



ミニ特集・1

高濃度窒素鋼の有効性とその応用

高濃度窒素ステンレス鋼の接合

—アーク溶接および拡散接合継手の機械的性質—

Welding of High Nitrogen Stainless Steel

—Mechanical Properties of Arc Weld and Diffusion Weld Joint—

神谷 修
Osamu Kamiya

秋田大学 工学資源学部 教授

1 はじめに

高濃度窒素ステンレス鋼は、通常のステンレス鋼に比べて高い強度を有すると同時に、低温での破壊靱性が優れており、将来の構造材料として広い応用が期待される材料である。しかし、この材料を母材として溶接を施した場合、母材には見られない独特な金属組織を形成し機械的性質を低下させる場合がある。溶接特有の組織とは、「柱状晶組織」、「窒化物 Cr_2N の析出」、「凝固割れ」、「窒素含有量低下」、「気孔の形成」などであり、強度や靱性を低下させる原因となる。大きな構造物を製作する場合、大気圧中の熔融溶接は避けられないので、溶接は実用的な観点からのキーテクノロジーであると言える。高濃度窒素ステンレス鋼は、高圧窒素中で健全な溶接が可能である¹⁾。一方、低圧窒素雰囲気中で溶接を施すと窒素含有量が低下し、気孔の発生、窒化物の析出や高温割れにより継手性能が低下する場合がある。また、拡散接合の問題点は、加熱による析出物が発生し、靱性を低下させることである。精密部品を製作する場合、拡散接合は実用的なキーテクノロジーである。そこで、実用的な観点から各種雰囲気中での、アーク溶接および拡散接合を適用し、溶接欠陥との関連から機械的特性について説明する。ここで、問題としている機械的特性とは硬さなどの強度と破壊靱性である。

2 高圧窒素中GMA溶接

オーステナイト系ステンレス鋼を高圧窒素中で溶接すると溶接金属に窒素が吸収される。それに伴って溶接金属の硬さは上昇し引張強度は増加する¹⁾。一方、窒素含有量がある限界を越えると靱性値は低下する場合がある。図1 (a), (b), (c) に SUS316 (18Cr-12Ni) を高圧窒素中で GMA (Gas Metal Arc) 溶接した場合の靱性変化を示した¹⁾。図1 (a) に示すように 4000ppm までは靱性が増加するが、5000ppm 以

上では靱性が急激に減少する。図1 (b) に示すように 1323K の熱処理では、窒化物 Cr_2N の析出が促進されるので靱性の低下傾向は著しくなる。図1 (c) に示したように、1573K の溶体化処理により靱性はある程度回復する。これは図2に示すように、窒化物が再固溶消失するためである (図2)。しかし、完全には回復しないのは図3に示した凝固割れであり、何れも低温での靱性を低下させる。この対策として、凝固割

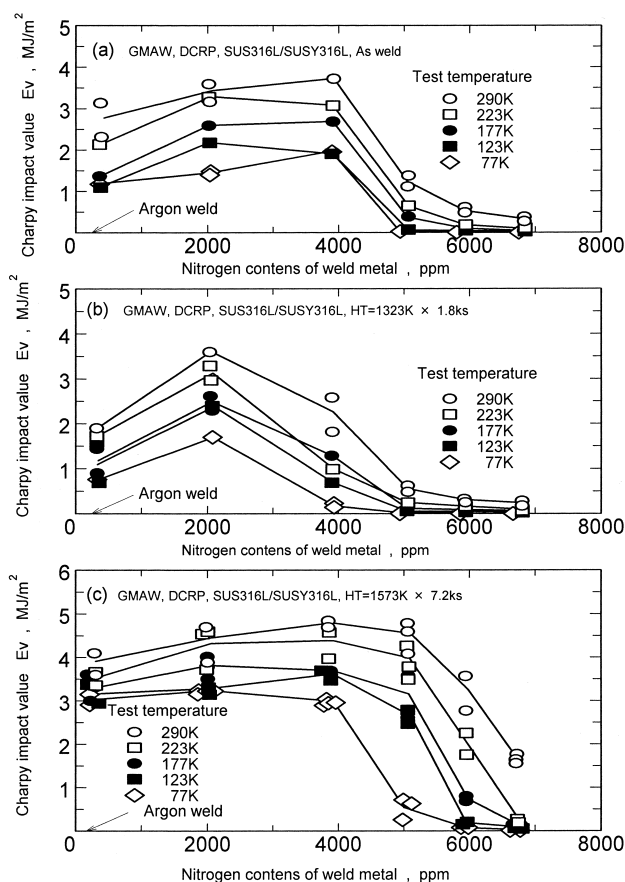


図1 高窒素鋼溶接金属の靱性に及ぼす窒素含有量の影響
SUS316鋼を高圧窒素中で (a) 溶接まま、(b) 1323K で 30 分熱処理、(c) 1573K で 2 時間熱処理。

