

オーステナイト系ステンレス鋼の裏波溶接におよぼす N₂バックシールドの影響

Effect of N₂ back shielding on back bead welding of austenitic stainless steel

中野 正大* (技術統括部), 山口 ちひろ (技術統括部)
浜田 宏昭 (技術統括部)

Masahiro NAKANO*, Chihiro YAMAGUCHI, Hiroaki HAMADA
(Technology Control Department)

オーステナイト系ステンレス鋼の裏波溶接を行う場合には、裏波ビードの酸化を防止するために不活性ガスでバックシールドを行う必要がある。バックシールドガスには、Ar と同等の溶接継手の性能が得られ¹⁾、コストの低減ができる N₂ を使用する場合があるが、Ar を使用する場合が多い。そこで、改めてバックシールドガスに N₂ を使用した場合の影響を検討し、溶接継手およびガス置換の性能を評価した。その結果、溶接継手の性能はバックシールドガスが Ar と N₂ の場合で同等になるが、ガス置換の性能は Ar よりも N₂ の場合の方が優位になることが明らかになった。

When back bead welding on austenitic stainless steel, it is necessary to back shielding with an inert gas to prevent oxidation of the back bead. N₂ is sometimes used as a back shielding gas, as it can provide the same performance of welded joints as Ar and reduce costs, but Ar is often used¹⁾. Therefore, we reexamined the effects of using N₂ as the back shielding gas and evaluated the performance of welded joints and gas replacement. As a result, it was found that Ar and N₂ back shielding gases were equivalent in terms of the performance of welded joints, but N₂ was superior to Ar in terms of gas replacement performance.

1. はじめに

オーステナイト系ステンレス鋼製の圧力容器や配管を製造するにあたって、裏波溶接を行う場合には裏波ビードの酸化を防止するために不活性ガスでバックシールドを行う必要がある。バックシールドガスには、一般的に Ar を使用するが、N₂ を使用しても同等の溶接継手の性能が得られることから¹⁾、Ar の代替としてコストの低減ができる N₂ を使用する場合がある。一方、裏波溶接のバックシールドガスに N₂ を使用した場合は、初層溶接金属の N 含有量が増加することでフェライト量が低下し、初層溶接金属の凝固割れ感受性が高くなるおそれがある²⁾。

オーステナイト系ステンレス鋼の裏波溶接のバックシールドガスに N₂ を使用することは、消防庁(消防予第 11 号)³⁾、超高耐久オールステンレス共用部配管システムガイドライン⁴⁾、建設用ステンレス配管マニュアル⁵⁾、接合・溶接技術 Q&A1000²⁾、プラント圧力設備溶接補修指針⁶⁾、などに記載があり、いずれも肯定的な位置づけになっている。また、溶接施工法確認試験の JIS B 8285⁷⁾などでは、裏面か

らのガス保護(バックシールドガス)の区分は、裏面からのガス保護を行うか行わないかの区分になっており、ガスの種類は区分されていない。

ステンレス鋼の合金元素のひとつである N は、オーステナイト生成元素であり、C のように炭化物を生成しないことから固溶強化によってステンレス鋼の強度を向上させ、耐食性を高める効果があり、Ni の代替としても使用されている⁸⁾。また、二相ステンレス鋼のティグ溶接では、溶接金属の N 含有量を確保するためにトーチシールドガスの Ar に 2～5% の N₂ を混合したものを使用する場合がある^{9),10)}。

オーステナイト系ステンレス鋼の裏波溶接のバックシールドガスに N₂ を使用するにあたっては、問題ないから積極的に使用した方が良いとの意見に対して、凝固割れ感受性が高くなる、供用後の性能評価が難しい、長年実績のある Ar を使用したいといった意見がある。この議論は 1980 年代からされており、一部では N₂ を使用しているものの、Ar を使用する場合が多い。そこで、オーステナイト系ステンレス鋼の裏波溶接におよぼす N₂ バックシールドの影響を改めて検討し、溶接継手およびガス置換の性能を評価した。

