解説

Review

自動車部品の溶接における品質向上技術

松井仁志*

Technologies of High Quality Welding in Automotive Parts

Hitoshi Matsui

Synopsis

In high quality arc welding of chasis parts, the pulsed MAG welding method is an essential technology. So it has been improved extensively for robotised welding. Through a combination of a pulsed current waveform and improved wire properties, the droplet volume can be reduced to around half of conventional one. As a result the critical speed to spatter- and defect-free welding is increased. On the other hand by using a wire reforming type torch, the deflection of the wire tip can extensively be restricted and controlled to aim at the target position in joints. As to welding galvanised steel, the vibration of the molten metal pool controlled by the arc force is effective for removal of porosities.

1 . 緒 言

自動車の溶接には抵抗溶接およびアーク溶接を始め、摩擦溶接、レーザ溶接、ろう付等、多種多様な溶接法がとり入れられている。その理由としては、自動車部品の材質、および溶接継手形状が多岐にわたること、製品が比較的小さいために装置上の制約が少なく、溶接方法の選択の幅が広いこと等が挙げられ、各溶接法の進歩の段階に合わせ、各々の部品に最適な溶接法が採用されている。

シャシー部品に関しては殆どがアーク溶接で組み立てられているが、それは以下の理由による。溶接アークは、電極がワークに対して非接触であり、エネルギー分布もレーザビームのような極度な集中性を持たず、電極の移動によってワークの表面を自由な軌跡で加熱できるという特性から、他の溶接法に比べて、継手形状や設備構成に対する柔軟性、薄板プレス部品の誤差吸収能力等、複雑な形状を持つ自動車部品の溶接に適した多くの長所を有する。その中でもガスメタルアーク溶接は、ティグ溶接やプラズマ溶接等の他のアーク溶接には無い高能率性を有し、量産ラインにおいてアーク溶接の特性を最も発揮できる溶接法として、大半の部品に適用されている。その結果として、溶接長で見ると乗用車 1 台当たりで 30 ないし 40m、

小型トラックでは約 70m にも達している。

最近では自動車の品質不具合が大きな経営問題にまで発展するケースが見られ、溶接においても特にシャシー部品の品質確保は重要な課題となっている。ここではシャシー部品へのガスメタルアーク溶接において、車両の軽量化に対応しながらこれまでに実用化されてきた品質向上技術について紹介する。

2 . 材料および継手形状の変遷

1970 年代後半以降、シャシー部品では軽量化を進めるため、従来の普通鋼板が次々と高張力鋼板や亜鉛めっき鋼板に置き換えられ、薄肉化が図られてきた。その結果板厚は現在 1 ないし 3mm が大半となっている。継手形状としては Fig.1 に見られるように、従来はフランジ付き構造の重ねすみ肉継手が主であったが、最近では軽量化と剛性向上を両立させるために、箱形断面構造の重ねすみ肉継手に移行している。したがって溶接姿勢も下向きすみ肉から横向きすみ肉へ移行し、溶融池の保持が困難な状況におかれているものが多い。ブラケット類については T すみ肉継手に移行しつつあり、母材の溶込み品質が継手間隙あるいはワイヤ狙いの変動によって大きく影響される¹⁾。また、亜鉛めっき鋼板の溶接においては、溶接中に亜鉛が気化してス

2001 年 4 月 12 日受付

* トヨタ自動車㈱第 5 生技部、工博 (Dr., Eng., Metal Forming, Welding & Heat Treatment Eng. Div., TOYOTA MOTER CORPORATION)

Fig.1. Transition of joint structures in chassis parts.

