論 説

UDC621.791.753.9

MAG溶接の気孔防止とスパッタ防止特性 に及ぼすパルス溶接条件の影響

竹内宥公*

Influence of Pulse Conditions in Metal Active Gas Arc Welding upon Spatter Loss and Porosity

Yukou Takeuchi

Synopsis

An investigation was carried out about the influence of pulse conditions of MAG welding (CO_2 , $\text{Ar}+20\text{CO}_2$, $\text{Ar}-\text{O}_2$, $\text{Ar}+2.4\%\text{O}_2+20\%\text{CO}_2$) upon spatter loss and porosity. And the test results are as follows.

- (1) Pulse welding with conditions of $I_{av}=250\text{A}$, $I_p=500\text{A}$, $N=300\text{Hz}$, in $\text{Ar}+2.4\%\text{O}_2+20\%\text{CO}_2$, is found to decrease the spatter loss dramatically.
- (2) Pulse welding with condition of $I_{av}=250\text{A}$, $I_p=500\text{A}$, $N=300\text{Hz}$, in $\text{Ar}+2.4\%\text{O}_2+20\%\text{CO}_2$, is found to decrease the blowholes in weld metal to zero per 10cm bead.
- (3) Welding with pulse condition of $I_{av}=250\text{A}$, $I_p=500\text{A}$, $N=250\text{Hz}$ is found to increase the wire melting rate to 1.5 times higher than the welding with no pulse.
- (4) Suitable wire composition for no blowhole and no spatter in MAG welding is $\text{DD50S;0.05C-0.5Si-1.3Mn-0.05Ti}$.
- (5) Applying the pulse welding to the primer coated plates, it is found that the new inorganic zinc rich primer coated plates can be welding with condition of $I_{av}=250$, $I_p=500\text{A}$, $N=300\text{Hz}$, $\text{Ar}+2.4\%\text{O}_2+20\%\text{CO}_2$.

1. 結 言

軟鋼及び 50kgf/mm^2 級ハイテン鋼の溶接は、ガス被包アーク溶接法が高効率で経済的であるため、各種機械類の溶接に多用されている。しかし、その主力溶接法である CO_2 溶接法はスパッタ

(Photo. 1) が多い欠点があり、ビード外観がやや劣る欠点がある¹⁾。ロボット化に伴いその改善が望まれるようになった。これらの改善を図ったのが $\text{Ar}+20\%\text{CO}_2$ ガスを使用する MAG 溶接であるが、スプレー移行と短絡移行の中間電流域 ($250\sim 275\text{A}$) では、まだ、スパッタが多く気孔 (Photo. 1) の発生もみられる。また、 $\text{Ar}+3\%\text{O}_2$ ガスを使用した MAG 溶接の場合は、さらに、気孔が発生しやすいという欠点がある。このため、

昭和59年1月12日 受付

*大同特殊鋼株式会社中央研究所

Photo. 1. Samples of spatter and porosity.

Table 1. Plate for welding test

Thickness	Grade	Size (mm)
9	SS41	9×50×500
12	SS41	12×50×500

自動車工業界などで、ロボット化の浸透に伴い、スパッタ及び気孔が皆無でかつ、高能率、高品質な溶接が望まれている。

パルス電流を重畳したMAG溶接法には、スプレー電流と短絡電流との両領域の中間域でもスパッタの減少を期待できるが、パルス波形、パルス条件、溶接ワイヤの組成のスパッタ量への影響度及び気孔発生に対する影響度は明らかでない。そこで、本研究ではパルス条件、送給ガス、ワイヤ組成がスパッタ量、気孔発生に及ぼす影響について調べた。

2. 実験方法

2.1 供試材

実験に用いた被溶接材料は、SS41相当のフラットバー(Table 1)である。塗装鋼板としては同一材料の表面に約20 μ m厚さの新無機ジンクリッチプライマー(Table 2)を塗装したものをを用いた。

溶接ワイヤとしては、大同特殊鋼㈱で開発したDD50Sを主として使用した。ワイヤ組成の影響を調べるためには、Ti含有量とSi含有量が若干異なる試作ワイヤa)~e)を用いた(Table 3)。

Table 2. Main compositions of tested primers.

