

高濃度窒素鋼の加工 (2)

レーザ溶接時における鋼溶接金属の窒素吸収および放出

Nitrogen Absorption and Desorption during Laser Welding of Steels

粉川博之
Hiroyuki Kokawa東北大学 大学院工学研究科
材料加工プロセス学専攻 教授

1 はじめに

鋼のアーク溶接過程で雰囲気窒素ガスが含まれていると、高温のアークにより溶融溶接金属と窒素ガスとの反応が活発に行われ、短時間の溶融反応にもかかわらず溶接金属にはたくさんの窒素が吸収されることが多い。一般に、鋼アーク溶接金属の窒素量と雰囲気窒素分圧 (P_{N_2}) の平方根の関係は、図1に示すようにSievertsの法則に従わず、溶接金属の窒素量は P_{N_2} が低い場合には溶融池温度での平衡窒素溶解度より高く、 P_{N_2} が高くなるに伴ってその差が小さくなって交差し逆転する傾向にある¹⁾。

平衡状態における溶融金属の窒素吸収に関しては、窒素ガスの解離も考慮すると、次の3つの式が同時に成立している。高温のアーク中では多くの窒素ガスが解離 ((2) 式) しているため、(1) 式の N_2 ガスからの吸収反応の他に解離した N からの (3) 式の吸収反応が促進され、雰囲気窒素分圧が低く材料の窒素溶解度があまり高くない場合には、(1) 式の平衡窒素溶解度よりも多くの窒素が溶融金属中に吸収されると考えられる。しかし、溶接時の溶融時間が短いため、窒素分圧が高く材料の窒素溶解度が高い場合には、窒素吸収反応が十分に進行する前に凝固し、図1の右側のように溶接金属の窒素量が溶解度より低くなる^{1, 2)}。

$$N_2(\text{gas}) = 2N(\text{in liquid metal}) \dots\dots\dots (1)$$

$$N_2(\text{gas}) = 2N(\text{gas}) \dots\dots\dots (2)$$

$$N(\text{gas}) = N(\text{in liquid metal}) \dots\dots\dots (3)$$

一方、レーザ溶接過程における鋼溶接金属の窒素吸収および放出に関する情報はまだ極めて少ない。著者らは最近、溶接雰囲気調整チェンバー中で窒素を含む種々の混合ガス雰囲気下で、鉄およびステンレス鋼を CO_2 レーザ、YAG レーザおよびアーク (GTA) 溶接し、溶接金属の窒素量を調べ、ア

ーク溶接や平衡溶解度と比較検討しているため、その結果³⁻⁷⁾ について以下に紹介する。

2 レーザ溶接過程の窒素吸収

図2は、 $Ar-N_2$ 混合ガス雰囲気中で CO_2 レーザ、YAG レーザおよびアーク溶接した場合の、鉄溶接金属の窒素量と P_{N_2} の平方根の関係で示す³⁾。図2中には鉄のアーク溶融池温度 (1900K) および沸点 (3023K) 付近での (1) 式による平衡窒素溶解度も示してある。窒素量はGTAが最も高く、 CO_2 レーザ、YAG レーザの順に低下する。いずれの窒素量も P_{N_2} とともに増加するが、平衡溶解度に比較すると、 CO_2 レーザは同程度であるが、アークは高く、YAG レーザは低い。

レーザ溶接では、収束させた高いエネルギー密度のレーザビームを母材に照射して溶融や蒸発が生じ、溶融部に深い孔 (キーホール) をさせて狭くて深い溶接金属が形成される。レーザと母材および雰囲気ガスとの相互作用によって、溶融池直上にはプラズマやブルームが発生し、キーホール内部は金属蒸気が充満している。母材窒素量が低く、雰囲気に窒素ガスが含まれる場合には、 CO_2 レーザ溶接した鉄およびステンレス鋼溶接金属の上部の窒素量は下部 (キーホール領域) より幾分高い。この理由としては、キーホール内では金属蒸気分圧が高いため窒素分圧が低くなることと、キーホール部の溶融時間が上部に比べて短いことが、窒素吸収を抑制する可能性が考えられる^{3, 5)}。図3は、 CO_2 レーザの焦点位置を変化させて、Fe-20%Cr-10%Ni 合金溶接金属の窒素量への溶け込み形状の影響を示したものである。焦点位置が高い熱伝導型の溶け込みの方が、キーホール型に比べて窒素量が多いことから、レーザ溶接過程での窒素吸収が主に溶接金属上部で生じていると推察される^{3, 5)}。

