低圧ティグアークによるビード形成現象と アンダカットビード形成の防止法*

島田 弥**, 星之内 進**

A Study on Bead Formation by Low Pressure TIG Arc and Prevention of Under-Cut Bead*

by Wataru Shimada** and Susumu Hoshinouchi**

Low pressure TIG arc has remarkable characteristics as a welding heat source such as low arc pressure and high temperature cathode zone. Bead formation by low pressure TIG arc in high speed condition is studied in comparison with those by atmospheric TIG arc. Mechanism of under-cut bead formation and a method of prevention of under-cut bead are also studied in the report. The results obtained are as follows;

- (1) Bead shapes by low pressure TIG arc change with both arc current and welding speed similarly to those by atmospheric TIG arc. Welding condition ranges for bead mode are basically divided into three parts by Front Gouging Line, where gouging region occupies the front part of the molten pool, and Bottom Vacant Line, where vacant parts remain at the bottom part of the penetration.
- (2) In low pressure condition, both Front Gouging Line and Bottom Vacant Line shift remarkably to higher current-higher speed side compared with those in atmospheric condition because of lower arc pressure. So, the suitable welding region, limited by the appearance of improper bead such as under-cut bead, is enlarged much to high current-high speed side.
- (3) Once gouging region appears in front of the molten pool under transition condition, a wide and shallow normal bead changes rapidly to a narrow and deep bead corresponding to the shape of cathode zone. Under-cut bead is formed when the gouging region occupies maximum bead width, because side part of the gouging region solidifies rapidly after detached from the cathode zone.
- (4) On the surface of the gouging region in under-cut bead, thin molten metal of several ten microns thickness flows uniformly toward backside, and it satisfies the condition of supercritical flow in fluid dynamics. Under such a condition, gravity head of molten pool is balanced with arc pressure, surface tension of molten metal and hydraulic jump effect of supercritical flow.
- (5) For the prevention of under-cut bead formation in high speed condition, prevention of gouging formation by forward metal flow under forward torch angle in low arc pressure condition is an effective method. Uneven bead in the current region up to Bottom Vacant Line can be basically changed to the normal bead using the above method.

1. ま え が き

アーク溶接の高速化に際しては、アーク圧力の作用を主因とする不整ビードの発生が大きな問題となる。著者らはすでに低圧雰囲気中でティグアークを発生させることにより、大気圧ティグアークよりも著しく小さなアーク圧力と陰極直下に球状の高温陰極域が得られることを見だし、その熱源特性と母板の基本的溶融現象との関

係について検討している¹⁾。

本報ではアーク圧力とビード形成の關係に注目し、低圧ティグアークによる平板上のビード形成現象、とくに高速条件において発生するアンダカットビードの形成現象、および熱源形状とアーク圧力の作用方向の制御によるアンダカットの防止法について検討した結果を報告する。

2. 低圧ティグアークによる溶融池現象とビード形成

低圧から大気圧までの任意の圧力 P に設定したアル

*原稿受付 昭和56年7月20日 (昭和49年度春季全国大会にて発表)

**正 員 三菱電機(株)生産技術研究所 Member, Manufacturing Development Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation

ゴン雰囲気中で、先端角度を 25° に整形した直径 4 mm の 2% Th-W 電極を用い、高温陰極域が母板に十分接触するように電極・母板間距離 L を 1 mm に設定した状態で、板厚 12 mm のステンレス鋼板 SUS 304 および軟鋼板 SS 41 上に直流電極マイナスのアークを発生させ、溶融池現象およびビード形成現象を検討した。軟鋼とステンレス鋼に対する溶接において溶接電流と溶接速度を変えた場合、後述する各ビード形態の発生する溶接条件域には多少の差があるものの基本的には同じ傾向を示す。そこでビード形態の分類と溶融池の観察は、現象の観察しやすいステンレス鋼で行ない、その他の検討は実用面で用途の広い軟鋼で行なった。

低圧 ($P=32$ mmHg) 雰囲気中において、ティグアークによる平板の溶融溶接を行なった場合の、溶接速度の増大にともなう溶融形態の変遷を Fig. 1 に示す。