	Element	Wt(%)
New inorganic zinc rich primer	Zinc powder	40
	Electric conductive pigment	10
	Ethyl silicate	30
	Other pigment	20
Organic zinc rich primer	Zinc powder	90
	Epoxy resin	10

Table 3. Compositions of welding wire

	C	Si	Mn	P	S	Ti
a)	0.06	0.53	1.27	0.004	0.011	0.02
b)	0.07	0.54	1.28	0.004	0.005	0.04
c)	0.05	0.70	1.24	0.013	0.010	0.02
d)	0.08	0.68	1.29	0.015	0.010	0.01
e)	0.07	0.71	1.27	0.014	0.011	0.06
DD50S	0.06	0.55	1.30	0.010	0.010	0.05

2.2 被包ガス

被包ガスとしては、主として、Ar+3%O₂(粗アルゴン)、Ar+2.4%O₂+20%CO₂(80%粗アルゴン+20%炭酸ガス)、80%Ar+20%CO₂及び100%CO₂ガスを用いた。これらの混合ガスは純アルゴン、酸素ガス、粗アルゴン(Ar+3%O₂)及び炭酸ガスを混合して得た。必要に応じてCO₂とO₂の混合比を上記以外の5、10、15%などに変

Fig. 1. Principle of pulse MAG (Metal Active Gas Arc) Welding.

化させた。

2.3 溶接方法

実験に採用したガス被包アーク溶接法の原理を Fig. 1 に示す。定速度送給のワイヤに電源のプラス端子を接続し、被溶接物（鋼板）にマイナス端子を接続して上記の各被包ガス中でアーク溶接した。

通常の溶接では直流定電圧電源を用い所定の電流値で溶接するが、本研究ではパルス電流波形として矩形 (Fig. 2) 状パルス電流をベース電流に重畳した。溶接電源には、直流アナログ式トランジスタ電源（大阪変圧器製 TR800）を用いた。ベース電流は 50A 一定値とし、ピーク電流値と周波数とを変数として、つまり、アーク電流値およびパルス幅を種々変化して、平均電流値を常に 250A 一定にした。このような条件の下でピーク電流値と周波数とがスパッタ発生、気孔発生に及ぼす影響について調べた。

平均電流、ピーク電流、ベース電流間の関係は次式(1)で表わされる。

$$I_{av} = \frac{T_P I_P + T_B I_B}{T_P + T_B} \dots\dots\dots (1)$$

I_{av} : 平均電流値 (250A 一定)

I_B : ベース電流値 (50A 一定)

I_P : ピーク電流値(A)

T_P : ピーク電流幅時間 (ms)

T_B : ベース電流幅時間 (ms)

従って、パルスの周波数を 50, 100, 150……400 Hz とし、ピーク電流値を 700, 600, 500……300A

Fig. 2. Example of pulse current.

Fig. 3. Copper box for gathering spatter.

とした場合、組合わせは Table 4 のごとくとなる。実験はピーク電流値 500A の全組合わせと、パルスの周波数 250Hz の全組合わせについて行った。例えば、 $I_P=500A$ 、周波数 50Hz では、 $T_P=8.9ms$ 、 $T_B=11.1ms$ であり、周波数 250Hz・ $I_P=600A$ では、 $T_P=1.5ms$ 、 $T_B=2.6ms$ である。

2.4 スパッタ測定法

スパッタが多いとスパッタはノズルに付着して、ついにはガス導入口を閉塞してしまう。あるいは、被溶接物に付着してこれを除去するため工数を増してしまう。ロボット化においては、スパッタ除去のために人手を要するようになっては、ロボット化の意味がない。

スパッタ量の測定は、Fig. 3 の銅製ボックスを用いて捕集した。約 2 分間に発生するスパッタを全量及び大粒 (0.8mmφ 以上の付着しやすいもの) と小粒 (0.8mmφ 未満のあまり付着しないもの) に篩分けして重量測定した。スパッタ量のなかにはノズル及びコンタクトチップに付着したものも含めて測定した。

2.5 気孔数測定法

溶接を終了したテストピース 9mm²、12mm² 溶接板については、X線透過試験を行った。直径

Table 4. Relationship among (I_p), (T_p), (T_B) and pulse cycle(Hz)

