特 集

溶接部の組織とじん性

Microstructure and Toughness of Weld Zone

技術資料

サブマージーク溶接金属の組織とじん性*

中 西 睦 夫**

Effect of Microstructure on Toughness of Submerged Arc Weld Metal*

by Mutsuo Nakanishi**

1. ま え が き

溶接構造物のぜい性破壊とかかわる鋼材や溶接継手部のじん性は重要であり、数多くの研究開発のを通じて、構造物の安全性は大いに高められた。

それらの中で、鋼材の改善とともに、溶接金属のじん性改善の進歩が重要な役割をはたしてきた。

一般には、溶接金属部は、極めて短時間の溶融・凝固過程を通じて形成されるため、鑄造組織を呈しており、しかも、酸素や窒素などの不純元素や脱酸生成物を多く含み、じん性は低下しがちであり、母材に匹敵するじん性・使用性能を確保するためには、多くの困難があった。

じん性は、結晶粒度や変態組織などの冶金的要因に大きく影響され、溶接金属においても、同じである。

本報告では、溶接金属のじん性について、主として、大入熱溶接が実施され、じん性確保がむづかしいサブマージーク溶接金属を主にとりあげ、冶金的な立場からの最近の成果をとりまとめた。

対象としては、50, 60キロ高張力鋼、低温用 Al キルド鋼、ラインパイプ鋼などの50~60キロ級の溶接金属(組織的には、フェライト組織を主とする溶接金属)の光学顕微鏡組織とじん性の関係、およびじん性改善法などを筆者らの研究をベースにとりまとめた。

2. 溶接金属の組織とじん性

溶接金属のじん性は、種々の要因によって変化し、複雑に関係あっている。基本的には、溶接金属の冶金的な側面から、これら要因を見るのが、最も理解しやすく、統一的に、種々の要因を関係づけられる。

図1にこのような観点から各種要因を整理した¹⁾。

一般に、溶接金属を設計する場合、母材とはほぼ同じ合金成分系をベースに、必要に応じて、Mo や Ni などの合金元素が添加される。このため、溶接金属のじん性を検討する場合、合金成分系組成を中心に、合金元素や酸

図1 溶接金属のじん性に影響する諸要因

*原稿受付 昭和55年10月27日

**正 員 住友金属工業(株) 中央技術研究所 Member, Central Research Labo., Sumitomo Metal Industries, Ltd.

素含有量など組成的な検討や、溶接入熱量などの溶接パラメーターの検討が主であった。このような検討では、特定の成分系、溶接条件に対応できても、種々の溶接金属へそのまま、広く応用できないなどの問題があった。

最近では、鋼材や鋼材の溶接性に関する冶金的な検討が、鋼材の改善に大きな成果をあげたのに呼応して、溶接金属でも同様の検討が進んでいる。これらの検討結果をベースに高じん性の溶接材料に広く応用されている。

図2に50キロ級溶接金属の基本組成である Si-Mn 系サブマージアーク溶接金属のじん性と組成の関係を示した²⁾。

じん性は、一般に良く知られている酸素含有量に影響されるばかりでなく、Si, Mn 含有量によっても大きく変化し、Si, Mn 含有量の特定範囲内で最も高じん性の領域が存在する。

この理由は、Si, Mn が脱酸元素であるばかりでなく、合金元素として、その含有量に応じて、溶接金属の光学顕微鏡組織を変化させることによる。低 Si, 低 Mn 領域では、焼入性が不足して、粗大フェライトが発達するために、また、高 Si 高 Mn 領域では、粗いラス状組織が発達するため、破壊の有効結晶粒径が大きくなり、じん性劣化がおこる。適正成分域では、フェライト粒も比較的細粒で、しかも粒内のラス状組織を分断した混合組織となり、有効結晶粒を小さくするため、高じん性が得られると説明されている¹⁾。

