TIG アークスタートに及ぼす電極表面状態の影響*

今永昭慈**, 羽田光明**, 荒谷 雄**, 鹿島孝之***

Effect of Surface Conditions of the Electrode on TIG Arc Starting*

by Shoji Imanaga**, Mitsuaki Haneda**, Takeshi Araya** and Takayuki Kachima***

Effect of surface conditions of the electrode on TIG arc starting is investigated and electrode surface is observed microscopically.

The normal arc starting decreases with the number of times of tests. The tip of its electrode (YWTh-2) is covered by solidified tungsten film and the rate of normal arc starting is reduced because particles of thorium oxide (thoria) disappear.

When slightly oxygen is added to shielding gas, the ability of arc starting is maintained at normal arc starting. Because tungsten oxide film is formed on electrode surface and its film vaporizes at lower temperature and thoria particles appear.

Electrolytical etching is conceived and thoria particles appear on tungsten surface by etching. The proportion of thoria particles is over primary content (2%), then ability of arc starting is improved by etching treatment.

Key Words: TIG welder, Arc starting, Tungsten electrode, Thorium oxide, Etching, Electrode surface

1. 緒 言

TIG 溶接^{1,2)}のアークスタートは時には不規則、かつ不安定で電極先端以外の箇所からアークが生じたり、また、アークに移行しなかったりすることがある。その他、電極の消耗³⁾や高周波ノイズの発生^{1,5)}も指摘されており、これらの問題は溶接の自動化、溶接の高品質化及び信頼性の向上を図る上で障害になっている。

一方、溶接中に消耗した電極やアークスタートが困難になったタングステン電極を肉眼あるいは拡大鏡程度の倍率で巨視的(マクロ)に観察することはしばしばあるが、この電極表面を高倍率で微視的(ミクロ)に観察⁶⁾して検討した例は少ない。従って、タングステン電極の表面状態については、まだ不明な点が多い。

そこで、TIG 溶接のアークスタート特性に及ぼす諸因子の影響を検討し、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いてアークスタート試験前後の電極表面状態を調べた。さらに、この結果に基づいて電極表面にトリヤ(ThO₂)を露出させる方法(エッチング処理)を検討し、アークスタート特性の向上に対する有効性を確認したので報告する。

2. 実験方法

2.1 実験装置及び条件選定

実験装置の構成を Fig. 1 に、またアークスタート試験のタイムチャートを Fig. 2 にそれぞれ示す。TIG トーチ内の電極棒と水冷銅板との間に直流アーク(棒マイナス)を所定時間間隔で繰り返し(繰り返し回数N=100回)発生させた。電極棒は、JIS 規格の2%酸化トリウム入りタングステン(YWTh-2)と純タングステン(YWP)を用いた。電極径は2.4 mm (3.2 mm も一部使

Fig. 1 Diagram of equipment for arc starting test

Fig. 2 Timechart of arc starting test

Fig. 3 Diagram of equipment for electrolytical etching

用)で、先端角度を35度に研削加工し、かつその最先端部を0.5 mm 面取り加工した。シールドガス(SG)は純 Ar ガス及び酸素の影響を調べるために Ar+2%O₂

*原稿受付 昭和61年9月9日 昭和59年7月第98回溶接法研究委員会で発表

**正 員 (株)日立製作所機械研究所 Member, Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd.

***正 員 (株)日立精工 Hitachi Seiko, Ltd.

ガスを使用した（ガス流量 10 l/min 一定）、溶接電源は市販のサイリスタ制御方式の交直両用 TIG 溶接機（日立製 AD-RP 300）を用い、アーク電流（I）を変化させた。電極・母材間距離（SO）は 2 mm 一定にした。

アークスタート試験前後の電極表面の観察には、走査型電子顕微鏡（日立製 S-550 型）を使用し、同時に同装置により W, Th 等の成分分析を行った。

Fig. 3 は電極表面にトリヤを露出させるためのエッチング処理装置を示したもので、ここではエッチング時間の短縮を図るため、電解エッチングを行った。タングステン（あるいは溶解）が可能な薬品は種々あるが、本実験ではエッチング液として取り扱いが比較的容易な苛性アルカリの水溶液を用いた。