I_p (A)	T_p, T_B	Hz							
		50	100	150	200	250	300	350	400
300	T_p	16	8	5.3	4	3.2	2.7	2.3	2
	T_B	4	2	1.3	1	0.8	0.7	0.6	0.5
400	T_p	11.4	5.7	3.8	2.9	2.3	1.9	1.6	1.4
	T_B	8.6	4.3	2.9	2.1	1.7	1.4	1.2	1.1
500	T_p	8.9	4.4	3.0	2.2	1.8	1.5	1.3	1.1
	T_B	11.1	5.6	3.7	2.8	2.2	1.8	1.6	1.4
600	T_p	7.3	3.6	2.4	1.8	1.5	1.2	1.0	0.9
	T_B	12.7	6.4	4.2	3.2	2.6	2.1	1.8	1.6
700	T_p	6.2	3.1	2.1	1.5	1.2	1.0	0.9	0.8
	T_B	13.8	6.9	4.6	3.5	2.8	2.3	2.0	1.7

Unit : ms

0.1mm以上の気孔を計測し、ビード長さ100mm当りの気孔数として表示した。X線透過写真の撮影条件は、9mm¹の場合160kV-5mA-60sec, 12mm¹の場合180kV-5mA-60secとした。

2.6 全溶着鋼の引張り試験,シャルビ衝撃試験方法

平均電流250A, ピーク電流500A一定として, パルス周波数を100Hz, 200Hz……500Hzに変化させ, パルス数の影響を調べた。肉盛層数は6層(13パス)として, 溶接部中心位置から引張試験とシャルビ試験を行った。同時に化学分析試験をも行った。

3. 実験結果

従来法の場合について溶接電流とスパッタ発生

量との関係をFig. 4に示す。また, 従来法のうちのCO₂ MAG法の場合について溶接電流とスパッタのサイズと量との関係をFig. 5に示す。スパッタが最も多量となる250A時の値は, 150A時の約10倍にもなり, 母材に付着しやすい大粒スパッタ(0.8mm ϕ 仕上)の量の比率も30%と高い。100~400A各電流値のうち250Aはスパッタが最も多いので, この250A時のスパッタを減少させる方法を探した。

ノンパルス溶接時の250Aのスパッタ量と被包ガス組成との関係をFig. 6に示す。試験した被包ガスの中では, CO₂ガスが最もスパッタが多く, 次いで, Ar+20% CO₂, Ar+2.4% O₂+20% CO₂ガスである。最もスパッタが少いガス組成は, Ar+3% O₂ガスであるが, このガスでは, 気孔発生が

Fig. 4. Spatter losses in various G.M.A.W.

Fig. 5. Spatter loss in CO₂ welding.

Fig. 6. Spatter losses in condition of 250A G.M.A.W.

Fig. 7. Relationship between porosity and shielding gasses.

みられ、Fig. 7 のように 250A 時の気孔発生量は零にならない。
パルス重量の MAG 溶接では、スパッタと気孔

とがともに無しになることが期待され、本研究では、パルスと被包ガスの種類の効果を調べることにした。

Fig. 8. Influence of pulse condition on spatter loss and porosity in Ar-CO₂ MAG.

Fig. 8, 9, 10 に Ar+20% CO₂ の場合, Ar+3% O₂ の場合, Ar+2.4% O₂+20% CO₂ の場合のスパッタ発生量, 気孔発生量に及ぼすパルス周波数, パルスピーク電流値の影響を示す。例えば, Ar+20% CO₂ の場合には, パルス周波数 250Hz, ピーク電流値 500A とするとスパッタ, 気孔ともに最少になることが認められた。他のガスの場合も類似の傾向が認められたが, 全条件のなかで, 最も効果的に低スパッタ, 低気孔が得られた条件は, Ar+2.4% O₂+20% CO₂ ガスの場合であり, そのパルス周波数は 300Hz, ピーク電流値は 500~600A であった (Fig. 10 (b)参照)。

気孔発生に対するワイヤ組成の影響を調べた結果を Fig. 11 に示す。ワイヤの Si 含有量と Ti 含有量とは気孔発生に大きな影響力がある。Si=0.5%, Ti=0.04~0.06% のとき, MAG 溶接部の気孔を最も少なくできるが, Fig. 11 に示すごとくパルス重畳 MAG 溶接を行うことにより, 従来法によ