一般に、じん性は有効結晶粒径に見られるごとく、ぜい性クラックの発生伝播の難易さと大きく結びついており³⁻⁵⁾、一般には次の2項目が重要である。

- (1) 個々のクラックの進行に必要なエネルギー消費が大きいこと。
- (2) クラックの進行を阻止する場所が多いこと (この

阻止場所では、クラックは直線的に通過できず、折れまがる。この時消費されるエネルギーは非常に大きい)。

このようなクラックの伝播の難易さには、結晶粒度や組織が影響を与える。また、溶接金属の清浄性 (介在物、析出物、酸素含有量など) も同様である。

このため、先に示した Si-Mn 系溶接金属では、両者の効果が重畳して、じん性が変化したと考えられる。

溶接金属のじん性検討には、2項目を定量的に評価し、その役割を明確にすることが必須である。

図2 溶接金属の酸素含有・シャルピー特性と Si, Mn 含有量の関係 (19 mm, 入熱 56~64 kJ/cm SAW)

25 μ

粗粒フェライト+細粒フェライト

0.15% Mo

$vE_0 = 6.9 \text{ kg-m}$

微細粒フェライト

0.23% Mo

$vE_0 = 13.2 \text{ kg-m}$

lath 状組織

0.49% Mo

$vE_0 = 3.9 \text{ kg-m}$

図3 溶接金属の光学顕微鏡組織とじん性の関係 (Si-Mn-Mo-Ti 系, 150 kJ/cm)

2.1 溶接金属の組織とじん性の関係

図 3, 図 4 は 50~60 キロ級サブマージアーク溶接金属として, 広く実用されている Mo-Ti 系溶接金属について, Mo 添加量を変えて変態組織を種々かえた場合の組織と靱性の関係を示した⁶⁾. 本図に示すごとく, 溶接金

図 4 Si-Mn-Mo-Ti 系溶接金属のシャルピー特性に及ぼす Mo 含有量の影響

25 μ

初析フェライト+細粒フェライト

微細粒フェライト

lath 状組織

図 5 シャルピー試験片破面部の伝播経路

属の組織変化に応じて, じん性は大きく変化する. とくに, きわめて細かいフェライトが均一に形成された場合に高いじん性が得られている (なお, 本報告では, このきわめて細かいフェライト組織を針状フェライトや lath 状組織とは異なった多角形フェライト組織との見方から, 微細粒フェライト組織と呼ぶ. 現在まだ, 本組織について統一的な名称はなく, アシキュラーフェライト, 細かい針状フェライトなどと名づけている研究者もある).

図 5 にこれら種々の異なる組織を有する溶接金属のシャルピー破面伝播経路を示した.

微細粒フェライト均一組織では, 細かいフェライト粒の個々の粒界がクラック伝播の阻止に有効に働き, きわめて折れ曲がった伝播経路となっている. 一方, ラス状組織では, ラス境界を突き破ってクラックが進行している.

このため, 微細粒フェライト組織では, クラックの平均伝播距離はきわめて短かく, ラス状組織では長く, これらがじん性に影響する.

図 6 に, この平均伝播距離とシャルピー破面遷移温度の関係を示す. じん性は, この (平均伝播距離)^{-1/2} ときわめて良い対応関係を有し, 溶接金属の組織から, ほぼ靱性レベルが定量把握できる.

同様の関係は, 溶接金属の COD 特性についても得られている⁷⁾.

上記したごとく, クラック伝播の阻止サイトとして, 個々の結晶粒界が働く微細粒フェライト組織は, 非常にじん性が高く, じん性改善にはフェライト粒の微細化が有効である.