* 九州工業大学 大学院 生命体工学研究科へ出向中

2. 溶接継手の性能

2.1 供試材

供試材にはオーステナイト系ステンレス鋼の SUS304TP-S-H を使用し、そのサイズは外径 165.2 mm (6B)、肉厚 11.0 mm (Sch.80) とした。溶加棒には YS308L を使用し、その棒径は 2.0 および 2.4 mm とした。表1に供試材および溶加棒の化学成分を示す。

2.2 実験方法

配管の水平固定管の突合せ溶接を想定して、バックシールドガスが Ar と N₂ の場合の溶接継手の性能を評価した。

表2に溶接条件を示す。

2.2.1 引張試験・曲げ試験

溶接継手部の引張試験を JIS Z 3121 に従って行った。試験片の形状は 1 号試験片とした。試験片の数は 2 本とし、引張強さはその平均値とした。

溶接継手部の裏曲げ試験を JIS Z 3122 に従って行った。試験片の数は 4 本とし、評価基準は JIS B 8285 の附属書 C の C.2.2 を参照した。

2.2.2 断面マイクロ組織の観察

溶接部の断面マイクロ組織を観察した。エッチング溶液には王水を用いた。フェライト量の測定方法は画像処理による面積比測定法とし、フェライト量は裏面から深さが 1.5 mm 付近の 5 視野 (撮影倍率 400 倍) の最大値と最小値を除く平均値を測定値とした。

2.2.3 硬さ試験

溶接金属断面のマイクロビッカース硬さ試験を行った。測定位置は溶接金属の中央とし、裏面から肉厚方向に 0.5 mm ピッチで 3 ラインとした。硬さは裏面からの距離が同じ 3 点の平均値を測定値とし、試験荷重は 4.903N とした。

2.2.4 N含有量の測定

溶接金属の N 含有量の測定を JIS G 1228 の附属書 5 に従って行った。測定位置は溶接金属の裏面側とし、裏面から深さ 3 mm までの範囲とした。

2.2.5 電子線マイクロアナライザによる元素分析

溶接金属の線分析および元素マッピングを電子線マイクロアナライザ (以下は EPMA と示す) で行った。観察位置は、線分析が溶接金属の中央とし、元素マッピングが裏面

から深さ 1.5 mm 付近とした。分析条件は、加速電圧が 15 kV、照射電流 1.0×10^{-7} A、単位測定時間 50 ms とした。

2.3 実験結果とその考察

表3に溶接継手の性能比較 (以前の実験結果¹⁾を併記) を、図1に裏波ビード部の外観を、図2に硬さ試験の結果を、図3に溶接部の断面マイクロ組織を示す。外観、浸透探傷試験、溶接継手部の引張強さ、裏曲げ試験、硬さ試験では、バックシールドガスが Ar と N₂ の場合のいずれにも優位性はみられなかった。

2.3.1 初層溶接金属のN含有量とフェライト量

初層溶接金属の N 含有量は、バックシールドガスが Ar の場合が 0.030 % で、N₂ の場合が 0.078 % であった。前者においても溶接金属には母材および溶接材料由来の N が含まれていた。一方、初層溶接金属のフェライト量は、バックシールドガスが Ar の場合が 10.6 % で、N₂ の場合が 8.8 % であった。すなわち、バックシールドガスを Ar から N₂ に変更することで、初層溶接金属の N 含有量が 0.048 % 多くなり、フェライト量が 1.8 % 少なくなった。

図4の DeLong の組織図¹¹⁾を用いて初層溶接金属のフェライト量を予測した。予測には、供試材および溶加棒の化学成分、ならびに N 含有量の実測値を使用した。希釈率を 22 % とすると、初層溶接金属のフェライト量は、バックシールドガスが Ar の場合が 9.5 % で、N₂ の場合が 5.5 % になった。

初層溶接金属のフェライト量は、実測値および予測値のいずれもバックシールドガスを Ar から N₂ に変更することで少なくなる傾向を示したが、裏波溶接の凝固割れ感受性が極めて高くなるような傾向はみられなかった。

表2 溶接条件

溶接法	ティグ溶接
溶接形状	突合せ溶接 (片面)
開先形状	V 形 (60 deg.)
溶接電流	70 A ~ 180 A
トーチシールドガス	Ar
バックシールドガス	Ar, N ₂
溶接姿勢	水平固定管 (PH)
予熱	なし
パス間温度	150 °C 以下
溶接後熱処理	なし
溶接入熱	1.3 ~ 3.6 kJ/mm