れに関しては6%程度のMnを溶接金属に添加することにより防ぐことが可能である³⁾。

3 大気圧中GTA溶接

高濃度窒素ステンレス鋼で比較的大きな構造物を製作するためには、特殊なチャンバー内ではなく大気開放下で溶接をする必要がある。大気圧中でGTA溶接すると熔融した金属から窒素ガスが放出され、ブローホールなどの欠陥を形成し強度が低下することがある²⁾。図4に示す例は、窒素を0.78%含むSUS316 (18Cr-12Ni) 鋼であり、GTA溶接時に、シールドガスの種類に関わらず、熔融金属より激しく窒素ガスを発生してブローホール欠陥を形成し、硬さが低下する。図5に熔融境界を示したが、窒素ガスにより形成された気孔は、母材側の部分熔融領域 (PMZ: Partial Melted Zone) に観察された。一方、初期の窒素含有量が0.5%の場合には、シールドガスとして窒素を用いたとき、硬さの低下はほとんど起こらないことがわかる。また、溶接金属や熔融境界には気孔は見られない。実用的な観点から、大気圧中でGTA溶接する場合にはSUS316に含まれる窒素含有量を0.5%程度以下にする必要がある。

さらに、Crを23%に増やして窒素固溶量を増加したDSN9 (23Cr-10Ni-6Mn-0.48N) を用いた場合は、窒素シールド中のGTA溶接により窒素量は母材より増加する。実用的な観点から、通常のGTA溶接を高窒素鋼に適用する場合、N量を保持するためのCr増量は効果的である。図6に

