

第6章 業界・製品別製造工程での泡トラブル対策

第7節 金属成形・加工・溶接工程

[8] 亜鉛めっき鋼板の溶接欠陥対策

中田 一博

大阪大学 接合科学研究所 加工システム研究部門
エネルギープロセス学分野 教授 工学博士

(株)技術情報協会

2014年2月発刊 「気泡・ボイドの発生メカニズムと未然防止・除去技術」抜刷

[8] 亜鉛めっき鋼板の溶接欠陥対策

はじめに

代表的な表面処理鋼板である亜鉛めっき鋼板は防錆鋼板として自動車車体等に用いられており、その溶接部には亜鉛めっきの蒸発に伴うブローホールやピットなどの空洞（気孔）欠陥が発生しやすい。本節ではその発生機構や防止対策について解説する。なお溶接法の詳細を含む解説は参考文献 1-4 を参照されたい。

1. 亜鉛めっき鋼板の溶接

本項では亜鉛めっき鋼板の種類、その溶接法と溶接に伴い発生する気孔欠陥とその発生機構などについて述べる。

1.1 亜鉛めっき鋼板の種類

亜鉛めっき鋼板は鋼板に亜鉛めっきを施したもので、自動車・輸送機器、建築・土木、電気機器等に使用される。製造法により溶融めっきと電気めっきに分けられ、また亜鉛めっきの材質で純亜鉛と亜鉛合金に大別される。

亜鉛めっき鋼板の需要が最も多いのは自動車・輸送機器用であり、主に亜鉛-鉄合金からなる合金化溶融亜鉛めっき（略号 GA）が用いられている。一方、純亜鉛からなる溶融亜鉛めっき（略号 GI）は亜鉛-アルミニウム合金や亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっき等とともに主にめっき層が厚い建築・土木用に用いられる。まためっき塗布量は目付量として表現され、自動車関係では $30 \sim 90 \text{ g/m}^2$ 、建築・土木関係では $60 \sim 200 \text{ g/m}^2$ である。

1.2 亜鉛めっき鋼板の溶接

代表的な自動車車体を例にとると、最も多く用いられているボディー部材は薄板であり、その主たる溶接法には抵抗溶接の一種であるスポット溶接やシーム溶接が用いられ、最近では一部でレーザブレイジングも用いられる。一方、シャーシ部材（足廻り部材）はこれよりも厚板となり、また形状も複雑なためにアーク溶接が適用される。亜鉛めっき鋼材に限らず一般に鋼板のアーク溶接にはガスシールドアーク溶接法が用いられ、シールドガスとして炭酸ガス（ CO_2 ）を用いる炭酸ガス溶接法とアルゴン（Ar）ガスに少量の炭酸ガスを混合したマグガス（Ar 80% + CO_2 20%）を用いるマグ溶接法がある。前者は、薄板溶接に適しているがスパッタが多い欠点がある。また後者はスパッタは減少するがアーク力が強いために溶接ビードの溶け落ちを起こしやすく、薄板溶接には不適當である。

1.3 亜鉛めっき鋼板の溶接欠陥

亜鉛は金属の中ではその沸点が融点に対して相対的に低い金属として知られており、融点は 420°C に対して沸点は 906°C である。一方、鉄は、融点 $1,536^\circ\text{C}$ に対して、沸点は $2,887^\circ\text{C}$ である。亜鉛めっき鋼板の溶接に際して、鉄を溶融すると鋼板の温度は簡単に亜鉛の沸点を越えてしまうために亜鉛蒸気が発生し、これが溶接欠陥である気孔を発生させる原因となる。この気孔には図 1 に示すように溶接ビード内部に形成されるブローホールと、ブローホールが溶接ビード表面にまで達してビード表面に穴が開いた状態のピットがある。自動車用部材で一般的な重ね継手を例にとると、その生成機構は図 2 のようになる。鋼材表面部の高温のアークに直接さらされる部分や熱影響部（HAZ）の高温に加熱される部分ではめっき層は溶融、蒸発し、いわゆるヒームとなって大気中に飛散するが溶接品質には特に影響は及ぼさない。一方、開先内部の溶融池底部の鋼材が重ねられた部分（ルート部）では、溶融池からの熱伝導により約 900°C 以上の高温に加熱された熱影響部においては、同様にめっき層の溶融・蒸発現象が発生する。このときルート部の隙間が無い場合には、蒸発した亜鉛蒸気は溶融金属が存在する溶融池内部に噴出することになり、これが溶融金属中に“泡（気泡）”を形成する。図 3 はアーク溶接中の溶融池周辺の溶接進行方向に沿った長手方向縦断面模式図である。溶融池内の溶融金属中に形成された気泡の一部は浮力や溶融金属内の対流により溶融池表面に運ばれ、そこで大気中に放出されるが、溶接中の溶融池は速い溶接速度で移動する為に急速に凝固し、いわゆる溶接ビードを形成する。このた