表1 供試材および溶加棒の化学成分

[mass %]

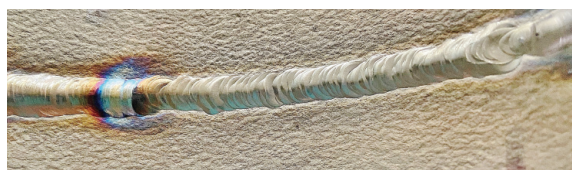
材料		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
供試材	SUS304	0.08	0.32	1.74	0.023	0.004	8.20	18.33	—	—	0.062
溶加棒	YS308L*	0.013	0.36	1.64	0.024	0.001	9.98	19.86	0.13	0.14	0.029
	YS308L**	0.015	0.38	1.58	0.022	0.001	10.00	19.94	0.085	0.15	0.021

* 棒径 2.4 mm, ** 棒径 2.0 mm

表3 溶接継手の性能比較

項目	本実験		以前の実験 ¹⁾	
バックシールドガス	Ar	N ₂	Ar	N ₂
外観*	良好	良好	良好	良好
浸透探傷試験*	割れなし	割れなし	—	—
溶接部の放射線透過試験	—	—	欠陥なし	欠陥なし
溶接継手部の引張強さ [MPa]	609	595	598	605
裏曲げ試験	合格	合格	合格	合格
溶接金属の衝撃試験 [J]	—	—	116	114
最終層の N 含有量	—	—	0.028	0.034
初層溶接金属の N 含有量 [%]	0.030	0.078	0.038	0.062
初層溶接金属のフェライト量 [%]	10.6	8.8	11.1	8.4
硫酸・硫酸銅腐食試験*	—	—	割れなし	割れなし
応力腐食割れ感受性試験*	—	—	割れなし	割れなし
孔食電位* [mV]	—	—	- 89	169