る溶接では気孔が発生する 0.7Si-0.06Ti ワイヤを用いても気孔の発生が防止できることがわかった。即ち, パルス重畳の気孔発生に及ぼす影響力は大きなものがあり, ノーパルス溶接の場合に気孔発生が最も少なかった 0.5Si-0.05Ti ワイヤを用いてパルス重畳溶接を行うことにより気孔の発生がより安定して防止できる。

パルス周波数と溶接金属の機械的性質との関係を Fig. 12 に示す。周波数 300Hz までは, 周波数が増すと溶着鋼のじん性は向上し, 同時に, 脱酸現象も進行している。引張強度に及ぼす影響は小さく, むしろ, ワイヤ組成の影響が大きく現われる。例えば, Fig. 13, Fig. 14 に示すごとくパルス重畳溶接の場合でも 0.7Si-0.06Ti ワイヤでは, 0.5Si-0.05Ti ワイヤに対して約 10kg/mm² の強度差を持つかわりにじん性は逆に大巾に低くなった。

溶接能率は, 一般的にワイヤの熔融速度が増加すれば向上する。Fig. 15 にパルス溶接時のピーク

Fig. 9. Influence of pulse condition on spatter loss and porosity in Ar-O₂ MIG.

電流値とワイヤ溶融量との関係を示す。平均電流を250A一定としても、ピーク電流値を増すとワイヤ溶融量は1.5倍程度にまで増加する。すなわち、パルス溶接では高能率溶接が可能であることが判った。

4. 考 察

4.1 高スパッタ発生域

Fig. 16 に MAG 溶接時の溶接電流値と単位時間当りに移行する溶滴の数との関係を引用例によって示す。例えば Ar-13% CO₂-3% O₂ 被包ガス溶接の場合短絡移行が円滑にできる電流値(150A)から順次スプレー移行への臨界電流値 I_{tr} に近づくと短絡移行と粒滴移行との中間域、すなわち、溶滴数が少ない領域に至る。更に I_{tr} (275A) に達すると、細粒のスプレー状態となり、

スパッタは少くなる。この時の滴は、ワイヤ径より細かく、ワイヤ軸方向に滴が移行する特長がある。スパッタ発生上問題点は、溶滴数の少ない I_{tr} 直下の電流域であり滴が大きくなること及び短絡が時々起ることで、これが原因してスパッタ量が多くなると考えられる。

各種条件下での臨界電流値 I_{tr} を Fig. 17 に示す。臨界電流値直下の電流値でスパッタが最も多くなると考えると Fig. 4 の結果はよく説明がつく。例えば、Ar-20% CO₂ の雰囲気での I_{tr} は 260A であり、最多スパッタ電流値は 250A である。両者はよく一致している。Ar+30% CO₂ の場合、Ar+20% CO₂、ワイヤ径 1.6mmφ の場合について、Fig. 16 から最多スパッタ電流域を推定すると前者は 300~320A、後者は 300~340A であろうことが推定される。事実、この電流域でスパッタ

Fig. 10(a). Influence of pulse condition on spatter loss and porosity in Ar-O₂-CO₂.

Fig. 10(b). Relationship between spatter loss and pulse conditions. {Ar+2.4O₂+20 % CO₂}

Fig. 11. Influence of Ti and Si content in wire on porosity of MAG weld bead.

Fig. 13. Influence of Ti and Si content in wire on tensile strength of pulse MAG weld.

Fig. 12. Influence of pulse conditions on weld metal composition and toughness.

Fig. 14. Influence of Ti and Si content in wire on Charpy energy of pulse MAG weld.

が多いことが確認されている。

しかし、パルス溶接は、このスパッタを減らしうるとの考えで実験を進めた。

4.2 パルス重畳によるスパッタの減少

小滴無短絡の移行状態が実現できれば、 I_{tr} 以上でなくともスプレー移行となりスパッタは少なくなる。パルス重畳時のピーク電流値を I_{tr} より高くとり十分な時間持続すると滴が移行し、パルスにコントロールされた小滴移行を得てスプレー移行が得られる⁴⁾ (Fig. 18)。1パルスで1溶滴の移

Fig. 15. Influence of pulse condition on wire melting rate.

Fig. 16. The transition (I_{tr}) short arc/spray of binary and ternary Ar- CO_2 -mixtures.