2.2 アークスタートの良否の判定

定常状態のアークと異ってスタート時のアークは過渡的現象で、かつ不規則であるため、そのスタート性を正確に評価することは難しいが、ここではアークを繰り返し発生させたときのアークスタート時のアーク電圧・電流波形を、オシログラフに記録して調べた。また、同時に撮影（N=10 回に付き写真を 1 枚のサイクルで撮影）

したアーク現象のスチール写真を観察して判定した。

本実験で観察した代表的なアーク電圧・電流の波形を Fig. 4 に、またこの波形に対応するスタート時のアーク写真の一例を Fig. 5 にそれぞれ示す。A タイプは、高周波高電圧の火花放電によってアークが電極先端からスムーズに発生した場合（正常なアークスタート）、B タイプは、アークが電極先端以外の箇所から発生または電極上部にはいりながらスタートした後、そのアークが電極先端部に移動した場合（アークのはいりスタート）、C タイプは、電極上部にはいり上ったアークのアーク長が延びてアーク切れを起こした後、再スタートした場合（アーク切れスタート）をそれぞれ示している。その他、D タイプとしてアークが発生しない場合（アーク移行不能）があるが、本実験ではアークの発生時間（ T_{ON} ）を 3 秒に設定しているために、この現象はほとんど認められなかった（ T_{ON} を 1 秒程度に短くした場合には、このアーク移行不能が生じる）。なお、Fig. 4 に示した電流波形を見ると、電流リップルがやや大きく、またアークスタート時にラッシュ電流が生じているが、これは使用した溶接機の電流特性によるものである。この影響に

Fig. 4 Oscillograms of typical arc voltage and current waves on arc starting test

Fig. 5 Typical of still photographs of arc starting

については、今回、特に取り扱っていない。

したがって、ここではアークスタート状態を A, B, C, D の 4 つのタイプに分類して評価した。

3. 実験結果及び考察

3.1 アークスタート特性の検討

3.1.1 電極材質の影響

YWP 電極と YWTh-2 電極とのアークスタート特性の結果を Table 1 に示す。熱電子放出能力^{3,4,7,8)}の低い YWP 電極の場合は、電極先端からアークが正常に発生することが困難で、アーク切れスタートの C タイプが大部分を占めている。アーク切れ後の再スタート時には定常電流よりも数倍高いラッシュ電流が流れ易く、そのと

Table 1 Effect of electrodes on arc starting characteristics

Electrodes	Conditions of arc starting and the number of times		
	A type	B type	C type
YWP	1	5	94
YWTh-2	24	39	37

(current : 20A
shielding gas : Ar 10ℓ/min
number of times : 100)

Fig. 6 Result of arc starting characteristics of YWTh-2 electrode

きに電極先端から溶滴が飛散する現象が観察された。また、試験後の YWP 電極の最先端部は、溶融して球形状に凝固した様子を示しており、その上部の表面はアークのはい上りの痕跡が多く認められ、かつ金属光沢が失われて白っぽく変色している。

これに対して、YWTh-2 電極の場合には、YWP 電極よりも熱電子放出特性が良い（仕事関数 V_w が低い）ので、C タイプが生じる回数が半分に減少し、正常なアークスタートである A タイプの回数が増加している。Fig. 6 は、このアークスタート試験を 100 回行い、その内 10 回単位で A, B, C のタイプが占める割合を整理した結果を示す。初期のころは正常な A タイプでアークスタートしているが、繰り返し回数の増加に伴って B タイプの割合が増大し、その後 C タイプが多くなり、アークスタート特性がしだいに低下していく様子を示している。

3.1.2 電流の影響

電流を先の 20A から 50A, 100A に増大させて試験を行った YWTh-2 電極の結果を Table 2 に示す。この結果より、電流が大きくなるに従ってアーク切れやアークのはい上り現象は急減し、正常なアークスタートの A タイプが急増することが分った。

Fig. 7 は、各々のアーク電圧・電流波形よりアークスタートの安定性を調べた結果である。電流が 100A の場合は、アークスタート後約 0.2 から 0.4s で定常状態（ここではラッシュ電流が発生した後のアークが定常になるまでの時間を測定）になっている。これに対し、50A 及び 20A の場合には、アークのはい上り及びアーク切れ現象の発生を伴うために、そのアークが安定するまでに時間を要し、かつ時間の変動も生じやすいことが分った。なお、この実験に使った YWTh-2 電極は、3.1.1