め大部分の気泡はそのまま凝固後の金属中に閉じ込められる。これがブローホールと呼ばれる溶接ビード内部の欠陥である。またルート部から熔融金属中に亜鉛蒸気が噴出した時にその圧力が十分に高い場合には気泡は伸張して溶融池表面にまで達し、亜鉛蒸気は大気中に抜けるが、その後がそのまま溶接ビード表面に穴の開いた状態で凝固後も残る場合があり、これがピットと呼ばれる欠陥となる。ブローホール及びピットはともに溶接継手強度の低下を招き、特にピットはビード表面に穴を形成しているためにその防止は溶接品質管理上、不可欠である。

なお、亜鉛めっき鋼板のアーク溶接では気孔欠陥以外にも、溶接中に熔融金属が小さな液滴となって飛び散るスパッタや亜鉛などの金属蒸気の酸化物などの煙（ヒューム）が一般鋼材の溶接時に比して著しく増加し、溶接作業性の低下や表面性状の品質低下をもたらす。これは亜鉛蒸気が溶融池内からアーク中へ噴出するに伴い溶接アークが乱れて、シールドも悪くなるためであり、ブローホール及びピットの防止と同様にその低減にも努める必要がある。

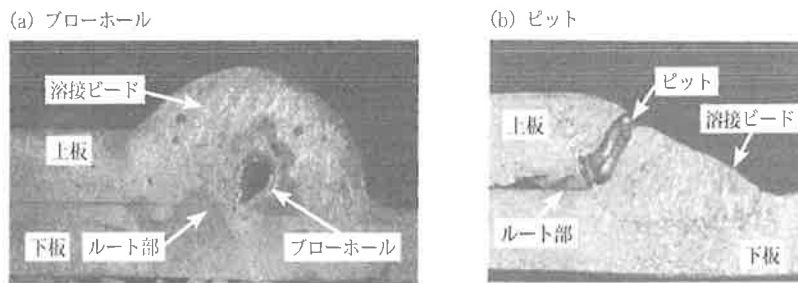


図1 亜鉛めっき鋼板重ね隅肉溶接部断面における気孔欠陥マクロ写真

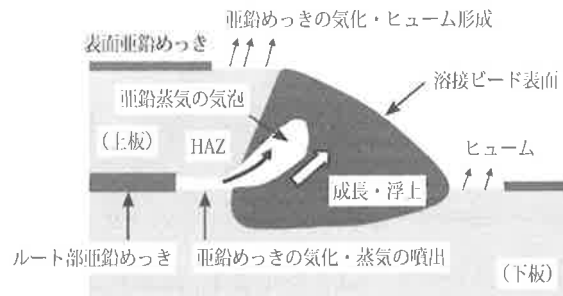


図2 ブローホールの発生機構（重ね隅肉溶接部横断面）

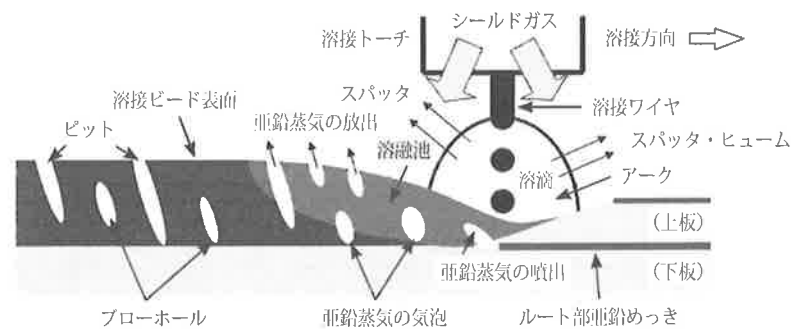


図3 ブローホール・ピットの形成機構模式図（重ね隅肉溶接部縦断面）

2. アーク溶接欠陥対策

亜鉛めっき鋼板の主要用途である自動車用部材に対して一般的に用いられる薄板の重ね隅肉継手におけるアーク溶接

を取り上げ、主たる溶接欠陥であるブローホール及びピット等の欠陥防止対策について継手形状、アーク溶接法、シールドガス等の観点から述べる。

2.1 ブローホール及びピット欠陥防止の基本的な考え方

気孔欠陥防止の基本的な考え方は以下の2点に集約される。これらの具体的な対策について以下の項で述べる。

①ブローホール及びピットの発生の主原因である亜鉛蒸気がルート部から溶融池へ噴出することを防止する。