パッタが増加したり、あるいは溶接部に気孔が残留する等の問題が生じる。

3. 自動化の経緯

1960年代半ばには溶接の対象になっていたほとんどの部品において、炭酸ガス溶接が適用された。円弧や直線の単純な溶接線に対しては専用自動機に全自動溶接が適用される一方、複雑な溶接線に対しては半自動溶接が適用されるというように各々使い分けられてきた。自動車部品における溶接自動化率は、溶接が全て1層溶接で行われることから、全溶接長のうち全自動溶接を行った溶接長の割合で定義している。Fig.2に示すように1980年代初頭のロボット導入以前では、全自動溶接の割合は専用自動機によって30%程度を占めていたに過ぎないが、半自動溶接からロボット溶接への置き換えによって、1990年頃には溶接自動化率はほぼ100%になった。

ロボット導入の目的は、過酷な作業環境および単純な繰返し作業からの解放、人件費の抑制、熟練差から生じる品質バラツキの低減等にあるが、特に自動車産業においては、2交替制における人件費抑制効果への期待と、単純な繰返し作業がロボットに適しており、据え置き型のロボットでほとんどの部品が溶接できるという事情から、他産業よりもはるかに普及が早かった。

半自動溶接からロボット溶接への置き換えの効果としては、溶接速度の向上とともに、Fig.3に示すように手振れに伴う不整ビードの激減が挙げられる。反面、安全対策等のため作業者と溶接トーチとが隔離されたため、トーチのメンテナンスや継手に対するワイヤ狙いずれなどの新たな問題が発生した²⁾。

4. 溶接法の変遷

ロボット導入時における主な問題は、継手と溶接ワイヤ狙い位置との不一致による溶込み不足、継手間隙の変動による穴開きや溶落ち、およびトーチメンテナンスによるライン稼働率の低下等であり、特に同じ不良が連続して大量

Fig.2. Transition of automated ratio in arc welding.

Fig.3. Effects of robotised welding.

に発生することが大きな問題であった。そこで溶接法としては、ワイヤ先端のずれと継手変動の影響を緩和するために、炭酸ガス溶接法に代わって、炭酸ガスにアルゴンを混合したマグ溶接法を採用し、母材の溶込みが浅く広くなる特性を利用してきた。現在は大半がマグ溶接に置き換わっている。これを溶接材料の使用量で示したのがFig.4である。このようにマグ溶接が普及したものの、スパッタの問題はシールドガスが換わっただけで容易に解決するわけではなく、Fig.5に示すように溶接設備の停止時間の大部分は、ノズル交換や設備故障などスパッタの発生に起因するものである。これを解決するには、後に述べるように、電源等の機器の開発が重要となってくる。

ロボット溶接への対応策としてマグ溶接を採り入れたわけであるが、溶接法の選択によってその後の技術の進む方向は大きく異なってくる。これには二つの流れがあり、シールドガスのコストに対する見方によって分かれる。一つはガス自体の価格を重視した炭酸ガス溶接における技術改良であり、他方は、ガスを含めたトータルコストの判断によって、アルゴン混合ガスを用いたマグ溶接の利点を追求する流れである。

炭酸ガス溶接においては、スパッタの発生が最大の問題となり、その低減を目的として、インバータ制御式電源の改良等が進められてきている。しかし実際の量産ラインにおける効果は未だ充分でなく、溶接トーチのノズルやチップの損傷、あるいは治具のトラブルによる、メンテナンス工数、補助材料、および保守部品等のコストアップ要因を抱えている。

これに対してマグ溶接においては、パルス電源の併用によって、電流 1 パルス毎にワイヤ溶滴を 1 個形成する、短絡を伴わない溶滴移行制御が可能であり、スパッタの発生防止は比較的容易に達成できる。その波及効果として、設備のメンテナンスが容易になり、混合ガスのコストアップ分を充分吸収できることが実証されてきた。

Fig.4. Extension of MIG/MAG welding.

Fig.5. Ratio of loss time by stoppage factors.