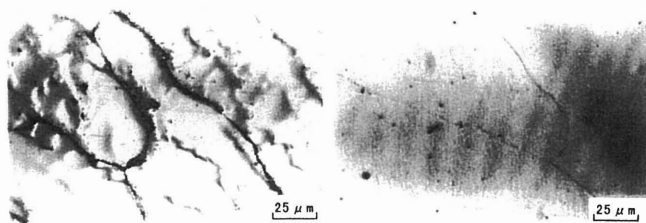


図2 クロム窒化物 (Cr_2N) の析出と溶体加熱処理による消失

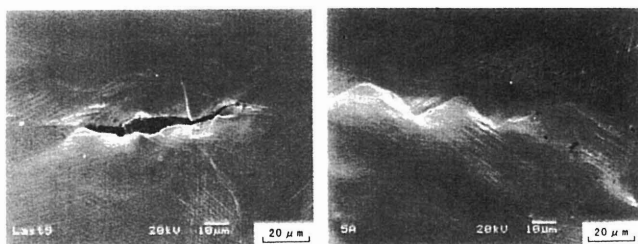


図3 窒素による凝固割れの発生とMn添加による防止

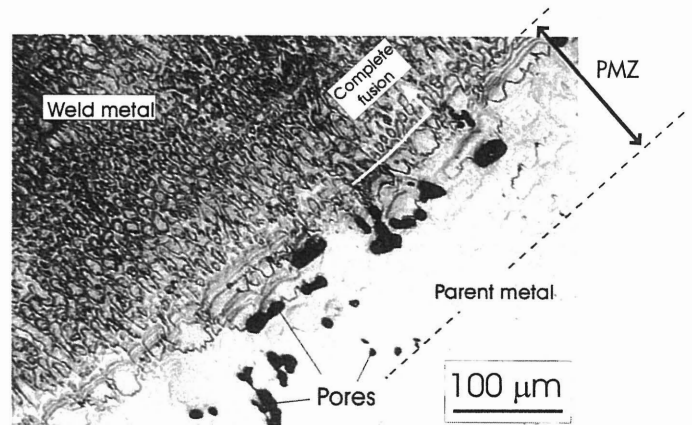


図4 凝固界面の部分熔融領域に残留した気孔 N=0.78%

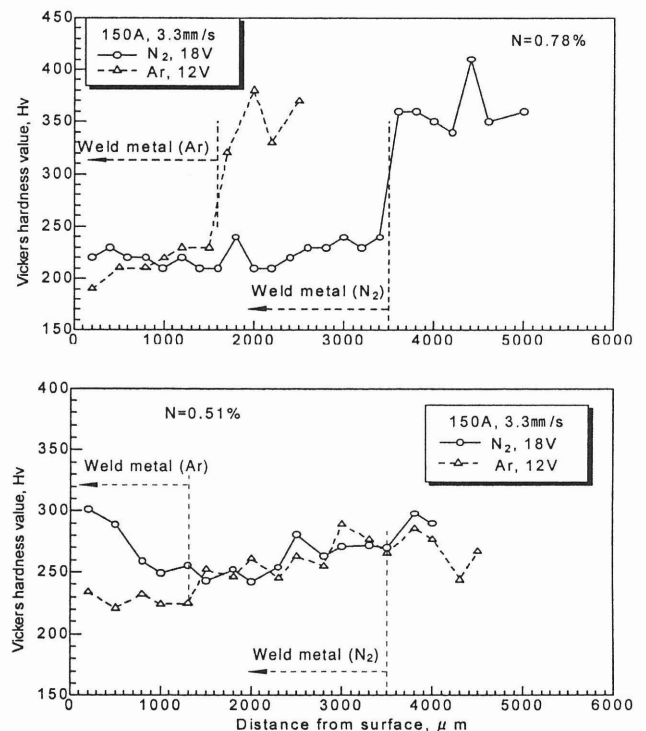


図5 GTA溶接金属の凝固界面付近の硬さ変化

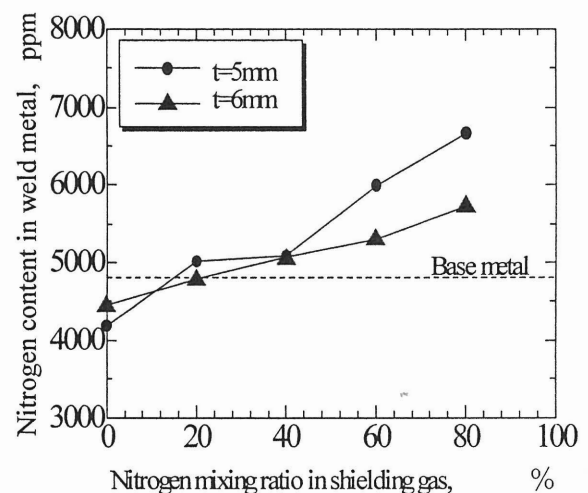


図6 シールドガス中の窒素混合比と溶接金属中の窒素含有量

DSN9を母材としてGTA溶接のArシールドガス中の窒素混合比を増加したときの溶接金属中の窒素含有量を示した。シールドガス中の窒素混合量が20～40%でも溶接金属中の窒素含有量は母材と同程度に維持される。これに対応する硬さの変化を図7に示した。結晶粒が粗大化するために硬さは10%程度低下する。また、77Kの極低温におけるシャルピー衝撃値を図8に示したが、十分な衝撃値を保っていることがわかる。

