金属材料異材継手のアーク溶接技術*

丸山 敏治**

Arc Welding Technology for Dissimilar Joints*

by MARUYAMA Toshiharu**

キーワード

アーク溶接, 炭素鋼, 低合金鋼, ステンレス鋼, 異材溶接, 希釈, フェライト, 脱浸炭, ポンドマルテンサイト, シグマぜい化, Ni 基合金

1. はじめに

今日の近代産業の基盤を支える最も一般的な金属材料は鋼(炭素鋼)であるが, この炭素鋼の強度, 耐熱性を高めた低合金鋼や, 耐食性・耐酸化性を向上させたステンレス鋼等も, 火力・原子力等の発電プラントや化学工業プラント等に幅広く用いられている。よってステンレス鋼と炭素鋼, 低合金鋼等との異種金属の溶接(異材溶接)が必要になることは避けられず, 異材溶接は, 極めて重要な技術となっている。ここではステンレス鋼と炭素鋼, 低合金鋼の異材溶接を行う時の基本的な「考え方」と, 「留意点」について紹介する。

2. 異材溶接の種類と溶接材料

異種金属の溶接には, 突合せ, クラッド鋼, 肉盛溶接など種々あるが, 基本的な考え方は全て同じである。通常, 異材溶接には, いずれの母材とも異なった組成の溶接材料を用い, 溶接によって生じる溶接金属は両母材と溶接材料が或る割合で混合した組成となる。異材溶接のポイントは, 事前に母材と溶接材料組成から出来上がる溶接金属の組成を推測して, 溶接割れ等の溶接欠陥を防止しつつ, 溶接金属の特性が溶接後熱処理や使用環境で求められる特性に十分対応できるか否かを検討しておくことにある。表1に通常使用される異材溶接用の被覆アーク溶接棒の一例を示す。通常の異材溶接では, 被覆アーク溶接, MIG, MAG 溶接, TIG 溶接, 帯状電極肉盛溶接等の各種溶接法が使用され, また溶接材料は, 一般にはフェライトを比較的多く含有するオーステナイト系溶接材料を使用する。しかし溶接部が高温に曝されたり, 激

表1 異材溶接用被覆アーク溶接棒一例

母材組合せ一例		適用溶接材料の鋼種 または規格	
炭素鋼・低合金鋼	ステンレス鋼		
軟鋼 低合金鋼 (高張力鋼) (Cr-Mo鋼) 鋳鋼・鋳物	オーステナイト系 ステンレス鋼 SUS304/304L/347 SUS316/316L	D309/309L D309MoL D312	インネル系** 50Ni**
	マルテンサイト系 ステンレス鋼および フェライト系 ステンレス鋼 SUS405, 410, 430	D430Nb D309/309L	

** : 高温/熱サイクルが激しい場合

しい熱サイクルが加わるような場合はインコネル 600 系等の Ni 基溶接材料を使用する。一方フェライト系ステンレス鋼との異材溶接においては, 上記溶接材料の他に, D430Nb や D410Nb のようなフェライト系ステンレス鋼溶接材料を使用すること多い。

3. 溶接に伴う母材希釈と成分変化

異材溶接では, 溶接条件に影響される母材希釈(溶込み)率の変化や, 用いる溶接材料の種類によって溶接金属の組成が様々に変化し, 溶接金属の組織・特性も大きく変化する。このような組織変化に伴って異材溶接時に特徴的な種々の問題が生じることになる。

異材溶接では, 通常のオーステナイト系ステンレス鋼同士の溶接と同様に, 溶接金属組成を数%程度のフェライト相を含むオーステナイト組織にすることで耐割れ性の優れた安定した溶接施工が可能となる。異材溶接時に母材の希釈が大きくなるとフェライト量は減少し, 組織がオーステナイト単相になると高温割れが発生しやすく, 更に希釈が大きくなりマルテンサイト相が出現すると低温割れの感受性も高まってくる。逆にフェライト量が過度に多くなると溶接後熱処理や高温運転操作中の熱時効