行が得られることが制御上好ましい。1パルスで1溶滴移行するか多溶滴移行するかの境界条件は(2)式と言われる⁴⁾。(Fig. 18 (b)参照)。

$$(I_p/I_{tr})^{7.86} \cdot T_p = 5.14 \quad \dots\dots\dots(2)$$

I_p : ピーク電流値

I_{tr} : 臨界電流値

T_p : ピーク電流幅

1パルス1溶滴になる電流一周波数領域を図示すると Fig. 19 となる。Ar+2.4% O_2 +20% CO_2 の場合 $I_p=500\text{A}$ とすると 250~400Hz, $I_p=600\text{A}$

Fig. 17. Transition current (I_{tr}) short arc/spray arc in various atmosphere.

Fig. 18(a). Relationship among pulse duration, pulse current and transfer mode of droplet.

とすると 300Hz 以上である。このうち、スパッタの最少となった条件は Fig. 10 (b)から $I_p=500$, 周波数=300Hz であることから、最少スパッタ条件は、 I_p が I_{tr} の約2倍で、1パルス1溶滴と1パルス多溶滴との境界近傍にあるものと思われる。

4.3 パルス重畳による気孔発生の低減

Fig. 18(b). Relation between pulse duration and pulse current of one to multi droplets transition limit.

短絡現象を伴う溶接の場合の爆発現象が気孔発生に関与していると考えられた。しかし、この爆発現象のなくなる安定化スプレー状態になれば気孔の発生がなくなるわけではなく、やや不安定なスプレー状態つまり1パルス1溶滴（ガス組成 $\text{Ar}+2.4\% \text{O}_2+20\% \text{CO}_2$ では、 $I_p=500\text{A}$, 250Hz 又は $I_p=600\text{A}$, 300Hz のとき）気泡が浮上しやすいため、最も気孔が少なくなると考えることができる。

4.4 パルス重量によるワイヤ溶融速度の増大

ワイヤ溶融速度は、電流に比例する量とジュール熱（電流の2乗）に比例しかつ突出し長さに比例する量とに分けられ、次式(3)で表わされる⁵⁾。

$$V_w = (20-8A) + 0.116A^{0.3}I + (2.15 \times 10^{-5}/A^{0.88}) \times E \cdot I^2$$

V_w = ワイヤ溶融速度

I : 溶接電流(A)

E : 突出し長さ (mm)

A : ワイヤ断面積 (mm^2)

従って、パルス溶接の場合は

$$V_w = (20-8A) + 0.116A^{0.3} \left\{ \frac{T_p}{T_p + T_B} (I_p) + \frac{T_B}{T_p + T_B} (I_B) \right\} + \frac{2.15 \times 10^{-5} E}{A^{0.88}} \cdot \left\{ \frac{(I_p)^2 T_p}{T_p + T_B} + \frac{(I_B)^2 T_B}{T_p + T_B} \right\}$$

Fig. 19. Relationship between pulse cycle and peak current of one to multi droplets transition limit. [$\text{Ar}+2.4\% \text{O}_2+20\% \text{CO}_2$]

$$+ \frac{(I_B)^2 T_B}{T_p + T_B} \}$$

となる。電流と突出し長さが一定として比較するとジュール熱増加分は

直流：パルス = $(I_p T_p + I_B T_B)^2 : (I_p T_p + I_B T_B)^2 + (I_p - I_B)^2 T_p T_B$ となり、 $(I_p - I_B)^2 T_p T_B$ がパルスのジュール熱増加分である。Fig. 14 のワイヤ溶融量増加分は、周波数が一定 ($T_p \times T_B = \text{一定}$) であるため $(I_p - I_B)^2$ に比例する量と解釈することができる。

4.5 ワイヤ組成と気孔の発生

Fig. 11 から、気孔減少、気孔防止には、Ti 添加と Si 減少が有効であることが判った。Ti は、アークを発生しやすくし、短絡的爆発現象の防止に役立ったと思われる。一方、Si 量は Ti 量と相互に働き、気泡を浮上させやすい程度に表面張力を調整することに役立ったと思われる。