4 新方式の窒素シールドアーク溶接

窒素をシールドガスとしたアーク溶接では、純Arに比べてアークは不安定になり、電圧は高く、変動が激しいので大

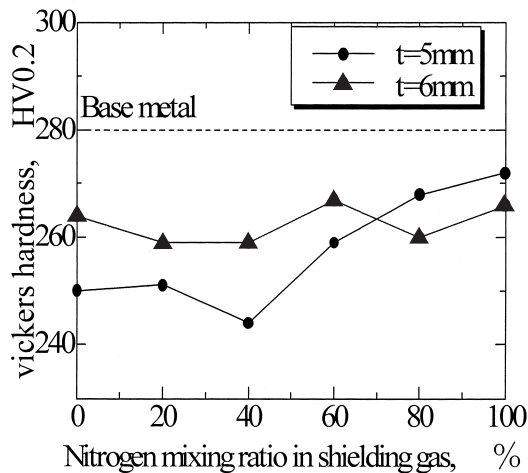


図7 シールドガス中の窒素混合比と溶接金属の平均硬さ

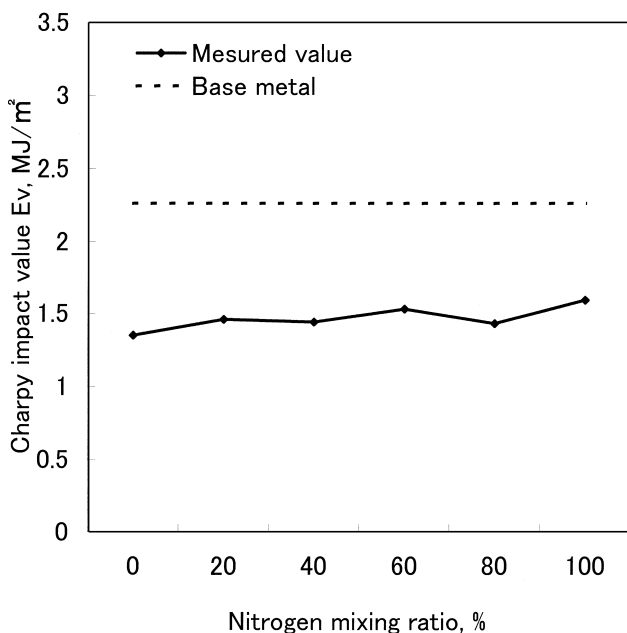


図8 シールドガス中の窒素混合比とシャルピー衝撃値 (試験温度77K)

気を巻き込みやすく、ブローホールやスパッタが多くなる。そこで筆者らは図9に示した「流体式シールドチャンバー」を有する新しい溶接方式を考案した⁴⁾。原理は旋回する二重のエア噴流により内部に静かな安定した雰囲気形成して、容易にシールドが破れないようにするとともに、外からの数メートルの風があっても防ぐものである。また、シールドガスの流量を少なく出来るので省資源の環境にやさしい溶接法である。この方溶接方式は、窒素シールドアーク溶接はもちろん、野外での大型構造物の溶接の際でも風の影響によるブローホールの形成を防ぎ、健全で安全な無欠陥溶接継手の製作を可能とするものである。

5 拡散接合

低圧雰囲気中で、溶接金属から窒素を放出させずに接合するには、溶融させない固相接合としての拡散接合が有利と考えられる。ただし、加熱、冷却時に窒化物を形成させないように注意が必要である。DSN9 (23Cr, 10Ni, 6 Mn, 0.48N) 窒素ステンレス鋼を用いて、拡散接合を真空中で温度1473K、圧力5 MPaの条件で行った場合には、極めて健全な接合が可能であった。窒化物の析出は確認されず、これに対応して図10に示したように低温衝撃値は、母材と同様に高いことが確認された。

6 溶解度と状態図

図11にThermo-calcによって計算したSUS316鋼およびDSN9における窒素との状態図を示した。領域 $\gamma + Cr_2N$ に大きな違いが見られる。すなわち、DSNでは $\gamma + Cr_2N$ 領域が窒素量0.3%まで離れており、0.3%以下では Cr_2N の析出