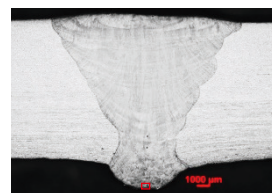
* 裏波ビード



(a) Ar

(b) N₂

図1 裏波ビードの外観



(a) Ar

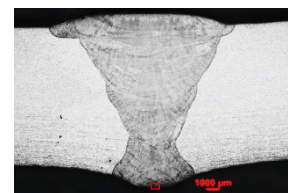
(b) N₂

図3 溶接部の断面マイクロ組織

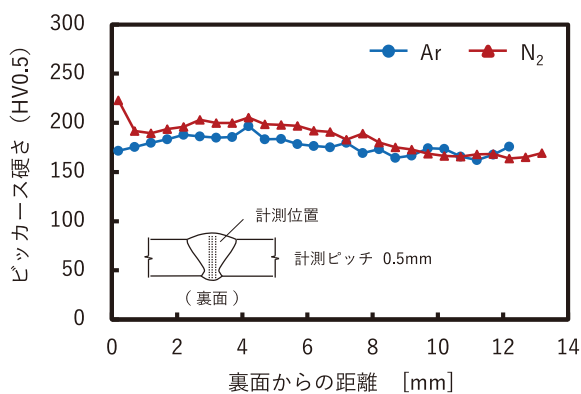


図2 溶接金属のビッカース硬さ

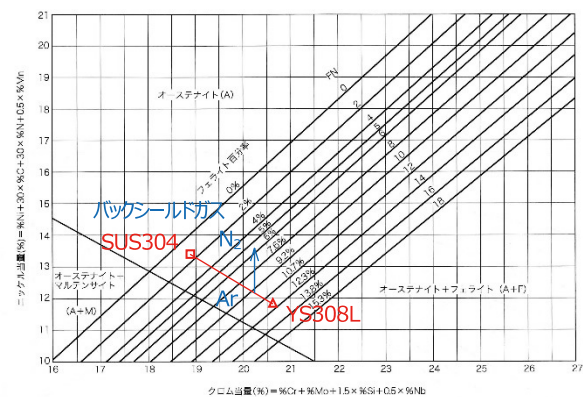


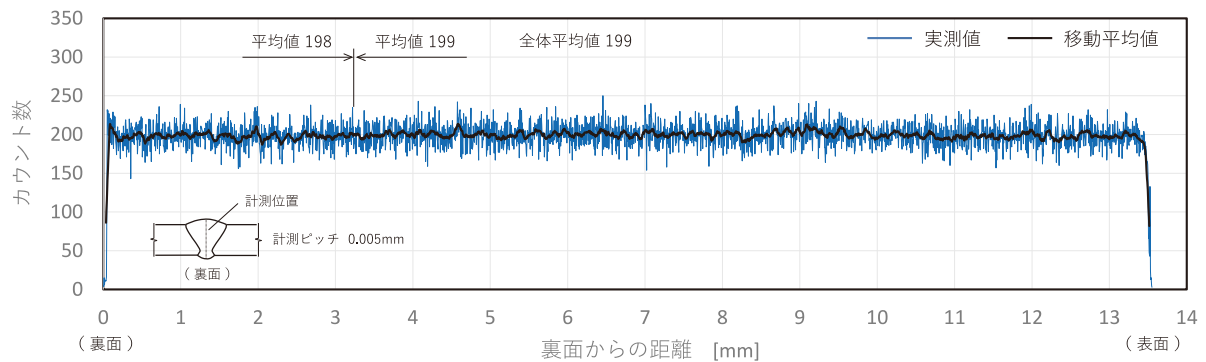
図4 DeLongの組織図によるフェライト量の予測

2.3.2 溶接金属の線分析と元素マッピング

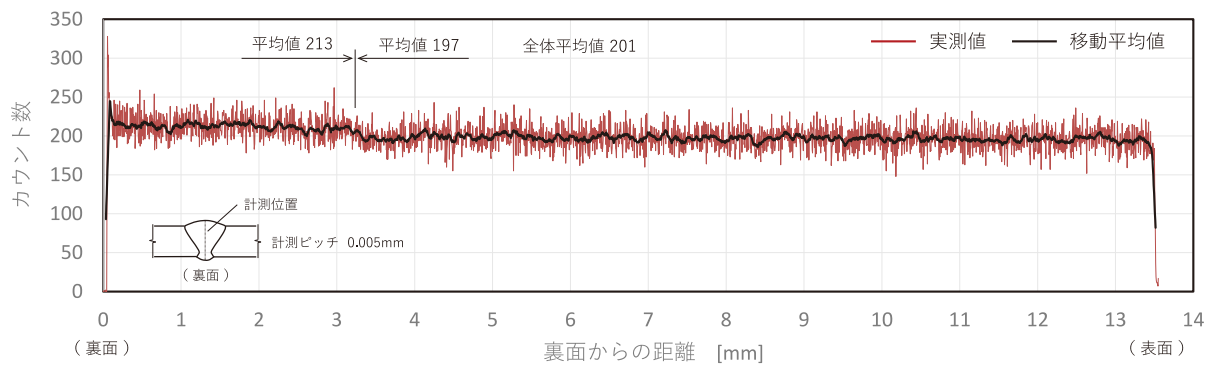
図5にEPMAによる溶接金属のN線分析の結果を示す。バックシールドガスがArの場合は裏面から表面までのカウント数の平均値が199で、N₂の場合は裏面から3.3mmまでのカウント数の平均値が213で、3.3mmから表面までのカウント数の平均値が197であった。裏面から3.3mmの範囲は図3(b)に示す初層溶接金属の範囲と概ね一致した。すな

わち、バックシールドガスがN₂の場合はNが溶接中に溶融池へ拡散することで初層溶接金属のN含有量が増加するが、初層溶接金属のNに大きな濃度勾配は発生しないことが明らかになった。