Fig. 1 Change in mode of molten pool with welding speed by low pressure TIG arc

低速条件域では、高温陰極域が溶融池中央に接し、その周辺を外周アーク焰が覆っている。アーク圧力が微弱なので溶融池のくぼみは小さく、比較的低電流側ではいわゆる単純溶込み形の溶融池を示し、高電流側では周辺方向への表面流のため (a) のような周辺溶込み形の溶融池を示す。高電流条件下で溶接速度を増大させると、陰極接触域は相対的に溶融池の前部に移行し、この溶融池前部の表面部の溶融開拓を進める。この部分では微弱とはいえ、アーク圧力が作用しているので薄い溶融層のみ

を留めるガウジング領域が形成されるが、陰極域の大部分が厚い溶融池を覆う状態では (b) のような溶込みの浅い平滑な正常ビードになる。しかし、この状態は不安定で、同一溶接条件下でも次の (c) の状態に移行することがある。なお、(b) の不安定正常ビード (unstable normal bead) は、アーク圧力の作用領域に対して相対的に溶融池が小さい小電流の高速条件では発生しない。

さて、さらに溶接速度が増大してある臨界条件以上に達すると、(c) のように急に溶込みが深くなり、しかもその溶融池前部に薄い溶融層のみを留めるガウジング領域が形成される。このガウジング領域内では後方への溶融金属流が活発におこり、最大溶融幅位置までガウジング面で占められると陰極域から離れたガウジング域周辺部では急速に凝固が進み、前方からの金属流が溶融池の後方中央部に流れ込む結果アンダカットビードを形成する。

さらに溶接速度が増すと、(d) のようにミグ溶接でみられる形のハンピングビード (MIG Type Humping Bead) になる。ここに示したアンダカットビードとミグ形ハンピングビードとは、溶融金属が定常的に凝固するかくびれを生じながら凝固するかの違いであって、本質的には同じ原因によって生ずる現象と考えている。(d) の条件よりもさらに溶接速度が増すと、(e) のようにガウジング領域が溶融池底部の最大溶込み位置まで拡大して、この底部の陰極域をはずれた位置で部分的な凝固域 (Solidified Region) を形成するために溶融池の定常的な進行が阻止され、局所的に溶融池の跡切れたハンピングビードに移行するが、この形態は本質的には (d) と同じくミグ形ハンピングビードに属するものである。なお、800 A 程度以上に溶接電流を増すと、比較的大きなアーク圧力のために溶融池表面が押し下げられ、大気中のティグ溶接の場合と同じく陰極直下の溶融金属が底部固体面上を周辺部に向かってランダムに流れる領域 (Random Flow Region) が形成され、それが部分的に凝固するため側部のみが溶融金属で満たされたティグ形ハンピングビード (TIG Type Humping Bead) (f) に移行する。なお、ここでハンピングビードに至るまで注目したのは、平板溶接ではアンダカットの発生が問題となるのに対し、別稿で検討する予定のへり継手溶接などではハンピングビードが正常ビード形成条件域を規制するためである。

大気圧下での溶接速度に対する溶融形態の基本的な変遷過程は、Fig. 1 の (e) の形態が現われない点を除けば上記と同じであるが、著者らによる別報¹⁾でも述べたように大気圧下ではアーク圧力が大きいので、それぞれのビード形態をとる条件範囲は Fig. 2 にみるように上記

Fig. 2 Classification of gouging type and bead mode at different gas pressures

の場合より著しく低電流・低速側にある。この場合、低圧下および大気圧下でアーク電圧が異なるので、図の横軸には溶接電流の他に共通の尺度として母材入熱をも併せて示している。低圧下および大気圧下いずれの場合も、大きくは Fig. 1 の形態 (b) および (c) で示した溶融池前部にガウジング面が形成され始める F.G. 線 (Front Gouging の発生条件) と、陰極域直下の溶融金属が底部固体面上を周辺部に向かってランダムに流れ、その底部が局部的に凝固するため溶融池の定常的な進行が阻止される結果、溶込み底部に空孔を形成し始める B.V. 線 (Bottom Vacancy の発生条件) とで区分される。ただし、低圧下では陰極域からはずれたガウジング面底部に部分的な凝固がおこって溶融池の進行が阻止され始める Quasi B.V. 線 (Quasi Bottom Vacancy の発生条件) により F.G. 線と B.V. 線ではさまれた領域が 2 つに分けられる。