Table 2 Effect of current on arc starting characteristics

Current (A)	Conditions of arc starting and the number of times		
	A type	B type	C type
20	24	39	37
50	40	60	0
100	100	0	0

Fig. 7 Relation between stability of arc starting and current**Table 3** Effect of shielding gas on arc starting characteristics

Shielding gas	Conditions of arc starting and the number of times		
	A type	B type	C type
Ar+2%O ₂	100	0	0

(electrode : YWTh-2, $\phi 2.4$
current : 20A
number of times : 100)

節で述べた YWP 電極のように先端部が溶融及び消耗する様子は認められなかった。

3.1.3 シールドガスの影響

シールドガス雰囲気中に不純物や空気などが混入すると溶接品質が低下し、また電極が消耗することが知られている^{1,3,4)}。しかし、アークスタート特性に着眼すれば、酸化物は熱電子放出特性が優れているので、酸素ガスの混入はアークをスタートしやすくなると予想される。

アークスタートに及ぼす酸素ガスの影響を調べるために、Ar ガスの代りに Ar+2% O₂ ガスを使用して同様のアークスタート試験を行った。その結果、Ar+2% O₂ ガス雰囲気中でのアークスタートは良好で、電流が 20A と小さい場合でもアークのはい上り現象は認められず、Table 3 に示すように、100 回ともすべて電極先端から正常にアークスタート (A タイプ) した。なお、電極の酸化も進行し、Fig. 8 に示すように電極先端が消耗している。

Fig. 8 Consumption of electrode by oxygen in shielding gas

Fig. 9 Surface conditions of the ground electrode of YWTh-2

3.2 SEM による電極表面の観察及び成分分析

3.2.1 アークスタート試験前後の電極表面の検討

Fig. 9 は、研削加工した試験前の YWTh-2 電極の先端表面を SEM により観察及び成分分析した結果の一例である。研削加工された面の画像観察からはトリヤの分布状態を認めることができなかったが、ライン分析及び面分析を行うとトリヤ (Th 元素として分析) が存在していることが分った。なお、これに先立って行った焼結前の 2%トリヤ入りタングステン粉末及び焼結成形加工後の電極棒破断面の観察結果より、粒径が約 $1\sim 5\mu\text{m}$ のトリヤがタングステン中に混入しており、また、破断面には焼結のボイドが多数認められた。

Fig. 10 は、電流が 20 A のアークを約 15 回繰り返し発生させた後の試験初期の YWTh-2 電極表面の観察結果で、(1) は、アーク直下にあった電極最先端部の表面状態、(2) 及び (3) は、アーク発生点よりも 3 mm 程度離れた電極上部の表面状態及び Th の分布を示す。YWTh-2 電極の場合は、3.1.1 節で述べたように電極先端部が過熱・溶融して球形状に凝固する YWP 電極と異って、(1) に示すようにタングステン粒子が局部的に溶融あるいは蒸発して再結晶し、スポンジのような様相をしている。また、その電極上部においては溶融・凝固したタングステン粒子の他に、その表面にトリヤが多く点在する様子が認められる (Fig. 10(2), (3))。

Fig. 11 は Fig. 6 に示した 100 回のアークスタート試験で使用した後の電極先端表面の検討結果である。Fig. 10 に示した電極表面状態と比較すると、ここでは電極表面全体が溶融・凝固皮膜で覆われてあたかもセメントを塗ったような様子を示し、表面の一部には割れが生じているなど様相が異っていた。また、トリヤは消失して見

Fig. 10 Surface conditions of the electrode after arc starting test of the early times

Fig. 11 Surface conditions of the electrode after the final arc starting test

当らなかった。アークスタートの繰り返しを重ねるに従ってトリヤ入りタングステン電極表面よりトリヤが消失すると、当初の電極表面の仕事関数^{2,8)} ($V_W \approx 2.63\text{eV}$) は変化してしだいに純タングステンの仕事関数 ($V_W \approx 4.54\text{eV}$) に近づくことになる。つまり、実質上の仕事関数が大きくなって熱電子放出特性は低下し、このため、電極先端からのアークスタートが困難になり、アークのはり上り及びアーク切れ現象が増発するようになるものと考えられる。