分光画像によるプラズマ状態の観察結果^{5, 6)} から、窒素ガ

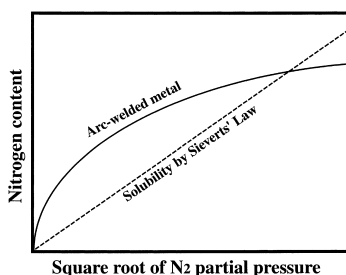


図1 鋼アーク溶接金属の窒素量および平衡窒素溶解度と窒素分圧 P_{N_2} の関係¹⁾

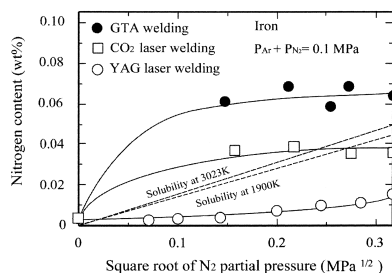


図2 レーザおよびアーク溶接した鉄溶接金属の窒素量と P_{N_2} ³⁾

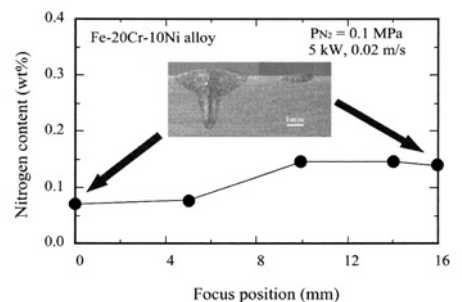


図3 Fe-20%Cr-10%Ni 合金溶接金属の窒素量に及ぼすレーザ焦点位置の影響⁶⁾

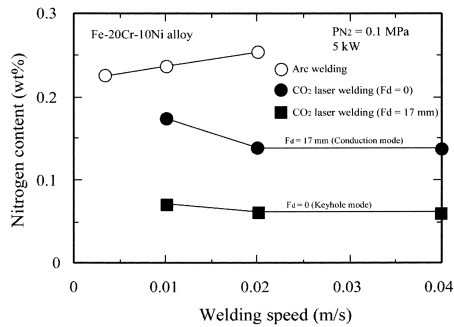


図4 Fe-20%Cr-10%Ni合金溶接金属の窒素量に及ぼす溶接速度の影響⁵⁾

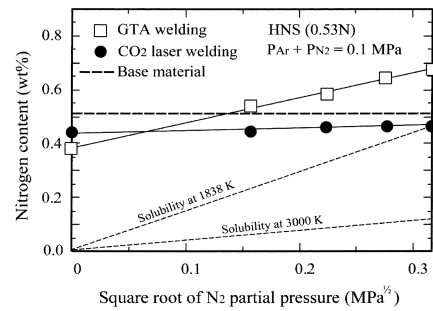


図5 0.53%N高窒素ステンレス鋼溶接金属の窒素量と P_{N_2} ⁷⁾

スが含まれる場合の溶接過程の溶融池直上の雰囲気の状態について比較すると、アーク溶接では高温のアークプラズマ中に解離したNが高濃度に広く分布しているのに対して、CO₂レーザ溶接では高温のレーザ誘起プラズマ中にNが観察されるがアーク溶接に比べると分布範囲が狭い。一方、YAGレーザ溶接では、その波長(1.06 μ m)がCO₂レーザ(10.6 μ m)に比べて短いことからプラズマ中の吸収が小さく雰囲気温度が低いと推察され、(3)式による窒素吸収が小さいと考えられる。プラズマが発生し難い窒素減圧雰囲気中でCO₂レーザ溶接すると溶接金属の窒素量がYAGレーザ溶接の場合に近づくことから、YAGレーザ溶接では雰囲気中のN濃度がかなり低いことが示唆される^{5, 6)}。以上のことから、アーク、CO₂レーザおよびYAGレーザの順に溶接金属の窒素量が減少するのは、溶融池直上の雰囲気中の解離N分圧がその順に低下することに起因すると推量される。さらに、キーホール型のレーザ溶接金属では、キーホール内の高い金属蒸気分圧が窒素分圧を下げていることも、アーク溶接に比べて窒素量が低くなる理由として挙げられる。

図4のFe-20%Cr-10%Ni合金の例⁵⁾に見られるように、窒素雰囲気中で溶接速度を減少させた場合の溶接金属の窒素量は、アーク溶接では減少し、レーザ溶接では増加する傾向にある。一般にアーク溶接では、平衡状態に比べて窒素が過飽和に吸収され、溶接速度が減少するほど冷却時間が長くなり、過剰な窒素が放出される。一方レーザ溶接では、平衡状態に比べて窒素の吸収が不足で、溶接速度が減少するほど溶融時間が長くなって、吸収時間が長くなり、平衡状態により近づくものと説明できる⁵⁾。

3 高窒素ステンレス鋼のレーザ溶接における窒素の挙動

図5に0.53%の窒素を含有する高窒素ステンレス鋼溶接金属の窒素量と P_{N_2} の関係を示す⁷⁾。窒素含有量の高い母材をアルゴンガス雰囲気中で溶接すると、溶接金属の窒素量は母材

に比べて減少するが、その減少量はレーザ溶接の方がアーク溶接より小さい。 P_{N_2} の増加とともに溶接金属の窒素量は、アーク溶接では急激に増加し、レーザ溶接では緩やかに増加する。図5のレーザ溶接の場合、溶接金属の窒素量はいずれも母材より低いことから窒素放出が生じているが、窒素減少量はキーホール部より上部の方が大きい。

4 おわりに

銅のレーザ溶接過程では、アーク溶接に比べて窒素の吸収も放出も小さく緩やかに生じている。今後その吸収・放出機構の詳細が解明され、レーザ溶接の特性を生かした溶接金属の窒素量制御と気孔抑制の実現が期待される。

参考文献

- 1) 粉川博之：溶接部の材料挙動のモデリングとシミュレーション，溶接学会溶接冶金研究委員会編，JWS Bulletin, 14, (1999), 192.
- 2) T. Kuwana, H. Kokawa and M. Saotome: Mathematical Modelling of Weld Phenomena 3, ed. by H. Cerjak et al., The Institute of Materials, (1997), 64.
- 3) W. Dong, H. Kokawa, Y. S. Sato and S. Tsukamoto: Metall. Mater. Trans. B, 印刷中.
- 4) Y. Sato, W. Dong, H. Kokawa and T. Kuwana: ISIJ Int., 40 (2000), S20.
- 5) W. Dong, H. Kokawa, S. Tsukamoto, Y. S. Sato and M. Ogawa: 投稿中.
- 6) W. Dong, H. Kokawa, Y. S. Sato, S. Tsukamoto and M. Ogawa: Proc. 7WS, Today and Tomorrow in Science and Technology of Welding and Joining, JWS, (2001) 2, 845.
- 7) W. Dong, H. Kokawa, S. Tsukamoto and Y. S. Sato: 投稿中.

(2002年8月27日受付)