大気圧ティグの場合の正常ビードを形成する条件範囲が小電流・低速条件側にあるのは、主として低圧下に比べて強力なアーク圧力が作用する結果であり、これに両者の熱源形態の差異の影響が重畳されているものと考えられる。したがって、とくにティグ溶接の高速化に対しては低圧雰囲気によるアーク圧力の低減が有効である。

3. 低圧ティグアークによるアンダカットビード形成過程とその考察

溶接速度の増大とともに正常ビードからアンダカットビードへ急変する過程について、高速度写真で溶融池を

観察するとともに、ビード形態に変化を与えない程度の少量の Cu を前方より溶融池内に瞬間添加し、組織観察により溶融金属の流れを追跡した。

Fig. 3 は正常ビードから不安定正常ビードを経由してアンダカットビードに移行する条件域における観察結果を模式的に示したものである。臨界条件直前では (a) 図中の矢印に示すように周辺方向への表面流が活発であり、これによってアーク入熱が積極的に周辺部に運ばれる。この結果としてビード側方の二次溶融が進み、前述のような広幅の浅い溶込みを呈するものと判断される。これに対し、わずかに溶接速度が増した臨界条件直後 (b) では、溶融池の前部にガウジング域が急速に拡大され、このガウジング面上を薄い層状湯流れが主として後方に向かっており、溶融池が後退し高温の陰極域が直接ガウ

Fig. 3 Comparison of two types of bead shape and molten metal flow mode under the transition condition from normal bead to under-cut bead

ジグ面を加熱するようになるため、陰極域の寸法および入熱に対応した狭幅で深い溶込みのアンダカットビードへと急変する。

Fig. 4 は上に述べた遷移前後の溶接条件での軟鋼における溶融池の重力ヘッド M の変化を示している。正常ビード域では速度の増大とともに重力ヘッドは急速に減少するが、アンダカットビードが形成される状態では重力ヘッドが不連続的に急増する。また遷移条件下（不安定正常ビード域）では同一溶接条件下すなわち同一アーク圧力下でも異なる重力ヘッドを示している。

Fig. 4 Change in gravity head of molten metal with welding speed under the transition condition

Fig. 5 は遷移条件の前後での溶融金属に作用する力の釣合いについて考察するため、溶接電流に対する溶融金属ヘッド M を整理したものである。比較のため水冷銅板上で測定した最大アーク圧力 Pd_{max} の変化も併記している。アンダカットビードにおける溶融金属のヘッドの変化 PQR は Pd_{max} の測定値 ABC より多少低いが類似の傾向を示している。これに対し、正常ビード形成限界における溶融金属の重力ヘッド $PQ'R'$ は同一電流条件下での PQR よりはるかに低い。この場合アーク直下に十分に溶融金属が存在して凹みの半径が前者に比して小さく、これに基づく表面張力による反力がアーク圧力の溶融金属を押し下げる作用に対抗しているものと考え

$$Pd_{max} = 2\gamma/R + M \quad \dots\dots(1)$$

ただし γ : 溶融金属の表面張力

R : 溶融金属の凹みの半径

という関係が成り立つ。一例として Fig. 5 の $I=500$ A の場合の $Pd_{max}=4.3$ mmFe, $M=1.8$ mmFe を代入し、 $\gamma=1000$ dyne/cm² とすると $R=10.4$ mm となるが、

Fig. 5 Gravity head in molten pool and arc pressure at various arc current

溶融池の観察結果からこの値はあり得る値であり、上記の力の釣合いが成り立っているものと判断される。

アンダカットビード形成現象をさらに詳細に検討するためガウジング面形成条件直後の溶融金属の挙動を検討した。Fig. 6 にアーク移動のまま消弧させた場合のアンダカットビードのクレータの縦断面および横断面を示す。ここでガウジング面上の液層および溶融金属の位置は消弧前後においてほとんど変化しないことを高速度写