*原稿受付 平成14年7月1日

**正 員 (株)神戸製鋼所 Member, Kobe Steel, Ltd.

図1 シェフラー組織図と異材溶接の問題点

異材溶接の模式図

図2 シェフラー組織図による異種溶接金属の組織推定

等によって、フェライト組織からシグマ相が出現し脆化が顕著になる。この為、高温で操業される機器の溶接部ではフェライト量を極力下げることが求められる。このような溶接金属組成と組織の関係、またその組織において生じやすい問題点を図1¹⁾のシェフラー組織図中に示す。溶接金属の組成から組織を推定するには、このシェフラー組織図のほかにディロン組織図やWRC 1992組織図²⁾等がよく用いられている。

詳細な説明は割愛するが、実際の異材溶接時の母材希釈に伴う溶接金属の組成変化とその組織の関係を推定する方法の一例を図2³⁾に示すので参考にされたい。

4. 異材溶接によって生じる基本的な問題点

ステンレス鋼と炭素鋼・低合金鋼の異材溶接時には以下に示す種々の注意すべき点がある。

4.1 溶接割れ

(1) 高温割れ

高温割れは溶接金属が凝固する際に、固相と液相の界面にP、S等の低融点不純物やそれらの化合物が偏析し、

図3 各材料フェライト含有量と割れ発生の関係

図4 異材溶接部におけるボンド（遷移層）の成分濃度分布（模式的）

ここに凝固に伴う収縮応力が作用して割れとなる現象である。このような凝固割れに対して、図3⁴⁾に示すようにオーステナイト系ステンレス鋼の場合は溶接金属に数%のフェライトを含有させることで大きな割れ改善効果があることが知られている。異材溶接において、通常309系の溶接材料を使用する理由は、炭素鋼・低合金鋼母材の希釈を受けた状態で、凝固過程で初晶としてデルタフェライト凝固し、凝固完了後に数%のフェライトが残留することを狙うためである。しかし、高炭素系の鋳鋼のような母材が相手の場合には、309系の溶接材料では十分な量のフェライト量を確保できないことがあり、309系よりも更に高フェライト設計の309 MoL系や312系溶接材料を使用する場合もある。

(2) 低温割れ

異材溶接時に炭素鋼・低合金鋼側母材の希釈が大きくなると、309系溶接材料を使用しても溶接金属はマルテンサイト相が生じる組成となる。マルテンサイト相は硬くかつ水素による遅れ割れ（低温割れ）感受性が非常に高

図5 各種ニッケル量を有する溶接棒によるビード溶接時のボンドマルテンサイトの生成状況

図6 引張拘束割れ (TRC) 試験結果の代表例

いたために、低温割れが発生し易い。これを防止するためには、使用する溶接材料や溶接法及び溶接条件を適切に選択してマルテンサイト相を出現させないか、あるいは十分な予熱・後熱等の熱管理を行う必要がある。

一方、希釈に問題が無くても異材溶接時には「ボンドマルテンサイトの生成」といった避けられない現象もある。ボンドマルテンサイトとは、図4⁵⁾に模式図として示すような、異材継手ボンド境界の溶接金属側に約数十 μm ～数百 μm の幅をもった部分で、母材と溶接金属の双方の組成が大きく変化する遷移領域であり、マルテンサイト状の非常に硬い組織が出現する。このボンドマルテンサイトの生成に対しては、溶接金属のNi量が増加すると図5⁶⁾に示すようにボンドマルテンサイトは生じにくくなる傾向がある。しかし、Ni基溶接材料を使用しても希釈条件によっては遷移部にボンドマルテンサイトが出現する場合もある。ボンドマルテンサイトが存在すると、図6⁷⁾に示すTRC試験結果からも分かるように、継手部の拘束度が大きい場合には遅れ割れ状の割れが発生することがある。通常、オーステナイト系の溶接材料を使用して溶接する場合、予・後熱は不要とされているが、異材溶接の場合は、母材材質や拘束状態によっては十分な熱管理が必要と考えるべきである。

4.2 溶接後熱処理による組織変化

異材継手は、残留応力の除去、組織改善を目的とした溶接後熱処理を行うことがある。しかし、熱処理温度等の条件次第では、残留応力は除去したものの溶接ボンド境

図7 異材溶接部の熱処理に伴う硬度変化一例

図8 熱処理を施した異材溶接部ボンド境界部ミクロ組織一例

図9 側曲げ試験のミクロ割れと熱処理条件の関係

界部での「脱炭層・浸炭層の生成」、溶接金属中での炭化物析出および「シグマ相の生成」等の種々の現象が現れることから注意が必要である。

図7⁸⁾は炭素鋼とステンレス鋼異材継手をD309で溶接し、溶接後熱処理を施した場合のボンド部近傍の硬さを示している。また、図8⁹⁾は溶接後熱処理後の異材継手ボンド部のミクロ組織を示している。熱処理により炭素鋼側熱影響部には脱炭現象が、ステンレス鋼溶接金属側は浸炭現象が生じており、浸炭領域の硬さは大きく上昇している。図9¹⁰⁾は炭素鋼上にD309で肉盛溶接した試験板の、溶接後熱処理条件と側曲げ試験における浸炭領域