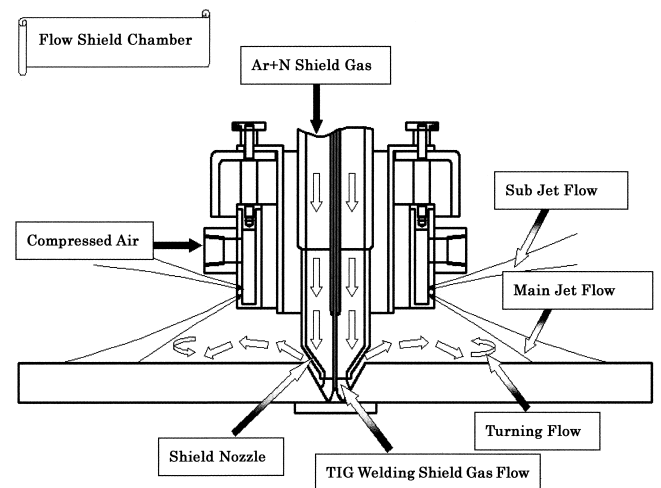


図9 流体式シールドチャンバーによる新方式窒素シールド・アーク溶接

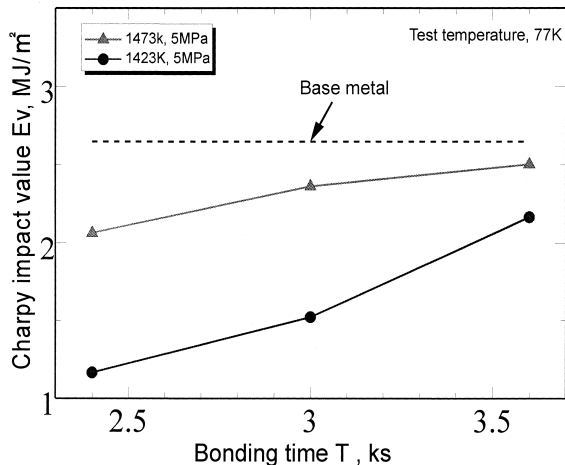


図10 拡散接合継手の低温靱性に及ぼす接合時間の影響
接合条件 温度1423,1473K 圧力5MPa

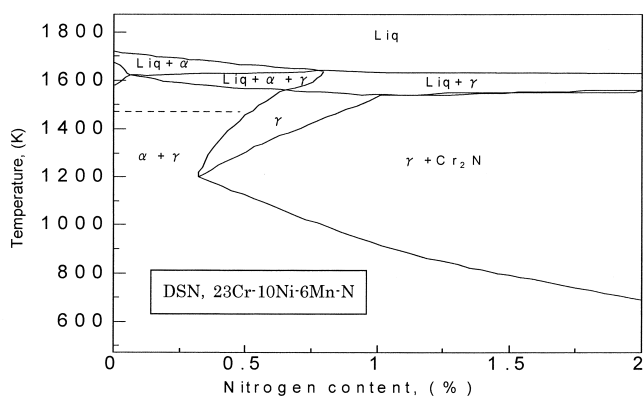
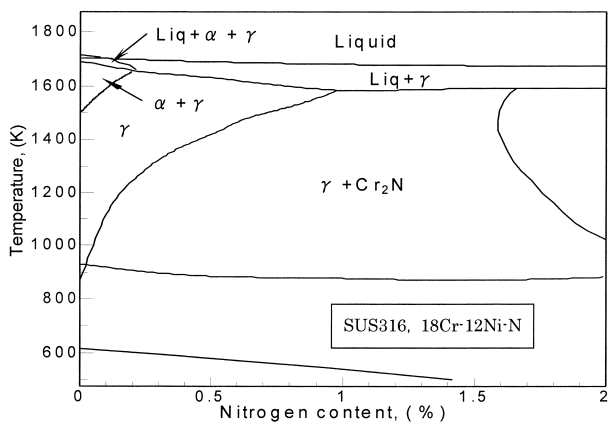


図11 高窒素鋼溶接金属の状態図。Cr増量とMn添加の影響

は起こらないと解釈される。23Cr, 10Ni, 6 Mn, 0.48Nの拡散接合において、炉冷したにもかかわらず、窒化物が析出しなかったのはCrとMnの増量により Cr_2N の析出範囲が高窒素側に移動したためと考えられる。粒界へ Cr_2N 析出は、低温での破壊靱性を劇的に低下させるのでMnの添加は重要である。

7 まとめ

高濃度窒素鋼の低圧窒素雰囲気における接合においては、気孔の発生、析出物の形成、凝固割れを防止し、優れた機械的性質を保持するため、適切な溶接法と材料を選択する必要がある。

大型構造物を想定した、大気圧の窒素シールドガスを用いたGTA溶接においては、鋼中の初期窒素濃度が0.5%以下の場合、溶接金属の強度低下はほとんど起こらず、気孔の残留も無い。また、Mn添加により凝固割れを防ぐことが可能となった。

精密部品の加工を想定した拡散接合では、Crを増量しMnを添加した23Cr-10Ni-6 Mn-0.48Nを用いた場合、窒素含有量が変化せず、析出物も無く、機械的特性の優れた接合ができる。

参考文献

- 1) O.Kamiya, Y.Kikuchi and Z.W.Chen : Inter. Jour.of Materials Processing Technology, V117 (2001), (CD-ROM)
- 2) O.Kamiya, Z.W.Chen and Y.Kikuchi : J. of Materials Science, 37 (2002), 2475.
- 3) O.Kamiya, Z.W.Chen, Y.Kikuchi and T.Ohyoshi, the Journal of Materials Processing, (2003), 投稿中.
- 4) 神谷修, 森川茂弘, 菊池知己 : 特許出願2002-47585.

(2003年10月31日受付)