Fig. 6 Appearance and cross section of gouging region in under-cut bead by low pressure TIG arc

真観察により確認している。200 A~700 A の条件範囲にわたる断面観察の結果、ガウジング面は薄い液層で覆われており、その厚さは $30\text{ }\mu\text{m}$ ~ $120\text{ }\mu\text{m}$ の範囲内にあり $60\text{ }\mu\text{m}$ 程度の厚さの場合が多いが、溶融池へと厚さが不連続に変化して流れ込んでいる。

上に述べた実測結果から、ガウジング面発生後の急激な溶融池の後退は射流モデルを導入することにより説明できる。すなわち Fig. 7 (a) に示すように液体が固体面上を薄い層状に流れる場合、液層の流速 V_m が

$$V_c = \sqrt{g \cdot h} \quad \cdots \cdots (2)$$

ただし g : 重力の加速度

h : 液層の厚さ

で決まる臨界流速を越えると射流 (Supercritical Flow) となり、これが $V_m < V_c$ の常流 (Subcritical Flow) に急変する際に跳ね水現象 (Hydraulic Jump) を生じることが知られている。また、この現象は

$$F = V_m / \sqrt{g \cdot h} \text{ (Froude Number)} \quad \cdots \cdots (3)$$

の増大とともに顕著になる³⁾。

Fig. 7 Model of hydraulic jump and gouging region

いま、Fig. 7 (b)-(1) に示すガウジング面の最大幅位置における溶融境界の断面形状をとり、これが Fig. 7 (b)-(3) のように後方に向かって均一な溝をなしているものとし、この部分に存在する液層の厚さおよび流速 (矢印方向) が均一であると仮定すると、このガウジング面上を流れる薄い液層の平均流速 V_m は

$$A \cdot V = l \cdot h \cdot V_m$$

ただし A : 溶融断面積

V : 溶接速度

l : 固液境界長さ

h : ガウジング面の液層の厚さ

したがって

$$V_m = A \cdot V / l \cdot h \quad \cdots \cdots (4)$$

となる。

実測データをもとに (4) 式によりガウジング面上の薄液層の平均流速を概算すると、たとえば

$$V_m = A \cdot V / l \cdot h = 667 \text{ mm/S}$$

$$V_c = \sqrt{g \cdot h} = 22 \text{ mm/S}$$

$$F = V_m / V_c \approx 30$$

$$\text{ただし } P = 32 \text{ mmHg, } L = 1 \text{ mm, } I = 600 \text{ A,}$$

$$h = 50 \text{ }\mu\text{m, } A = 14 \text{ mm}^2, l = 11 \text{ mm}$$

のように $F = 10 \sim 40$ となり、ガウジング面上の液層流は射流の形成条件を十分満足し、この結果溶融池は後退することになる。

以上の考察結果から、アンダカットビードの形成過程は次のように要約される。すなわち低速条件においてはアーク圧力が溶融池の中央に作用するが、そこでは厚い溶融金属層の大きな表面張力反力がアーク圧力の作用に抗っているため、小さな溶融金属ヘッドで釣合いが成り立ち、溶融金属の凹みは小さな状態に留まるため平滑なビードが得られる。これに対して高速条件においては、アーク圧力の作用する位置が溶融池前部に偏り、浅い溶込みの溶融池前部がアーク圧力により押し下げられる。アーク圧力により押し下げられた溶融層の液厚が薄くなり、液層の流速が射流条件を満たすと、溶融金属が急速に後退し溶融池形状が R の大きな細長い形に変化するため、溶融金属の表面張力反力が小さくなり、アーク圧力にほぼ近い大きさの溶融金属ヘッドを維持するようになる。このようにして、陰極域とほぼ接している最大溶融幅位置までガウジング面で占められると、陰極域から離れたガウジング域周辺部では急速に凝固が進み、前方からの液流は溶融池に流れ込む結果、アンダカットビードが形成される。