図6に初層溶接金属の元素マッピングを示す。バックシールドガスがArとN₂のいずれの場合でも、NにはCrやNiのような元素分配はみられなかった。

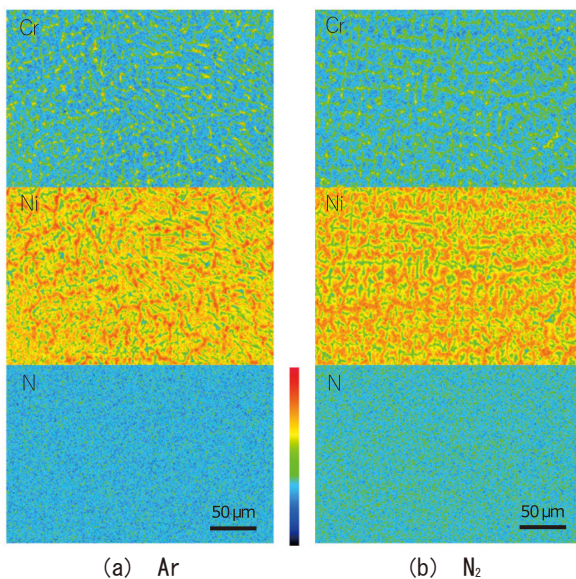


(a) Ar



(b) N₂

図5 EPMAによる溶接金属のN線分析



(a) Ar

(b) N₂

図6 初層溶接金属の元素マッピング

3. ガス置換の性能

3.1 実験方法

配管の外径が20B(508 mm)程度で、長さが1 mの水平固定管の突合せ溶接を想定して、バックシールドガスがArおよびN₂の場合のガス置換の性能を評価した。表4にガス置換の実験条件を示す。ガスの注入口は管端中央、ガスの

表4 ガス置換の実験条件		
溶接形状 (想定)		突合せ溶接 (片面)
溶接姿勢		水平固定管 (PH)
配管	材質	塩化ビニル管
	内径・長さ	490 mm・950 mm
	容積	180 L
バックシールドガス		Ar, N ₂
ガス流量		10, 15, 20, 25 L/min
流れ (焼結金属)		乱流(なし), 層流(あり)
置換時間を計測した酸素濃度		10, 5, 1, 0%

表5 酸素濃度計の仕様	
対象ガス	酸素
採取方式	自動吸引式
検知原理	隔膜ガルバニ電池式
測定範囲	0 ~ 25.0 vol %
指示精度	±0.3 vol %

排出口は反対側の管端上部とした。ここでは、ガスの注入口に何も付けない状態を乱流、焼結金属をつけた状態を層流と定義した。酸素濃度の測定位置は配管中央の上部とした。表5に酸素濃度計の仕様を示す。

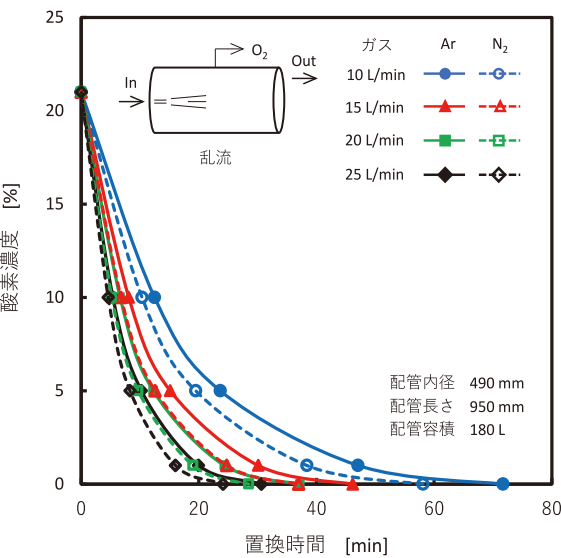
3.2 実験結果とその考察

3.2.1 置換時間におよぼすガスの種類と流量の影響

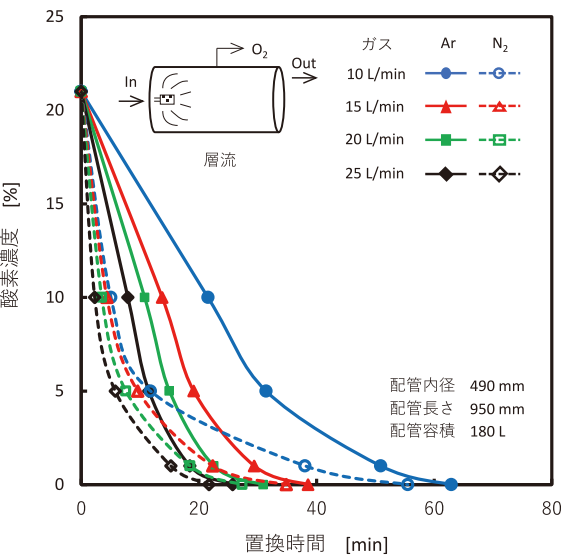
図7に置換時間におよぼすガスの種類と流量の影響を示す。酸素濃度が21%から0%程度までの置換時間（以下は置換終了時間と示す）は、乱流と層流のいずれにおいてもArよりもN₂の方が短く、ガス流量が多いほど短くなった。乱流では、酸素濃度の減少傾向はArとN₂で類似していた。一方、層流では、酸素濃度が21%から5%までの置換時間はArよりN₂の方がかなり短く、酸素濃度が5%から0%程度までの置換時間はArよりN₂の方が長くなる傾向がみられた。