これにはルート部の隙間制御や溶接前処理としてのめっき層の除去がある。

②溶融池内で形成されたブローホールの溶融池表面から大気中への放出・離脱を促進する。

これには溶融池内の溶融金属の粘性や対流、攪拌現象などが関係する。このため、溶接法、シールドガス、溶接ワイヤ、溶接条件などを総合的に制御する必要がある。

2.2 亜鉛蒸気のルート部から溶融池への噴出防止

図2で示したようにルート部で蒸発した亜鉛蒸気は、ルート部が密着して隙間が無ければ隣接する溶融池内へ噴出する。一方、図4に示すようにルート部が密着せずに適当な間隔が存在すれば、溶融池内に噴出することなく、隙間より重ね継手裏面へ放出され、ブローホールやピットは発生しない。このルート部の隙間は約0.5 mm以上であればブローホールやピットの発生は著しく低下することが知られているが^{5,6)}、実施工では間隔制御が困難とされる。

また根本的な対策として、建設関係等で亜鉛めっき目付量が数百g/m²にも達する極めて多い場合にはルート部等の亜鉛めっき層を予め削除する方法もある。

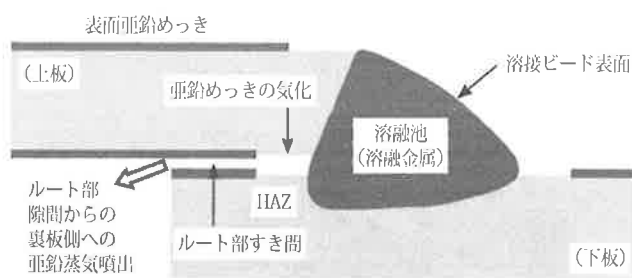


図4 ルート部隙間によるブローホールの発生防止機構（重ね隅肉溶接部横断面）

2.3 ブローホールの溶融池表面から大気中への放出・離脱の促進

表1に亜鉛めっき鋼板の溶接に一般的に用いられている炭酸ガス溶接とパルスマグ溶接の特徴をシールドガスや溶接材料と共に示す。

表1 ガスシールドアーク溶接法の特徴と亜鉛めっき鋼板への適用性

溶接法	炭酸ガス溶接	マグ溶接	パルスマグ溶接
シールドガス	炭酸ガス	Ar 80% + CO ₂ 20% 混合ガス	Ar 80% + CO ₂ 20% 混合ガス
溶接電源波形	定電圧波形	定電圧波形	パルス波形
シールドガスのコスト	低	高	高
溶接能率(溶接速度)	低	高	高
薄板への適用性	良好	不適當	良好
気孔欠陥	少	多	少
スパッタ・ヒューム	多	中程度	少
亜鉛めっき鋼板への適用性	良好	不適當	良好
溶接材料(ワイヤ)	・汎用もしくは亜鉛めっき鋼板用ソリッドワイヤ ・フラックス入りワイヤ(厚めっき用)	—	亜鉛めっき鋼板用のパルスマグ溶接用ソリッドワイヤ

