の範囲ではアーク長—アーク力の関係を確定することは困難であるが, アーク長によってアーク力が変化するとしても通常の範囲ではたとえば電流による変化にくらべるときわめて小さいものと見るべきであろう. なおこれは Creedy の報告する所, すなわち力はアーク長が減ずると急激に増加するというのとは異なった結果である.

(3) 電流の強さとアーク力 (DCSP)

Fig. 7 はシールドガス流量 5 ないし 20cfh で測定したアーク力からシールドガス吹付力をさし引いたものと, アーク電流との関係を示すものである. 測定点は数回の平均値によるものである. 200A では測定電極が20秒位で赤熱状態になり, 電極表面の溶融等も起るために, 測定の誤差はやや大きく, また 200A 以上の測定は本装置では困難で

Fig. 7. The relation between net arc force and the arc current

Table 1 Arc Force at Different Electrode Diameter

Electrode diameter	Arc force (g)		
	65 A	100 A	150 A
1/16"	0.19*	0.44*	—
3/32"	0.22	0.46	1.02
1/8"	0.22	0.44	—
4mm	—	0.47	—
6mm	—	—	1.07

* The tip is molten into globule of larger diameter than that of electrode itself.

あった. Fig. 7 を電流の 2 乗を横軸にとるようにプロットするとほぼ直線関係が得られ (Creedy の結果⁷⁾と一致) アーク力は次式で表わされることがわかる.

$$f_{\text{arc, S.P.}} = 0.455 \times 10^{-4} I^2 \quad (\text{g})$$

(4) 電極の太さ, 測定時間などの影響

電極の太さのおよぼす影響を調べるために, 1/16" ないし 6mmφ の種々の電極を使って測定を試みた. 当初理論的に考えて電極が太くなるとアーク力が減少するであろうと予想したが, どちらかといえば逆に幾分増加気味である. (Table 1) ただしその変化は僅少で測定の誤差と同程度である. たとえば 100A の場合でいえば, いづれの太さの電極でも $0.46 \pm 0.02\text{g}$ の範囲にとどまっている. この問題については後に若干考察する.

次に測定時間の影響についても若干検討した. 前にも述べたように大部分の測定は, まづアークを予備電極との間に 5 ないし 15sec. 発生させた後測定電極に移し, そこで 10 ないし 20sec. の間に測定を行なっているが, 特に予備電極との間に 30sec および 1min. おりいは 1.5min. アークを発生したのちに測定する試みを行った. これは電極の太さに比して電流がやや過少な場合とやや過大な場合とで同じようには考えられないが, 前者の場合時間が長くなると幾分アーク力測定値が大きくなるようであったが, その変化は誤差の程度である. ちなみに Morris, Gore⁹⁾ は彼らのアルゴンアークの熱量解析的測定において, アーク (トーチ) が熱的定常状態に達するには 5~10min. を要したといっているから, この意味では上の測定は完全には定常状態でないことになるが, その差はそうたいしたものでもないであろうし, 少なくとも相対的には十分有意義といってもよいであろう.

(5) 極性の影響 (DCRP)

アルゴンアークで逆極性を使用する場合は電極が電子衝撃で加熱されるために正極性のときに比してはるかに太い電極を使用しなければならない. Table 2 は逆極性の場合の若干の測定結果を示したものであり, 一般に正極性の場合に比して約 15% 小さくなっている. これは Nieburg¹⁰⁾ や Doan⁹⁾ の結果と同傾向のものである. またこの極性のと

Fig. 8. The arc force in Ar-H₂ mixture.

$$f_{\text{arc, R.P.}} = 0.385 \times 10^{-4} I^2 \quad (\text{g})$$

Table 2 Arc Force at Reverse Polarity

Electrode diameter	Arc force (g)			
	65 A	100 A	125 A	150 A
1/8"	0.18	—	—	—
4mm	—	0.40	—	—
6mm	—	0.37	0.54	0.87

(6) シールドガスの種類の影響

Doan⁹⁾ は大気中のほかに窒素中ヘリウム中で実験しているが、その場合の差異については説明されていない。Fig. 8 は Ar 40% + H₂ 60% 気中で行った実験結果であり、アーク力の増加が認められる。これについては次節に若干記述する。