3.2.2 置換終了時間、ガス使用量およびコストの比較

図8に置換終了時間とガス使用量の関係を示す。置換終



(a) 乱流



(b) 層流

図7 置換時間におよぼすガスの種類と流量の影響

了時間は、実験条件が10 L/min・Ar・乱流の場合が最も長く、25 L/min・N₂・層流の場合が最も短くなった。ガス使用量は、ガス流量を15 L/minにすると少なくなる傾向がみられ、ガス流量以外の条件ではN₂・層流の場合が少なく、Ar・乱流の場合が多くなった。なお、ガス使用量は容積(180 L)の平均で3.4倍であった。

表6にArに対するN₂の置換終了時間、ガス使用量およびコストの比率を示す。置換終了時間およびガス使用量の平均比率が0.84に、コストの平均比率が0.42になり、ガス置換の性能はArよりもN₂の方が優位になることが明らかになった。

3.2.3 置換時間におよぼすガスの注入順序の影響

バックシールドガスにArとN₂を自由に使用してもよい条件を想定して、置換時間におよぼすガスの注入順序の影響を検討した。図9に示すようにN₂→Arの順に注入すると置換終了時間はAr（変更なし）と同等になり、Ar→N₂の順に注入すると置換終了時間はN₂（変更なし）よりも短くなった。

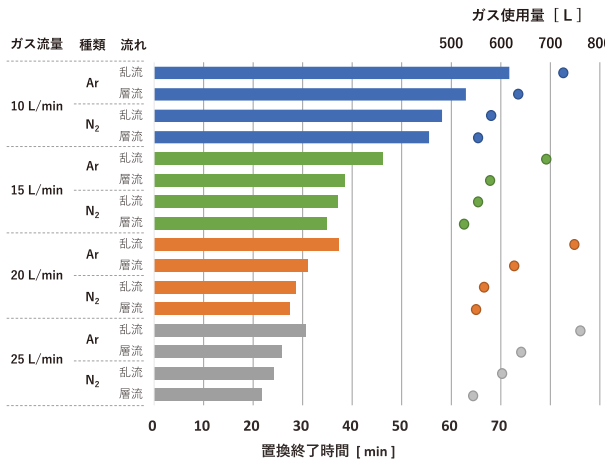


図8 置換終了時間とガス使用量の関係

表6 置換終了時間、ガス使用量およびコストの比率

種類	流れ	ガス 流量 [L/min]	Ar に対する比率	
			置換終了時間・ ガス使用量	コスト*
N ₂	乱流	10	0.81	0.40
		15	0.80	0.40
		20	0.77	0.38
		25	0.79	0.39
	層流	10	0.88	0.44
		15	0.90	0.45
		20	0.88	0.44
		25	0.84	0.42
Ave.		0.84	0.42	