炭酸ガス溶接は、シールドガスである炭酸が分解して酸素が溶融池内に混入し、溶融金属の粘性が低下するために溶融池内のブローホールが浮上しやすく、さらに溶けた溶接ワイヤ先端と溶融池表面が断続的に短絡して溶加材を供給する方式（短絡移行）であるために、本質的にアークが不規則に変動し溶融池の攪拌効果が期待でき、溶融池表面からのブローホールの離脱が促進される特長がある。なお、シールドガスである炭酸ガスのコストは安いですが、短絡部の爆発的な溶断に伴いスパッタが多くなる欠点がある。

一方、マグ溶接は、ワイヤ先端から離脱した溶滴が連続的にアーク中を溶融池表面まで移行する方式（スプレー移行）であり、アークは安定しているが Ar ガスベースのために溶融池への酸素の混入は少なく、溶融金属の粘性は高くなる。このためマグ溶接による亜鉛めっき鋼板の溶接ではブローホールやピットの発生が著しく多くなるために適用されない。

これに対して同じマグ溶接でも溶接電流を高低のパルス波形としたパルスマグ溶接は、スパッタの低減とともに平均溶接電流の低減により薄板溶接にも適用可能である。さらに亜鉛めっき溶接用にパルス波形を制御することにより、高電流時の強いアーク圧力によりアーク直下の溶融金属を溶融池の後方に押しつけて溶融池底部の溶融金属を少なくし（図3参照）、あるいは場合によってはルート部を露出させ、亜鉛蒸気の溶融池外部への離脱・放出を容易にすることにより、ブローホールやピットを低減し、同時にスパッタ、ヒュームの発生量の低減も図ることができる。このために溶接法と合わせて溶接ワイヤ組成やシールドガス組成の最適化が行われている^{7,8)}。さらにシールドガスに酸素を加えた Ar-20% CO₂-3~6% O₂ を用いて溶融金属の酸素量を増加させ、その粘性を低下させることにより目付量の多い亜鉛めっき鋼板にも適用可能となっている。

3. 新しい溶接法の適用

新しい溶接法として、低周波重畳パルス溶接法やレーザー・アークハイブリッド溶接法が亜鉛めっき鋼板の溶接に対して効果的であることが明らかにされている。前者は溶融池の固有振動数域である 10~30 Hz 程度の低周波数でのパルス溶接により溶融池の効率的な攪拌効果を活用する方法である⁹⁻¹⁰⁾。後者はアーク溶接中に溶融池前方縁の隅肉ルート部（図3参照）へレーザービームを照射し、局所的に加熱溶融することにより溶融池の前方で亜鉛めっきを蒸発させて、直接大気中に放出させるものである¹¹⁾。この方法では溶接速度の高速化も同時に可能となる。

文 献

- 1) 鈴木, 溶接技術, 54 巻 9 号, p. 124-130 (2006)
- 2) 鈴木, 溶接技術, 54 巻 10 号, p. 124-130 (2006)
- 3) 鈴木, 溶接技術, 54 巻 11 号, p. 112-124 (2006)
- 4) 鈴木, 溶接技術, 54 巻 12 号, p. 122-133 (2006)
- 5) 松井, 鈴木, 山田, 溶接学会論文集, 15 巻 3 号, p. 476-483 (1997)
- 6) 松井, 山田, 溶接学会論文集, 15 巻 3 号, p. 484-493 (1997)
- 7) 川本, 向井, 藤原, 溶接技術, 61 巻 4 号, p. 60-65 (2013)
- 8) 和泉, 山崎, 鈴木, 神戸製鋼技法, 63 巻 1 号, p. 54-59 (2013)
- 9) 山本, 原田, 上山, 小川, 松田, 中田, 溶接学会論文集, 12 巻 1 号, p. 64-69 (1994)
- 10) 松井, 塩野谷, 溶接学会論文集, 16 巻 1 号, p. 45-50 (1998)
- 11) 鷹尾ら, 溶接学会全国大会講演概要 73 巻, p. 32-33 (2003)