図10 YF-309 L 2層盛り溶接金属のベンド割れに及ぼすSR条件とフェライト量の関係

表2 ステンレス鋼・Ni 基合金の熱膨張係数

材料	熱膨張係数 (10 ⁻⁶ /°C)*	備考
炭素鋼・低合金鋼	14.3	0.5Mo鋼
溶接材料	Ni基合金	Inconel600
	ステンレス系	308系
ステンレス鋼	18.7	SUS304

* 0~600℃

図11 異材継手の熱応力解析結果

での割れの発生状況を示したものであり、熱処理温度の上昇と熱処理時間の増加とともに割れが増加している。

一方、図10は2.25%Cr-1%Mo鋼上にD309で2層肉盛り溶接を行った場合の溶接後熱処理条件と側曲げ試験における2層目溶接金属の割れ発生状況を示したものである。この場合は、初層のD309溶接金属に割れはなく2層目のD309溶接金属のみに割れが生じている。これは、フェライト量の高い2層目のD309溶接金属中のフェライト相からシグマ相といわれる脆い金属間化合物が生じたためである。このような場合には2層目の溶接材料としてD308を使用すれば、脆化に伴う割れは解消できる。この様に異材継手を熱処理する場合には、溶接金属のフェライト量を高温割れが生じない範囲で低目に設定できるように、溶接材料と溶接条件の適切な選択と管理が重要である。

4.3 溶接部の熱応力

異材溶接部には、溶接施工による通常の残留応力の他に、両母材と溶接金属の熱膨張係数の差によって生じる熱応力が重畳される。表2に各種母材と溶接材料の熱膨張係数の一例を、図11⁹⁾にフェライト鋼とオーステナイト鋼管溶接金属境界の板厚方向の866Kにおける熱応力分布の解析例を示す。継手軸方向に熱膨張係数が緩やかに変化する溶接材料を使用するほうが発生熱応力は低いことが分かる。

熱応力や前述した炭化物、脱・浸炭層の形成などの問題から、異材継手部が700K以上の温度域で使用されたり、大きな熱サイクルを受けるような場合にはインコネル系Ni基合金の溶接材料が用いられることが多い。

5. 溶接施工技術

5.1 継手形状と溶接材料

代表的な異材の突合継手形状を表3⁹⁾に示す。炭素・低合金鋼母材にバタリングを行い溶接する場合と直接溶接する場合があるが母材の拘束度によって使い分けられている。バタリング溶接を行った場合は、その時点で熱処理を行うが、本溶接はオーステナイト系ステンレス鋼同士の溶接になるため、熱処理を省略することができる。

5.2 溶接施工

異材溶接でも一般の溶接と同様な施工法が適用される。

表3 異材溶接時の継手形状一例

符号	タイプⅠ	タイプⅡ	タイプⅢ	タイプⅣ
継手方法の種類	インコネルで継手溶接 ステンレス鋼 炭素鋼	インコネルで継手溶接 ステンレス鋼 炭素鋼	308でバタリング 308で継手溶接 308でバタリング ステンレス鋼(SUS304) 炭素鋼	308で継手溶接 ステンレス鋼 炭素鋼
手順	1) インコネルバタリング 2) SR 3) 継手溶接(インコネル)	1) 予熱してインコネルで継手溶接 3) SR 又はSR無し	1) 309系溶接材料でバタリング 2) 308系溶接材料でバタリング 3) SR 4) 継手溶接(308系溶接材料)	1) 予熱して309系溶接材料で継手溶接 2) SR 又はSR無し
品質評価	1)炭素移行	優	優	良
	2)熱応力	優	優	良
	3)耐食性	優	良	良
	4)ボンドの剝離割れ	優	良	良