図6 平均クラック伝播径路(l)とじん性の関係

2.2 溶接金属のじん性と不純元素

溶接金属では、鋼材に比して、酸素や窒素含有量が高く、これらがじん性に悪影響を与えることが古くから知られている⁹⁾。図7に Si および Mn などの合金元素量を一定にして酸素含有量を変化させた場合のじん性と酸素量の関係を示した⁹⁾。酸素含有量は破面遷移温度(T_r)にあまり影響をしないが、シェルフエネルギーを大巾に低下させる。これは、溶接金属中の酸素が、球状介在物として存在し、主に、延性破壊域での吸収エネルギーに関係するためである。しかし酸素含有量が200~250ppm以下になると急激にじん性が劣化することも見出されている^{9,10)}。この原因は、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態の核として働いていた酸化物が約200ppm以下で急激に減少し、その結果、低温変態生成が助長され、lath 状組織が増加するためと考えられている^{9,10)}。

また、溶接金属中の窒素の増加も、じん性に悪影響を与えることが見出されている⁷⁾。

この原因は窒素含有量の増加につれ、フェライトの間隙に島状マルテンサイトが形成するためと考えられている。

このように酸素、窒素は、脱酸生成物や固溶窒素として、溶接金属のじん性に影響を与える。このほか、後述するごとく、溶接金属に添加された他元素(たとえば、Ti, B, Zr, etc)の有効性にも影響を与え、それらを通じて、じん性に影響を与える場合がある。

3. 溶接金属のじん性改善法

前項に示したごとく、溶接金属のじん性は、溶接金属

図7 溶接金属のシャルピー特性と酸素含有量の関係 (14 mm^t, 45 kJ/cm)

の組織の均一微細化や酸素含有量などの冶金的要因と良好な対応を持つ。

実際の溶接に際しては、溶接材料や鋼板の組成や溶接条件などの諸条件を選択して、最大限に冶金的要因の効果を発揮させてやる必要がある。

そのような方法についても、数多くの研究があり、下記のような方法が実用されている。

- (1) Ti, B 等の添加による $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態制御
- (2) 多層盛溶接積層制御
- (3) 酸素低制御

3.1 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態制御による均一細粒フェライト化

通常、サブマージアーク溶接金属など大入熱溶接金属では、柱状晶が発達するため、柱状晶粒界近傍では、粗大な初析フェライトが発達し、粒内では針状フェライト組織となる不均一な組織となる。換言すれば、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態は非常に広い温度範囲で変態が生じる。じん性向上のためには、この不均一な組織を制御し、均一微細な組織を形成することが必要となる。ここ数年来、Ti や B を微量添加しこの溶接金属の $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態を積極的に制御することが活発に行なわれている^{2,11-15)}。

図8は50~60キロ級サブマージアーク溶接金属について

て、Mo と Ti を複合添加した場合の、冷却過程で生じる $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態挙動の変化を示す²⁾。Ti によるフェライトの核生成促進効果と Mo による変態温度調整効果とを組合せることにより、変態温度域を細粒フェライトが形成される狭い温度範囲内に制御することができる。その結果、溶接金属全体に均一な細粒フェライト組織が形成できる。

図 9 に溶接金属の Ti 量とじん性の関係を示した。組織を均一化して、高じん性を得るための Ti 量は酸素含有量と共に変化する。

このような Ti 添加による組織改善効果は、冷却過程で $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態に先立って析出した微小な TiN や Ti 系酸化物がフェライト生成核となるためと考えられている^{2, 12)}。

図 8 溶接金属の冷却過程で生じる変態挙動におよぼす Mo, Ti の影響 (サブマージアーク溶接, 板厚 25 mm, 入熱 150 kJ/cm)

しかし、過剰の Ti 添加は、TiN の析出によるじん性劣化が大きく、Ti 添加量は適切に制御する必要がある。

このような、変態制御による組織微細化効果は、Ti ばかりでなく、Zr, B なども有している。実用的には、Mo-Ti 系溶接金属と同様に、(Mo)-Ti-B 系溶接金属も広く実用されている。図 10 に Ti-B 系溶接金属のじん性と B 含有量の関係の一例を示す¹³⁾。森らは、この Ti-B 系溶接金属のじん性向上効果は、凝固後の冷却過程で、