5. パルスマグ溶接における品質向上技術

自動車部品の溶接においては比較的溶接速度が大であり、薄板であることから溶融池が小さい。そのため、瞬時のアーク不安定が溶接欠陥に直結する。したがって Fig.6

に示すような、ワイヤの溶滴移行やコンタクトチューブ先端での送給速度、ワイヤ先端の狙い位置、コンタクトチューブの給電位置等の溶接品質に影響する諸因子の制御が、厚板を扱う他産業に比べて特に重要な課題となってくる。そのためには、システムを構成する各要素の信頼性を飛躍的に高める必要がある。また一方では、種々の変動が溶接結果に与える影響を、緩和するような技術改良も必要である。

Fig.6. Factors affect welding phenomena.

5.1 溶滴移行の制御

パルスマグ溶接の溶滴移行制御については、高速高エネルギーとスパッタ低減との両立を図るため、溶滴に作用する電磁ピンチ力およびワイヤ溶滴物性の制御の観点から、電源およびワイヤが開発実用化されている³⁾。Fig.7 には従来のトランジスタチョップ式電源によるパルス電流波形(A)、およびインバータ式電源によるパルス電流波形(B)を示している。また、Fig.8 にはワイヤ成分によって溶滴におけるアーク発生範囲を絞りさらに粘度を低下させて、溶滴形成に必要なパルス時間を短くした結果を示している。Fig.7 および Fig.8 の成果として、溶滴の体積は従来の約 2 分の 1 になった。これによって短絡限界のアーク長が短くなることから、Fig.9 に示すように、ワイヤ供給速度一定のもとで、スパッタおよびビード欠陥が発生しない高速溶接領域が約 10% 拡大する。この限界速度はワイヤを十分に供給することによって、Fig.10 に示すように、さらに 20%

以上増大する。

これらの効果を得るには、アーク電圧が一定に保たれていることが前提になる。しかし実際の製造現場では、二次ケーブルの長さおよび太さが異なる場合が多く、またロボットのティーチング誤差や継手間隙の変動、あるいはコンタクトチューブの摩耗やワイヤの曲率変動によって、実質的な突出し長さが変化するなど、種々の変動要因があるため、ワイヤ母材間の電圧を一定に保つことは困難である。そこでベース電流時に微小な短絡を生じさせ、これを電流あるいは電圧の変化で検出して、アーク長を適正に維持する制御を行っている⁴⁾。Fig.11にはこのような制御の有無による短絡状態の違いを示している。

Fig.7. Pulse shape condition of one drop by one pulse.

Fig.8. Effect of wire compositions on droplet formation.

Fig.9. Enlargement of normal range by refining droplets.

Fig.10. Extension of high speed and high efficiency limits.

set voltage	conventional method	adaptive control of arc length
24.5V		
26V		
27.5V		
28.5V		
I=250A 1.2mmφ Ar+20%CO ₂		convergent voltage 26.5V

Fig.11. Effect of adaptive control on arc length.

5.2 ワイヤ狙い精度の向上

従来はペイルバックワイヤとストレートトーチを用い、曲率の小さいワイヤをできるだけそのままトーチから送り出す考え方で行われていた。しかし、トーチの中でワイヤがストレートであると、コンタクトチューブとの接触不足によって焼き付きを生じ、送給抵抗の変動あるいはコンタクトチューブの早期摩耗が問題となる。また、ロボット溶接においては、手首を捻る等の複雑な動作によって、コンジットの中のワイヤが曲がってしまう。チップとの接触を確実にしようとする、スプール巻のワイヤを用いなければならないが、この場合はワイヤが曲がっていることと、やはりロボットの動作によってワイヤが捻られ、継手を正確に狙うことはできない。そこで Fig.12 に示すように、スプールワイヤあるいはコンジットで曲げられるワイヤの曲率よりも、さらに大きな曲率を持つように、トーチの中でワイヤに変形を与えるようにした。しかも S 字形状のように 2 段のカーブを組み合わせており、コンジットの中のワイヤが捻られても、トーチ先端のワイヤが回転することがない。このようなワイヤ成型型トーチでは、Fig.13 に示すように、トーチから送り出されるワイヤの曲率と方向が、コンジット内での変形履歴に依らず一定となる⁵⁾。