* ガス単価の比率 Ar:N₂ = 1:0.5

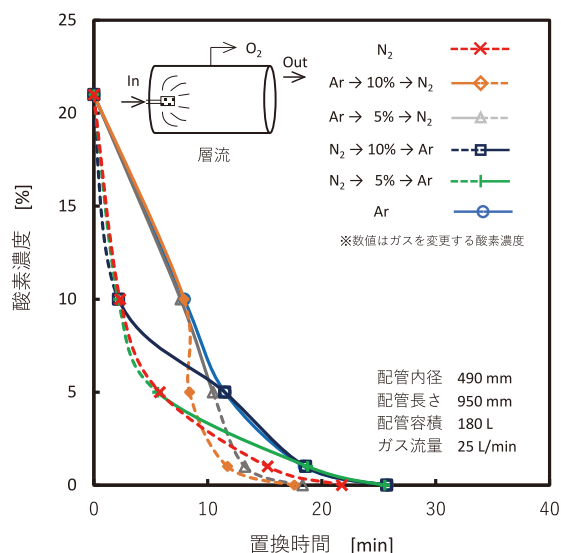


図9 置換時間におよぼすガスの注入順序の影響

4. おわりに

オーステナイト系ステンレス鋼の裏波溶接におよぼす N_2 バックシールドの影響を検討し、溶接継手およびガス置換の性能を評価した。その結果、溶接継手の性能はバックシールドガスがArと N_2 の場合で同等になるが、ガス置換の性能はArよりも N_2 の場合の方が優位になることが明らかになった。

4.1 溶接継手の性能

- ① 外観、浸透探傷試験、溶接継手部の引張強さ、裏曲げ試験、硬さ試験では、バックシールドガスのArと N_2 の場合のいずれにも優位性はみられない。
- ② 初層溶接金属のフェライト量はバックシールドガスをArから N_2 に変更することで少なくなったが、裏波溶接の凝固割れ感受性が極めて高くなるような傾向はみられない。
- ③ バックシールドガスが N_2 の場合はNが溶接中に熔融池へ拡散することで初層溶接金属のN含有量が増加するが、初層溶接金属のNに大きな濃度勾配は発生しない。
- ④ バックシールドガスがArと N_2 のいずれの場合でも、溶接金属のNにはCrやNiのような元素分配はみられない。

4.2 ガス置換の性能

- ① 置換終了時間は、乱流と層流のいずれにおいてもArよりも N_2 の場合の方が短く、ガス流量が多いほど短くなる。
- ② ガス使用量は、ガス流量を15 L/minにすると短くなる傾向がみられ、容積(180 L)の平均で3.4倍である。
- ③ Arに対する N_2 の置換終了時間およびガス使用量は平均比率が0.84で、コストの平均比率が0.42である。
- ④ バックシールドガスにArと N_2 を自由に使用してもよい条件では、Ar→ N_2 の順に注入すると置換終了時間が N_2 のみの場合よりも短くなる。

参考文献

- 1) 安西敏雄：バックシールドに窒素ガスを用いた場合のステンレス鋼溶接部の溶接継手性能，高田技報，Vol.12 (2002)，pp.16-21
- 2) 日本溶接協会：Q10-7-11 ステンレス鋼裏波溶接，接合・溶接技術 Q&A 1000，(1999)，pp.1012-1013
- 3) 消防庁：ステンレス鋼管を用いた配管及び管継手の施工に当たっての留意事項について，消防予第11号，(2007)
- 4) 超高耐久オールステンレス共用部配管システムガイドライン，(2010)，pp.43-48
- 5) ステンレス協会：建設用ステンレス配管マニュアル，(2011)，pp.122-125
- 6) 日本溶接協会：プラント圧力設備溶接補修指針，CP-0902 (2009)，pp.151-153
- 7) JIS B 8285:2010 圧力容器の溶接施工方法の確認試験
- 8) 古賀猛，清水哲也，野田俊治：オーステナイト系高窒素ステンレス鋼DSN9，電気製鋼，Vol.73 No.2 (2002)，pp.127-130
- 9) 中野正大，山口ちひろ：リーンおよび汎用二相ステンレス鋼のティグ溶接の実験，高田技報，Vol.33 (2023)，pp.30-39
- 10) 中野正大，山口ちひろ，安西敏雄：リーン二相ステンレス鋼の溶接金属におよぼすティグ溶接の窒素入りシールドガスの影響，高田技報，Vol.30 (2020)，pp.10-15
- 11) JIS Z 3119:2017 オーステナイト系およびオーステナイト・フェライト系ステンレス鋼溶着金属のフェライト量測定方法



中野 正大 Masahiro NAKANO
技術統括部
技術士（金属部門）



山口 ちひろ Chihiro YAMAGUCHI
技術統括部



浜田 宏昭 Hiroaki HAMADA
技術統括部