図 9 溶接金属じん性と Ti 酸素含有量の関係

(a)

(b)

図 10 溶接金属のシャルピー特性におよぼす Ti および B 含有量の影響 (堀籠・常富ほか) (サブマージアーク溶接, 板厚 32 mm, 入熱 197 kJ/cm)

固溶Bがオーステナイト粒界に偏析して、初析フェライトの形成を抑制する一方、TiについてはTi酸化物が粒内のフェライト核生成を助長すると同時に、一部TiがTiNとなり、冷却過程でBをNから保護する役割をはたすと考えている。これらの考え方の裏づけとしてTi-B系溶接金属では、窒素含有量もじん性に大きく影響することを報告している¹²⁾。

このような $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態制御により、微細粒均一フェライト組織化した溶接金属では、大入熱溶接になっても靱性劣化が少なく、また、鋼板に添加されたNb, Vなどの母材希釈による溶接金属じん性劣化に対しても、感受性が低く、造船用HTの片面サブマージアーク溶接や、ラインパイプの両面一層サブマージアーク製管溶接といった大入熱溶接の高靱溶接材料として広く使われている^{2,13-15)}。

図11にその一例を示す²⁾。

図11 HT50 大入熱サブマージアーク溶接金属のじん性 (Mo-Ti 処理溶接金属のじん性と入熱量関係)

また、このようなTi-B添加などの $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態制御溶接材料はサブマージアーク溶接材料ばかりでなく、MIG溶接材料、被覆棒アーク溶接棒にも応用されている。

3.2 多層溶接による積層制御

溶接金属の組織微細化は、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態制御ばかりでなく、多層盛溶接による上層ビードによる再熱によっても可能である。つまり、上層ビードにより、 A_{c1} 点以上に再熱された下層ビード一部では、再結晶が生じ、微細なフェライト組織となる。したがって積層を制御して、下層ビード部を上層ビードによって再結晶化させることにより、じん性は大きく向上する。図12に3 $\frac{1}{2}$ Ni鋼サブマージアーク溶接金属における一例を示した¹⁶⁾。

図12 シャルピーノッチ底の微細フェライトの割合とシャルピー特性の関係 (620°C × 1 h SR 後) (サブマージアーク溶接、入熱 30 kJ/cm)

$$B_L = 6.05N_{CaO} - 6.31N_{SiO_2} - 49.7N_{TiO_2} - 0.2N_{Al_2O_3} + 4.8N_{MnO} + 4.0N_{MgO} + 3.4N_{FeO} \quad (N_i: i \text{ 成分のモル率})$$

図13 フラックス塩基度と酸素含有量の関係

このような上層ビードによる下層ビードの再結晶フェライト化効果を十分活用するためには、浅溶け込みの溶接ビード形成が必要であり、溶接条件の選定が重要であるが、被覆棒アーク溶接、TIG溶接や狭開先MIG多層盛溶接などでは、この再熱効果がじん性改善の大きな要因となっていると考える。

3.3 酸素低減制御

溶接金属中の酸素含有量は、被覆棒アーク溶接やサブ

マージアーク溶接などの溶接時にスラグを形成する溶接法では、スラグの組成によって変化する。

溶接金属酸素量の間接的尺度としては、図13に示す森式塩基度 (B_L) などの塩基度が用いられる。

一方、最近では、通常塩基度表示式にとり入れられていない CaF_2 などのフッ化物が酸素低減に効果があることが注目され、積極的に CaF_2 を利用したサブマージアーク溶接フラックスが開発実用されはじめている^{17,18)}。

また、酸素含有量は、溶接法によっても、大きく変わるので、酸素の低い溶接法 (たとえば、TIG, MIG 溶接) を選択することにより低減がはかれる。

4. おわりに

主として、フェライト組織を有する50~60キロ級溶接金属について、変態組織とじん性の関係につき示し、さらに、実際の溶接に際して、変態組織改善に基づいてじん性を改善する方法につき、最近の成果をとりまとめた。