5.3 ワイヤ送給の安定化

ワイヤの供給速度が変動すると、アーク長が変動し、さらにこれに伴った電流変動も生じる。これらはスパッタ発生および溶込みの変動、あるいは高速溶接における不整ビードの発生につながる。供給速度の安定化のためには、十分な送給力を確保できるモータの選定が必要であることは勿論であるが、その上で生じる変動の要因には主に二つある。

一つは送給ローラとワイヤとのスリップである。特にロボット溶接ではコンジットの曲がりによる送給抵抗が大きく、ワイヤを確実にグリップするためには、Fig.14 に示すような 4 ローラ送給装置の使用が望ましい。

もう一つはコンジットの中に収容されるワイヤ全長の変動である。トーチ先端のワイヤを押し込めた状態と引っ張った状態とでは、突出し長さに 10mm 程度の差がある。したがって、トーチあるいはコンジットの摩擦抵抗が時々刻々変化すると、これに伴って、トーチ先端でのワイヤ速度が変動することになる。これを防止するためには、トーチにブルモータを取り付ける手段もあるが、トーチ回りに自由度が無くなり、プッシュモータと連動した複雑な制御も必要となる等、新たな問題も生じる。これに対してより簡素な方法として、トーチに適度な送給抵抗を与える方法

Fig.12. Wire reforming type torch.

	straight torch	wire reforming type torch
rotation angle of torch 180°
rotation angle of torch 360°

Fig.13. Deflection of a wire tip when a feed wire is twisted.

が考えられ、Fig.12 に示したワイヤ成型型トーチは、その役割を兼ねることができる。ワイヤ送給速度の安定性を評価するには、実際の速度を溶接中に測定する方法もあるが、溶接現象としては溶接電流およびアーク電圧の変動で

評価できる。Fig.15にはワイヤ成型型トーチを用いた場合と、これに対して送給抵抗の小さいストレートトーチに、ストレートなペイルバックワイヤ、および給電の確実なスプール巻ワイヤを用いた場合の、電流と電圧を示した⁵⁾。このように溶接現象が安定化すると、薄板領域においてもアークセンサ等の適応制御技術が、本来の性能を発揮するようになるものと思われる。

Fig.14. 4 roller push type wire feeder.

Fig.15. Comparison of fluctuation of voltage and current depending on torch shapes and wire curvatures.

5.4 条件変動の許容度拡大

各種の条件変動の溶接品質への影響を緩和する方策としては、溶着量増大と熱源分散が基本となる。特に薄板溶接においては、穴開きビードの発生防止と溶込み確保の両立を図るうえで重要な方策である。板厚が2mm以下の領域においては、マグ溶接からミグ溶接に移行し、溶込みをさらに浅く広くする必要がある。ミグ溶接では、溶込み深さが一定となる電流について比較すると、マグ溶接よりも電流が約30%高くなり、したがってこれに比例した溶着量の増大が得られ、継手間隙やアーク長の変動による溶込みの変動が緩和される。

なお、メタルコアードワイヤを用いると、電流一定の条件ではソリッドワイヤに対して10%近くの溶着量の増大

が得られ、これを併用して穴開き防止策をさらに強化することも可能である。

6. 亜鉛めっき鋼板の溶接品質向上技術

6.1 気孔およびスパッタの発生防止

亜鉛めっき鋼板は、部品の薄肉軽量化を図るうえで重要な材料であるが、これをアーク溶接するとスパッタの増加とブローホールの発生が問題となる。この問題の原因は沸点の低い亜鉛が、溶接中に気化することにある。