アークスタート特性が低下したこのような電極棒の回復を図るには、トリヤが分布する新しい電極表面にして電極先端の仕事関数を下げる必要がある。研摩機 (例えばグラインダー) による研削加工が従来から用いられているが、他の方法で電極先端表面にトリヤが露出できれば、従来のように再研摩をしなくともよいことになる。トリヤの露出方法に関しては第 3.3 節で述べる。

3.2.2 連続アークを発生させた電極表面の検討

アークスタートの繰り返しが多い断続アークを発生させたとき、長時間連続アークを発生させたときでは、電極棒への熱負荷の状態が異なるので、電極表面の様子に相違が生じるものと考えられる。そこで、ここでは電流が 200 A の連続アークを 120 分発生させ、それによって徐々に消耗 (消耗量 18 mg, 消耗長さ 0.4 mm) した YWTh-2 電極 (電極径 3.2 mm) の表面観察を行った。Fig. 12 にその観察結果の一例を示す。写真(1)のアーク直下にあった電極先端部の表面状態は、Fig. 10 の写真(1)に示した結果とほぼ同じであるが、アーク発生点から離れた(2)及び(3)の部分の電極表面は特異な様子をして

(a) Shape of the electrode tip and points of observation

(b) Magnified surface and X-ray image of Th

Fig. 12 Result of surface conditions of the electrode after arc test generated continuously

いる。すなわち、アーク熱で金属蒸気となったタングステンが附着、凝結堆積した後、その一部が溶融、凝固したと推察される様相を呈している(写真(2))。また、長時間赤熱状態にあった電極上部の表面(写真(3-1),(3-2))においては、多量のトリヤの露出が認められる。この理由としては、電極表面のタングステンが微量に混入した酸素により酸化タングステンに変化して、タングステンの融点より低温で気化^{9,10)}(800℃程度)したために、その近傍に分布していたトリヤが表面に露出したものと考えられる。

常温下で YWTh-2 電極の表面にトリヤを露出させるエッチング処理法は、この結果を基に考案したもので、その検討結果を次に述べる。

3.3 トリヤの露出及びその効果の検討

3.1.1 エッチング処理法によるトリヤの露出

アークスタート特性が悪化した YWTh-2 電極先端を、再研削加工しないでその表面にトリヤを露出させる方法は、下記の 2 つが考えられ、本報告では(1)のエッチング処理法を取り上げて検討した。

(1) エッチング処理法

電極先端の表面を腐食液によりエッチングしてタングステンを溶解、除去する。

(2) 酸化処理法

酸化性のガスにより電極先端表面に酸化タングステンを形成させた後、その酸化タングステンをアーク熱で蒸発、除去する。

Fig. 13 は、アークスタート試験後の YWTh-2 電極の先端部に、Fig. 3 に示した装置により電解エッチング処

Fig. 13 Surface condition of YWTh-2 electrode after the electrolytical etching **Fig. 14** Result of arc starting characteristics YWTh-2 electrode after etching

理を行い、その表面を SEM で観察した結果の一例である。当初、この電極表面は Fig. 11 に示したような溶融・凝固皮膜に覆われ、かつトリヤが消失していたが、上記エッチング処理によってこの溶融・凝固皮膜が除去されてトリヤが露出し、しかもその露出量は、素材に分布していた量を上回っている様子が認められた。

3.3.2 エッチング処理電極のアークスタート特性

次に、トリヤの露出の有効性を調べるため、エッチング処理を施した YWTh-2 電極を用いて、第 3.1.1 節で行った実験と同一条件 ($I: 20A$, $N: 100$ 回) でアークスタート試験を行った。Fig. 14 にアークスタート特性の検討結果を示す。Fig. 6 に示した結果と比較すると明らかに、アークのはい上り及びアーク切れ現象が減少し、電極先端から正常なアークスタートする A タイプの割合が YWTh-2 電極の場合よりも著しく増加しており、その有効性が認められた。

本報告ではトリヤ入りタングステン電極に関して述べたが、熱電子放出特性の良いランタン、セシウム、イットリウム、ジルコニアなどトリヤ以外の元素またはその酸化物が添加されているタングステン電極に対しても、本エッチング処理法を適用することが可能である。