4. アンダカットビード形成の防止法

以上に述べた実験研究の結果として、ティグ溶接の高速化に対しては低圧雰囲気によるアーク圧力の低減が有効であることを明らかにしたが、さらに低圧雰囲気下で高速化を図るには大電流・高速条件で発生するアンダカットビードを抑制する必要がある。ここではアンダカットビードの発生が溶融池前部におけるガウジング面の形成と射流による溶融池の急激な後退に起因することに着目し、トーチを進行方向に傾斜させることにより高温陰極域とアーク圧力の作用方向を変化させた場合の効果について検討する。

Fig. 8 はアンダカットビードの発生する高速条件下で

トーチ前進角 θ を変化させた場合の溶融池形状のうち典型例として $\theta=0^\circ$ と $\theta=45^\circ$ の場合を示したものである。トーチを傾斜させた場合にも陰極域は電極の軸方向に維持されるので、高温陰極域は母板上では前方に広がった長円状に接する。またアーク圧力の作用する方向も斜め前方に傾くため、微弱ではあるがプラズマ気流が溶融金属を前方へ吹き流すように作用する。その結果、トーチを傾斜させない場合と比べると相対的に溶融池が前方に形成され、アーク圧力の中心が溶融池のほぼ中央に作用することになり、溶融池前面におけるガウジング面の発生が抑制される。

Fig. 8 Typical bead formation at high current region under different inclined torch angles

Fig. 9 にトーチを傾斜させた場合の正常ビードの得られる条件範囲を示している。正常ビードの得られる条件範囲は θ の増大とともに大電流・高速側に拡大される。いま、 $\theta=0^\circ$ および 45° において、正常ビードの得られる溶接条件 (a) および (b) から矢印のように溶接電流および溶接速度を増大させた場合のビード形態の変化はつぎの通りである。まず電流値の増大に対して、 $\theta=0^\circ$ では、アーク圧力の増大のため溶融金属が後退して溶融池の前部にガウジング面が露出し、アンダカットビードになるのに対して、 $\theta=45^\circ$ の場合には、溶融池前部が溶融金属で満たされるためアンダカットビードの形成はかなりの高電流まで抑制されるが、遂には増大したアーク圧力のため最大アーク圧力部で溶融金属が底部固体面上を周辺部に向かってランダムに流れる Random Flow Region が形成される結果、ティグ形ハンピングビードとなる。すなわち $\theta=45^\circ$ では電流が増大しても $\theta=0^\circ$ の場合にみたアンダカットビードおよびミグ形ハンピングビードは経過せず、正常ビード域はティグ形ハンピングビードに移行する。つぎに溶接速度の増大に対しては、 $\theta=0^\circ$ では熱源位置が溶融池前部に偏り射流が発生するため、アンダカットビードに変化するのに対して、 $\theta=$

45° では相対的に溶融池が前方に形成されアーク圧力の中心が溶融池のほぼ中央に作用するため、高速域まで正常ビードが得られる。

$\theta=25^\circ$ の場合には溶融池を前方に形成させる効果が $\theta=45^\circ$ の場合より弱いので、 $\theta=0^\circ$ と $\theta=45^\circ$ の中間の条件でアンダカットビードに変化する。また $\theta=-25^\circ$ と後退角をつけた場合には、プラズマ気流が溶融池を後方に吹き流すように作用し射流の発生を助長するため、 $\theta=0^\circ$ の場合より小電流・低速側でアンダカットビードに変化する。

一方大気圧下のティグ溶接の場合には、狭い条件域内では低圧下の場合と同様の効果があるものの、アーク圧力が大きいので前進角を設けてもアーク直下に空孔が発生しやすく、しかも溶融金属が前方で球状に盛り上がり、不連続的に溶融池に流れ込むため、同様な電極設定では 200 A 以上の電流条件で正常ビード域の拡大は期待できない。

Fig. 9 Enlargement of welding condition range for normal bead by inclined torch angle