4. 若干の考察および結論

アーク力の本質についてはいまだ明らかにされていないとはいえないが、その原因は単一なものではなく一般に次のような要素が考えられる。

- (1) イオンおよび電子の衝撃力
- (2) 電磁力学的な力
- (3) 高温ガスの衝撃
- (4) 電極の蒸発の反作用

これらの力はある範囲の電流では Comparable な程度の値に評価されるが、多くの必ずしも確かめられていない仮定にもとづいており⁷⁾、十分な論議は困難な事情にある。

しかし今タングステンアークの場合について考えると、先づ (2) の純粋の電磁力学的な力は、アーク柱を半径 R の一様な流体柱と考えると Lorentz 力による圧力増加は、

$$P = \frac{I^2}{100\pi R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \text{ dyne/cm}^2$$

で与えられるから、電極の受ける力は

きは電極が上方まで灼熱され、尖端は溶融してしばしば垂れ下り気味になる（電極棒を水平にしているから）が、上述の力の大きさの差はこれにも関係があると思われる、これらについては次節に若干論議する。なお電極の太さ（3～6mm）を問題にせず、測定されたアーク力を前と同じような式で示せば次のようになる。

$$f = 2\pi \int_0^R p dr = \frac{I^2}{200} \text{ dyne}$$

$I = 150 \text{ Amp.}$ とすれば

$$f = 112 \text{ dyne} = 0.115 \text{ g}$$

となり、すなわちこれは全体のアーク力の1/10強に過ぎないことがわかる。

次に (4) の電極の蒸発の反作用は、少くともタングステンでは問題とならない。タングステン蒸気の量はアーク電圧の値やまたスペクトルに現われ難い点から見てもわずかなであることがわかるが、小沢氏¹²⁾らによれば0.02～0.03mg/A·sec 程度である。アーク電流 150 A の場合に、アークの温度を仮に 10000° K とし、太さ 2.4mm の電極の断面積を通して蒸気が噴出するものとすればその速度は 370cm/sec 程度と推定され、したがってその運動量による反作用は 0.0014g 程度にすぎない。

次に (1) のイオンなどによる力はその機構が十分明らかでないから評価の根拠がやや不確実であるが、たとえば Sack⁷⁾ はそれが $nkTf$ (n イオン密度, f 陰極スポット断面積) によって与えられるとし、180A では 0.435g になっている。これは考慮の外に出すわけにゆかぬ大きさであるがしかし測定されたアーク力が電流の自乗に比例するの比してこの力はおおむね電流の一乗程度に比例するものと考えられるし、電流の比較的大きい場合にアーク力のおもな部分を説明するには足りない。

Fig. 9. The sketches of arc figures of argon-tungsten arcs at various conditions.

したがって測定されたアーク力の大部分を説明するものは(3)の高温ガスの衝風によるものと考えねばならない。これはアークが一般にコーン状をなすから、上の電磁力学的な圧力の式からわかるようにアークの軸方向に圧力勾配を生じ、それによってプラズマの強い流れを生ずる。これは実験的にも数百 m/sec に達することが知られている⁸⁾。この衝風の力を理論的に正しく扱うことは困難であるが、現象的にみてそれはアーク焰の形と関係していなければならないであろう。Fig. 9 は電極の太さ、電流、アーク長さ、極性などを変えた場合のアークの形状と電極の灼熱状態を写真をもとにしてスケッチしたものである。これから見れば正極性では普通の範囲で電極の太さやアーク長さが若干変わってもアーク焰の形はほとんど変化がなく、それらがアーク力にたいして関係しないことの裏付けとなっているように見える。またこの衝風自体は機構的にみて極性に関係しない筈であるが、実際は逆極性のときは電極がよけいに灼熱されるためアークの形状が同図の最後の二つに見るように太くなっている。極性によるアーク力の差異はおそらくこうした違いに起因すると思われるが、Nieburg¹⁰⁾の厚被覆棒での実験が示すように、本来はその本質的部分は極性に無関係なものではないかと筆者は推察している。