4. 結 言

TIG 溶接のアークスタート特性に及ぼす電極表面状態の影響について検討し、以下の結果を得た。

(1) 小電流でアークスタートを繰り返すと、アークのはい上りやアーク切れ現象が増加して、正常なアークスタートができなくなるが、その時の電極 (YWTh-2) 先

端を SEM で調べた結果、電極表面が溶融・凝固皮膜で覆われ、かつトリヤが消失していることが判明した。

(2) シールドガス中に微量の酸素ガスを添加すると、アークのはい上り及びアーク切れ現象の発生が抑制され、電極先端から正常にアークスタートできることが分った。

(3) 連続アークを発生させた電極上部の表面にトリヤが露出する現象に着目して、常温下でトリヤを露出するエッチング処理法を考案し、アークスタート特性の向上に効果があることを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 日本溶接協会：TIG 溶接装置とその使用法，産報（1973），p.7-29, p.75-79
- 2) 安藤，長谷川：溶接アーク現象，産報（1967），p.144-153, p.22-29

- 3) 安藤，西川：TIG 溶接用タングステン電極のアーク特性に関する研究，本誌，40-6（1971），p.72-82
- 4) 安藤，西川：アーク溶接機器，産報（1966），p.285-292
- 5) 信原，窪田：TIG 溶接の電波障害軽減とアークの安定化，本誌，43-3（1974），p.74-79
- 6) M. J. Brown：Initiation of a Tungsten, Inert Gas Arc by High Voltage D.C. The Welding Institute（1976），p.1-14
- 7) 牛尾：アーク放電の陰極領域の現象，高温学会誌，8-1（1982），p.14-23
- 8) 小野，塚越，森本：真空ハンドブック（材料と温度と熱電子放射），日本真空技術 KK（1978），p.172-173
- 9) 川口：新金属ハンドブック（タングステン及びトリウム），化学工業社（1969），p.107-110, p.125-130
- 10) 玉虫，富山他6名：理化学辞典（タングステン及び酸化タングステン），岩波書店（1971），p.798, p.514

水中溶接における溶接部の性能に及ぼす冷却緩和の効果*

—水中溶接部の性能向上に関する研究（第3報）—

菅 泰 雄**

The Effect of Cooling Rate on Mechanical Properties of Underwater Wet Welds*

—Study on Improving the Mechanical Properties of Underwater Welded Joints (The 3rd Report)—

by Yasuo Suga**

Thermal cycles of welds in underwater wet gravity arc welding were measured. Then the effect of cooling rate on occurrence of underbead cracks and on the mechanical properties of welds were investigated.

Main results are summarized as follows;

- (1) In case the shielding processes are used, the cooling rate and the hardness of underwater welds can be lowered certainly.
- (2) Underbead cracks occurring in underwater welds of SM50 steel thinner than 9 mm in thickness may be prevented by lowering the cooling rate at 500°C below 35°C/s and the maximum hardness of the weld less than Hv360 approximately. Such lower cooling rate can be obtained by oil putty shielding.
- (3) Whether the shielding process are used or not, cooling rate (R) at 500°C and cooling times (S_{500} , S_{300}) of underwater welds from 800°C to 500°C or 300°C may be estimated from the following experimental formula;

$$R = 6.25 \times 10^5 \alpha \cdot Q^{-0.95} \cdot t^\beta \quad (^\circ\text{C/s})$$

$$S_{500} = 455 a \cdot R^{-1.09} \quad (\text{s})$$

$$S_{300} = 780 b \cdot R^{-1.09} \quad (\text{s})$$

where, Q: weld heat input (J/cm), t: thickness of base metal (mm), and α , β , a and b are constants given as follows:

non shielding	: $\alpha=1, \beta=0.17, a=1, b=1$
refractory shielding	: $\alpha=0.28, \beta=0.45, a=1, b=1$
oil putty shielding	: $\alpha=0.036, \beta=1, a=0.67, b=0.80$

- (4) The welded joints obtained by oil putty shielding have nearly comparable mechanical properties with those of open air welds.

Key Words: Underwater welding, Cooling rate, Improvement of Mechanical Properties, Prevention of cracks, Gravity welding, Oil putty shielding, Refractory shielding

*原稿受付 昭和61年8月18日昭和55年度秋季全国大会で発表

**正 員 慶応義塾大学理工学部 Member, Faculty of Science and Technology, Keio University

1. 緒 言

被覆アーク溶接棒を用いた湿式水中溶接では、溶接部の冷却速度が著しく速いために母材熱影響部が硬化しや