今後、増々、高品質な継手特性の要求は強まると予想され、鋼材・溶接材料を含め、さらに体系的な基礎研究が必要となろう。

なお、本報告では、主に筆者らの研究を基本に、とり

まとめたが、本分野での研究は、最近、国内はもとより海外においても、数多くの研究が行なわれている。

本報告にまとめられなかった成果が数多く存在することならびに、今後さらに大きな展開が示されるであろうことを付記する。

参考文献

- 1) 伊藤, 中西, 勝本; 第69回溶接法委員会資料 (1978)
- 2) 伊藤, 中西; 本誌 Vol. 44 (1975), No. 9, p. 30
- 3) N. J. Petch; "Fracture" (1954), p. 54
- 4) S. Matuda, T. Inoue and Y. Okamura; Trans. JIM Vol. 11 (1970), p. 371
- 5) 大谷, 寺崎, 邦武; 鉄と鋼 Vol. 58 (1972), No. 3, p. 434
- 6) 伊藤, 中西; 本誌 Vol. 44 (1975), No. 10, p. 37
- 7) 伊藤, 中西, 小溝; 住友金属 Vol. 30 (1978), No. 1, p. 31
- 8) たとえば常富, 片山; 本誌 Vol. 38 (1969), No. 9, p. 1013
- 9) Y. Ito and H. Nakanishi; Sumitomo Search, (1975), No. 15, 42
- 10) 寺崎, 坪井; 溶接学会講演概要, 第22集 (1978), p. 28
- 11) 伊藤, 池田ほか; 住友金属 Vol. 29 (1977), No. 4, p. 24
- 12) 森, 本間ほか; 溶接冶金研究委員会資料, WM-741-79
- 13) 堀籠, 常富ほか; 本誌, Vol. 47 (1978), p. 18
- 14) 平, 五代ほか; 溶接学会誌, Vol. 46 (1977), p. 798
- 15) Garland, J. G. and Kirkwood, P. R.; Metal Construction, Vol. 7 (1975), p. 320
- 16) 伊藤, 中西; 溶接学会講演概要, 第24集 (1970), p. 60
- 17) 伊藤, 中西; 溶接学会講演概要, 第15集 (1974), p. 148
- 18) 寺崎, 坪井; 本誌, Vol. 48 (1979), p. 626

50~60 キロ 非調質鋼溶接熱影響部の組織とじん性*

佐藤 誠** 山戸 一成**

On the Microstructure and Toughness of HAZ in as Rolled or Normalized 50 and 60 kg/mm² High Strength Steel*

by Makoto Sato** and Kazunari Yamato**

1. ま え が き

非調質高張力鋼の母材組織は高強度材をのぞき、主にフェライト・パーライトからなり、溶接熱影響部 (Weld heat-affected zone, 略して HAZ と云われる) の組織も、小入熱溶接条件の場合を除いて、初析フェライト、パーライトや中間段階組織から構成されることが多い。したがってじん性改善には γ 粒微細化と組織のフェライ

ト・パーライト化による破面単位の減少が重視されてきた。大入熱溶接側でのじん性改善はこの方向にそったものである。また最近では繰り返し熱サイクルを受けた場合の熱歪脆化の問題が注目を集めている。小入熱側では応力除去焼なまし脆化に注目しなければならない。ここではこれらの問題を主にまとめてみた。

なお調質高張力鋼でも低温用鋼, 60 kg/mm² 高張力鋼などは溶接熱影響部組織が 50 kg/mm² 級高張力鋼に類似しており、非調質高張力鋼に含めて論ずることが出来るよう。

*原稿受付 昭和55年10月21日

**正 員 新日本製鉄(株) 製品技術研究所 Member, Nippon Steel Corp.