5. パルス MAG 溶接法の塗装鋼板溶接への応用

前述の各実験結果を総合すると次に示す条件のパルス溶接を行うことにより、高能率な、気孔発生が少ない耐スパッタ性の優れた溶接を行うことができると言える。

- (1) ガスとしては粗 $\text{Ar}+20\% \text{CO}_2$ ($\text{Ar}+2.4\% \text{O}_2+20\% \text{CO}_2$) が優れる。
- (2) パルス条件としては、ピーク電流 500~600A パルス周波数 300Hz, ベース電流 50A (平均電流 250A) が適切である。
- (3) 0.5Si-1.3Mn-0.05Ti ワイヤを用いてパルス

Fig. 20. Comparison among CO₂, Ar-20%CO₂ welding and pulse MAG welding.

溶接することによって、Fig. 20 に示すごとく経済的で品質の優れた溶接部を得られる。

そこで、応用例として塗装鋼板をパルス溶接し、気孔の発生状態を調べた。

新無機ジンクリッチプライマと称する Zn 含有量の少ない（約40%）塗料（Table 2）を 20 μ m 厚さにフラットバーの上に塗装した。この鋼板を上記最良パルス条件で隅肉溶接した。

比較試験の結果を Fig. 21, Photo. 2 に示す。気孔の発生数は、プライマーの種類、ワイヤ成分、パルス条件に影響されており、有機ジンクリッチプライマ（従来のプライマ）と比べて新無機ジンクリッチプライマは気孔数が少なく、パルス無しと比べるとパルス MAG 溶接はさらに気孔が少なく、Si 含有量が多く Ti を含有しないワイヤと比べると、0.5Si-0.05% Ti ワイヤではさらに気孔が少なくなることが認められる。気孔の少ない場合の

X 線透過写真を Photo. 2 に示したが、パルス MAG 溶接のすばらしい効果がここに明らかにされた。

6. 結 言

通常、スパッタと気孔の多く生ずる 250A の電流で、耐スパッタ性の向上、気孔発生を減少を期待してパルス MAG 溶接条件の影響を研究し、次の結果を得た。

- (i) Ar+2.4% O₂+20% CO₂ 組成の被包ガスのパルス MAG 溶接によってスパッタの発生は大幅に減少できる。

CO₂ 溶接で 0.8mm 径以上の大粒のスパッタ 3.1g/min、0.8mm 径より小径のスパッタ 1.0g/min であったものが、パルス MAG (Ar+2.4% O₂+20% CO₂) の場合は、0.16g/min（大粒）、0.02g/min（小粒）に減少した。

Fig. 21. Influence of wire composition and other conditions on porosity of pulse MAG fillet weld.

- (ii) パルス MAG 溶接によって、気孔の発生を低減することが可能である。

従来の MAG 溶接では 10cm ビード内に 6～25 個の気孔が存在するのに対して、パルス MAG 溶接では、0 個/10cm ビードである。

- (iii) パルス MAG 溶接では、同じ電流値でワイヤ溶融速度を 5 割も増すことができる。

CO₂ 溶接：73g/min

従来 MAG 溶接：66g/min

パルス MAG 溶接：103g/min

- (iv) 気孔発生の最も少ないワイヤ組成は 0.05C-0.5Si-1.3Mn-0.05Ti である。

- (v) 気孔の発生は、塗装鋼板の場合塗料の種類にも影響される新無機ジンクリッチ塗装を行い、最適パルス条件、適正ワイヤ組成条件の下で溶接を実施したところ、気孔を充分おさえた溶接が可能であることを実証することができた。

X-ray

Photo. 2. X ray photo. of fillet pulse weld on new inorganic zinc rich primer.

(文 献)

- 1) Prof. Masumoto, Okada, and Takeuchi: 1979 "Some Development of CO₂ Electrode Wires in Japan"
- 2) 竹内, 洞田: 電気製鋼, 51 (1980) 1, 34
- 3) H.U. Pomaska: IIW-1976-MTC, 16-2-1 "MIG/MAG の応用, 発展および経済的検討"
- 4) 大阪変圧器, 山本他: S 57.10, 第64回アーク物理研究委員会資料 "トランジスタ制御 MAG パルス溶接現象の検討" —溶滴のスプレー化条件—
- 5) 松田, 牛尾, 田中: 1982.12.2, 溶接法研究委員会資料 "パルス溶接の溶滴移行現象"