図12 ガスシールドタイプのフラックス入りワイヤによる初層肉盛溶接部の溶込み率に及ぼす溶接電流と溶接速度の影響

図13 被覆アーク溶接法による第1層目の希釈率とビード重ね代の関係

しかし、母材の希釈が大きくなりやすいSAW法等を用いる場合には事前に最適な溶接条件を選定し、過大な希釈が生じないように注意する必要がある。

5.2.1 予熱

異材溶接での予熱温度は、各母材に要求されている温度の高いほうを選ぶのが基本である。しかし予熱温度が高すぎると、母材希釈が大きくなりやすいので注意が必要である。オーステナイト系の溶接材料を用いる時は、いずれの母材に対しても予熱温度は低く設定でき、母材が通常の炭素鋼程度であれば予熱なしで施工する場合も多い。しかし継手の拘束が大きく、母材が硬化し易い組成の場合には、低温割れや剥離割れの危険性があるので予熱を行ったり、予めバタリングが行われる。

5.2.2 溶接条件

異材溶接では炭素鋼・低合金鋼母材の希釈を過大とせず、所定の範囲以下に管理することが重要である。希釈に対して大きな影響を示す要因としては、溶接方法、溶接電流、溶接速度、溶接姿勢、ビードの重ね位置（肉盛り溶接）等が上げられる。図12³⁾に希釈率に及ぼす溶接電流と溶接速度の影響を示す。高電流・高速度な条件ほど希釈が大きくなりやすいことから、高能率な施工ほど注意する必要がある。また図13³⁾に示すように SMAW 法のよ

うなマニュアル施工の場合でも、ビードの重ね方によって希釈は大きく変化するので注意が必要である。

6. 溶接後熱処理

溶接後熱処理の目的は、残留応力の除去と水素放出である。通常、溶接後熱処理温度として 873 K~1023 K の温度が選ばれるが、この温度域では異材継手においては Cr 炭化物析出とこれに伴う耐食性劣化、シグマ相脆化や脱浸炭現象が問題となる。従って、異材継手での溶接後熱処理はできる限り省略することが望ましく、また熱処理を行う場合でも出来るだけ低目の温度を選んだり、予め低合金鋼側にオーステナイト鋼を肉盛して溶接後熱処理を行い、本継手溶接後には熱処理しないことが望ましい。しかしフェライト・マルテンサイト系ステンレス鋼と炭素鋼の異材溶接で、ステンレス母材と共金系溶接材料で溶接する時は、溶接部の性能改善の観点から溶接後熱処理は非常に重要であり、これを省略してはならない。溶接後熱処理が出来ない場合でも、溶接部の延性回復のためには直後熱処理を行うことが必要である。

7. あとがき

ステンレス鋼と炭素鋼・低合金鋼との異材溶接を行うためには、混合組織となる溶接金属の予測し、その溶接金属の特性を把握することが最も重要である。この点を考慮して溶接材料の選定、溶接条件の設定を行うことが異材溶接のキーポイントである。

今回異材溶接の基本的考え方と、異材溶接時に生じる種々の現象について紹介したが、これが実務の異材溶接を考える必要が生じたときの参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 橋本, 最近のステンレス鋼溶接施工技術の実際とその応用に関する講習会 (VIII)
- 2) D. J. Kotecki and T. A. Siewert, WRC-1992 Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metal: A modification of the WRC-1988 Diagram, Welding J., 71-5 (1992)
- 3) 西本和俊他, 「ステンレス鋼の溶接」, 溶接・接合選書11, 産報出版, p184
- 4) C. D. Lundin, W. T. Delong & D. F. Spond "Ferrite-Fissuring Relationship in Austenitic Stainless Steel Weld Metal", WRC Supplement August 1975, p241 s
- 5) 新成夫, 異種金属の溶接における問題点について, 溶接学会誌 vol. 45, No. 6, 1976
- 6) 井川博他, 溶接学会誌 vol. 43, No. 2, 1974, pp162-
- 7) 大前 他, 炭素鋼とオーステナイト鋼異材継手部の溶接割れについて, 溶接学会講演概要集, No. 21
- 8) 足立, 「鋼とステンレス鋼の溶接」, 溶接技術, vol. 21, No. 6, 1973
- 9) S. S. Long and F. V. Ellis, "Thermal Stress Analysis of Dissimilar Metal Weld" Properties of Steel Weldments for Elevation Temperature Containment Applications, ASME, (1978), pp. 77-90