溶融池前方の亜鉛に対してはアーク直下に亜鉛が入り込まないように、溶接時の熱で気化させる方策が有効である。その対策例をFig.16およびFig.17に示す。パルスマグ溶接およびピーク電流の高いパルス波形の採用によってアークタイム率が増大するため、気孔およびスパッタが低減している⁶⁾。

また、継手間隙の亜鉛に対しては、シールドガスに酸素を添加して、昇華点の高い酸化亜鉛にし、気化を抑制する方策をとっている。その対策効果をFig.18に示す。間隙がある場合にはそこにシールドガスが流れ込み、酸素を5%程度混合した場合に最も効果が得られる⁷⁾。

しかし母材が密着している場合はあまり効果が無く、板合わせ部から流入する亜鉛ガスを溶融池から排出する必要がある。この場合は溶融池を前後方向に振動させ、その湯流れによって溶融池底面を基点としている気泡を掻き出すことを基本方策とした。溶融池を振動させる方法をFig.19に示す。1パルス1溶滴の溶滴移行現象を安定に維持しつつ、2パターンパルスのパルス波形を溶融池の固有振動周期に合わせて切り替え、溶融池に作用するアーク力を増減している。溶融池振動の効果をFig.20に示す⁸⁾。また、以上の手段を逐次追加した場合の気孔低減効果の推移をFig.21に示す。

Fig.16. Effect of difference in heat distribution on generated amount of porosities.

Fig.17. Effect of pulse current wave shape on generation rate of spatters.

Fig.18. Effect of adding oxygen into shielding gas with joint gap in fillet lap welding.

Fig.19. Setting of a pulse wave form under the conditions of one droplet transfer per pulse.

6.2 トーチメンテナンス性の向上

前述のように定常アークにおけるスパッタは低減することができたが、アークスタート時あるいは薄板垂鉛めっき鋼板においてはまだ充分ではなく、シールド不良による気孔の発生を防止するためには、トーチノズルのスパッタ

Fig.20. Effect of the periodical change of pulse wave form on reduction of porosities.

Fig.21. Effective measures on reduction of porosities.

清掃方法に抜本的な改良を加える必要がある。

従来から工具を用いた接触式の方法が多く考案され試行されてきたが、決定的な方法は出現していない。これらに対して Fig.22 に示すような、磁力によってスパッタを瞬時に吸引する、非接触式の自動除去システムが開発実用化され、トーチメンテナンスによる設備停止時間が大幅に短縮されるようになった⁹⁾。Fig.23 には除去されたスパッタおよびカーボンノズルを、また、Fig.24 には磁力を発生させるコイルおよびコンデンサ電源を示す。

7. 結 言

自動車部品にとって、消耗電極式アーク溶接法はよく適合している溶接法であり、これまでに開発した要素技術を結集すれば、量産ラインにおいてもかなり品質の安定した、高速溶接が可能になりつつある。しかしこれらの技術

Fig.22. Removal method of spatters by the suction of magnetic force.

Fig.23. Appearances of spatters and nozzle after removing action.

Fig.24. Equipment for generating of magnetic suction force.

はまだ広く普及したとは言い難く、今後も定着活動を継続していく必要があると考えている。

(文 献)

- 1) H. Matsui: 6th International Welding Symposium, vol.1, (1996), 287.
- 2) 松井: 溶接技術, 40-12(1992), 75.
- 3) 松井, 鈴木: 溶接学会論文集, 15(1997), 254.
- 4) 三田, 品田, 市川, 松井: 溶接技術, 44-10(1996), 101.
- 5) 松井, 服部: 溶接学会論文集, 16(1998), 282.
- 6) 松井, 山田: 溶接学会論文集, 15(1997), 484.
- 7) 松井, 鈴木, 山田: 溶接学会論文集, 15(1997), 476.
- 8) 松井, 塩野谷: 溶接学会論文集, 16(1998), 46.
- 9) 松井, 服部: 溶接学会論文集, 16(1998), 421.