なおシールドガス中に水素を混入すると、Fig. 10 の写真に示すように、水素の冷却作用のためにアークが絞られる。同時に銅電極の側にもスポットを生じまた銅の蒸気の噴出がみられる。この場合もしイオンの衝突力が大きく効いていたなら、水素の比重の軽いことがアーク力を減少させる要素になることも考えられるが、結果は Fig. 8 に示すようにアーク力の相当な増加を示しており、蒸気の効果もあろうがむしろ上述の絞りの効果と考えた方がよいであろうと思われる。

シールドガスの吹付力については、アークプラズマの周辺の温度勾配がきわめて大きいから、アークプラズマの周囲の雰囲気はちょうど低圧放電管のガラス壁のような作用をしているとすれば、シールドガスの流れとプラズマ流とは直接には相互作用が少く、したがってシールドガスの吹付力はアーク力に additive にきくものと考えて差支えないであろう。

また筆者の測定結果を他の研究者のものと比較すると、量的には Doan ら⁹⁾の N_2 中の裸銅電極の場合とほとんど一致している。Nieburg や Doan 等のはメタルアークであり、溶滴の生成などどのような関係にあるかは明らかでない。Nieburg は蒸気的反動力を最大の要因としているがこれは疑問であろう。

最後に得られた結果をまとめると、

- (1) シールドガスの吹付力とアーク力は additive である。
- (2) アーク力は普通の範囲ではアークの長さ、電極の太さ等によってはたいして変化しない。
- (3) アーク力は主としてアーク電流の自乗に比例する。
- (4) 逆極性の場合は正極性のときより15%程小さく、それぞれ次式で与えられる。

Fig. 10. The two examples of arc figures in the gas containing hydrogen (Ar40% + H_2 60%); the arc currents are both 120A. DCSP. and the arc lengths are (a) 7 mm and (b) 5mm.

$$f_{\text{arc. S.P.}} = 0.455 \times 10^{-4} I^2 \quad (\text{g})$$

$$f_{\text{arc. R.P.}} = 0.385 \times 10^{-4} I^2 \quad (\text{g})$$

- (5) シールドガス中に水素を入れるとアーク力は増大する。

- (6) 以上のアーク力の大半は高温ガスの衝風によるものと考えられる。

以上アルゴンアークについて行ったアーク力の測定結果について報告したが、この方面の基礎的知識の確立に対して幾分でも寄与しうる所があれば幸である。また MIG アークについての若干の測定結果を次報に報告する予定である。

なお本研究に当たっては研究室長中根博士の御意見をいただき、また測定装置の製作について当研究所宮崎圭三氏萩原健三氏の特別の協力を得たことを記して感謝する次第である。

文 献

- 1) D. Rosenthal, W.J., Vol. 20(1941), No. 5, p. 220-s-234-s
- 2) 応和俊雄, 溶接学会誌, Vol. 25 (1956), No.9, p. 8 および Vol. 26 (1957), No. 6, p. 12.
- 3) 佐藤次彦, 溶接学会 1959 春季講演会発表.
- 4) 渡辺, 佐藤, 溶接学会誌, Vol. 24 (1955), No. 12, p. 34.
- 5) 渡辺, 佐藤, 溶接学会誌, Vol. 25 (1956), No. 4, p. 31.
- 6) 溶接協会溶接棒部会, “溶接棒の研究” No. 2 (1958), Sept. p. 66.
- 7) W. Spraragen & B.A. Lengyel, W. J., Vol. 22 (1943), p. 23-s.
- 8) W. Finkelburg u. H. Maecker, “Handbuch d. Phys.”, B. 22 (1956), s.254-444 (または内田彰, 溶接学会誌, Vol. 28 (1959), No.6, p. 10)
- 9) Doan & Lorentz, W. J., Vol. 20 (1941), No.2, p. 103-s.
- 10) Nieburg, Elektroschweissung, 9 (1938), s. 101 u. 127.
- 11) A.D. Morris, W. C. Gore, W.J., Vol. 35 (1956), No.3, p. 153-s.
- 12) 小沢, 森田, 大村, 溶接学会誌, Vol. 28 (1959), No. 4, p. 38.