以上のように低圧雰囲気下でトーチを傾斜させることにより正常ビード域を拡大できることが確認できた。トーチに前進角を設けることにより溶込みの減少は避けられないが、ミグ溶接ビードの平滑仕上げ処理や薄板重ね継手の高速溶接などに対しては十分実用に供するものと判断される。

5. 総 括

低圧ティグアークの低アーク圧力特性に注目して、大気圧ティグアークとの比較のもとに低圧ティグアークによるビード形成現象について検討し、とくに高速溶接時に発生するアンダカットビードの形成機構とその防止法

に関して詳細に究明した。結果を要約するとつぎの通りである。

(1) 低圧ティグアークによるビード形態の変遷はアーク電流および溶接速度に対して大気圧ティグアークの場合と基本的には同じである。すなわちそのビード形態はアーク圧力により溶融池前部に薄い液層で覆われたガウジング領域が発生する F. G. 線 (Front Gouging の発生条件) と、大きなアーク圧力のために溶融池表面が押し下げられ、陰極域直下の溶融金属が底部固体面上を周辺部に向かってランダムに流れる領域が形成され、それが局部的に凝固するため溶融池の定常的な進行が阻止され、溶込み底部に空孔を形成し始める B. V. 線 (Bottom Vacancy の発生条件) とで区分される。

(2) 低圧条件下ではアーク圧力が弱いので、大気圧条件下と比較して F. G. 線および B. V. 線が大電流・高速条件側に移行し、正常ビード形成域は大幅に拡大される。

(3) 正常ビードからアンダカットビードへの遷移条件下では、幅広く浅い正常ビードから、いったんガウジング面が形成されると溶融金属が後退して陰極域に対応した狭幅の深い溶込みへと急変する。陰極域とほぼ接している最大溶融幅位置までガウジング面で占められると、陰極域から離れたガウジング域周辺部では急速に凝固が

進み、前方からの液流は溶融池の後方中央部に流れ込む結果、アンダカットビードが形成される。

(4) アンダカットビードにおけるガウジング面上では数 $10\mu\text{m}$ の厚さの射流が形成されており、ガウジング面発生後の急激な溶融池の後退は、溶融金属の重力ヘッドに対してアーク圧力と表面張力反力に射流効果を加えた力の釣合いが成立する結果であると考えられる。

(5) アンダカットビード形成の防止法としては低圧条件下でトーチに前進角を設けることが有効であり、この方法により B. V. 線まで正常ビード形成域を拡大させることが可能である。

謝 辞

本研究の遂行にあたっては、大阪大学工学部、西口公之教授、黄地尚義助教授の御指導を仰いだ。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 島田, 町田: 低圧 TIG アークの特性と母板の基本的溶融現象, 本誌, 48-10 (1979), 786~792
- 2) T. H. Hazlett; Effect of Individual Ingredients on Surface Tension of Iron Electrodes, Welding Journal Vol. 35, No. 3 (1956), 113s~114s
- 3) Victor L. Streetler; Handbook of Fluid Dynamics, McGraw-Hill Book Co., New York, (1961), 24-35~24-41

電子ビーム溶接におけるハンピングビード形成現象(第1報)*

—ビーム焦点位置の影響—

塚本 進**, 入江宏定** 橋本達哉***, 稲垣道夫**

Humping Bead Formation in Electron Beam Welding (Report 1)*

—Effect of Focal Position on Humping Bead Formation—

by Susumu Tsukamoto**, Hirosada Irie** Tatsuya Hashimoto**, and Michio Inagaki**

The mechanism of humping bead formation in electron beam welding was investigated. In the first part, the process of humping bead formation was clarified by high-speed cine-camera. In the second, the effect of focal position was discussed. The obtained results were as follows.

1) Humping bead was apt to be formed when the focal point was just on or slightly below the weld surface.

*原稿受付 昭和56年7月21日 (第23回電子ビーム溶接研究委員会にて発表)

**正 員 金属材料技術研究所 Member, National Research Institute for Metals

***正 員 金属材料技術研究所 (現在芝浦工業大学)
(Present Address: Shibaura Institute of Technology)