

内98-20

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

低炭素鋼溶接熱影響部の組織と
破壊靱性に関する研究

申請者

横山 賢一

Ken'ichi Yokoyama

資源及材料工学専攻 材料強度物性学研究

1998年11月
(西暦)

本研究は低炭素鋼溶接熱影響部(HAZ)を対象として、韌性を支配する破壊過程を調べ、組織因子がどのように破壊過程へ影響を及ぼすのかを明らかにしようとしたものである。本論文は7章から構成されており、第1章では、研究の背景及び従来の研究の概要と問題点を述べ、本研究の目的と意義に言及した。低炭素鋼のHAZ組織は母相の α_B °(ペイニティックフェライト)や α_q (擬ポリゴナルフェライト)、第二相のM-A(Martensite-Austenite constituent)や炭化物など非常に複雑な不均一混合組織であることにもかかわらず、従来HAZの破壊はM-Aや炭化物などの第二相粒子のみが破壊の支配因子と考えられ、これらの割れや界面剥離がGriffithき裂となり、脆性破壊が進展すると説明されてきたことを述べた。そしてM-Aの大きさ、形状、生成量などと韌性劣化の関係が議論の対象となつたが、鋼種によって実験結果に統一的な見解が得られないこともしばしばあることを説明した。また、特にHAZの破壊韌性試験において問題となる微小き裂の発生・伝播・停止現象である荷重低下あるいはポップインについて明らかにされていない部分が多くあることを述べた。本研究の基礎となる破壊力学については、J積分や有限要素法による応力・歪場の計算例などを示した。したがって本研究の目的は、HAZ韌性を支配している組織因子の特徴を明らかにし、破壊過程のどの段階でどのように韌性に関与しているのか求めることであり、最終不安定破壊の前段階で生じる荷重低下の発生機構を明らかにすることである。さらに、介在物を核とした粒内 α (フェライト)を有するTi脱酸鋼について調べることにより、研究結果に一般性を持たせることである。

第2章から第6章が本論文の主要内容である。第2章では、低炭素鋼HAZの計装化シャルピー試験における支配因子を溶接再現熱サイクルを施した試料について調べた。

延性-脆性遷移温度は760°Cの二相域に再加熱されたシリーズが最も高く、シングルサイクル材は最も低かった。また、計装化シャルピー試験による解析により、遷移温度の違いは不安定破壊発生前の安定き裂進展段階よりも脆性破壊発生段階にあることを示した。また、破面解析においてSPEED(Selective Potentiostatic Etching by Electrolytic Dissolution)法による破面腐食から破面の特徴と組織を対応付けることに成功し、脆性破壊発生はM-Aや第二相粒子の割れや界面剥離などではなく、破壊起点の多くは粗大 α_B °と α_B ° + α_q の粒界近傍にあることを示した。破壊起点のマクロ的な位置は最大引張応力位置よりも切欠き先端により近い位置にあり、変形組織の発達によるき裂形成に及ぼす塑性拘束の役割を論じた。セカンドサイクルでの逆変態オーステナイトが冷却されることによって、 α_B ° + α_q や旧オーステナイト粒界や α_B °のラス間に塊状M-Aが形成し、 α_B °の細粒化と不均一混合組織の競合によりHAZ韌性は支配されていることを示唆した。

第3章では溶接再現熱サイクルを与えたマクロ的に均一な組織を用いた破壊力学的韌性試験における荷重低下現象の温度依存性および組織の影響について調べた。

荷重低下量と破面解析から得られる脆性き裂長さにはよい対応が見られるが、荷重低下を発生するJ積分値には温度依存性がなく、荷重低下量に明瞭な温度依存性が見られた。荷重低下量の温度依存性の要因は脆性破壊の停止特性にあることを示した。脆性破壊停止の要因として延性破壊の誘発によるへき開ファセットの連結阻害の機構を論じた。また、組織と荷重低下の関係を調べた結果、粗大 α_B °の数が多いとへき開ファセットを形成しやすいため延性破壊を誘発しにくくファセット間の連結を容易にする結果、荷重低下量は大きくなることを明らかにした。荷重低下量におよぼす溶接再現熱サイクル条件の影響は、粗大 α_B °の量を通じて現われることを示唆した。

第4章では、第2章で行ったシャルピー試験と破面解析の結果を破壊力学的韌性試験であるJ積分試験と比較し、また局所的な歪の定量的測定により脆性破壊発生の機構を調べた。

J積分試験において観察された脆性破壊起点は粗大 α_B °と α_B ° + α_q の粒界近傍にあり、シャルピー試験の結果と一致した。脆性温度域での荷重低下発生の場合も脆性破壊起点は粗大 α_B °と α_B ° + α_q の粒界近傍にあり、破壊韌性試験とシャルピー試験の脆性破壊発生機構は本質的に同じであることを示した。HAZの不均一な組織には、塑性変形の拘束により粗大 α_B °と α_B ° + α_q の粒界近傍に歪差ができる領域が存在することを示し、それが脆性破壊発生を促す欠陥の形成の原因となることを見い出した。 α_B ° + α_q の粒界近傍より発生した微小き裂が脆的に進展するためには、き裂伝播の容易な粗大 α_B °の存在が必要であることを示した。

第5章では、第2章から第4章までの結果をもとに、Ti脱酸低炭素鋼HAZをAl脱酸Ca添加鋼HAZと比較し、ミクロ組織の観点から韌性改善の機構を調べた。

粒内 α は α_B ° + α_q 領域内に存在しており、Ti脱酸鋼は介在物からの粒内 α の生成がAl脱酸鋼に比べて多いことを示し、その結果Ti脱酸鋼は粗大 α_B °が少なく、 α_B ° + α_q 混合領域の比率が増加していることを示した。M-Aの形態、生成量はTi脱酸鋼とAl脱酸鋼とでほとんど差はないことも示した。また、Ti脱酸鋼においても脆性破壊起点は介在物やM-Aによるものではなく、粗大 α_B °と α_B ° + α_q 領域の粒界近傍にあり、第2章から第4章までの結果と一致することを示した。Ti脱酸鋼の遷移温度はシャルピー試験、J積分試験のいずれにおいても低く、脆性破壊に移行しにくいことと、R-曲線から安定き裂伝播抵抗が大きく、予き裂先端の変形後ラス幅の測定から塑性域の広がりもTi脱酸鋼の方が大きいことを示した。

これらの結果からTi脱酸鋼は粗大 α_B °を少なくして塑性変形の拘束を減少させ、脆性き裂の発生と進展を抑えるとともに、 α_B ° + α_q 領域を増加させることにより塑性変形を許容し、安定き裂の進展抵抗を増加させるものであることを示唆した。

第6章では、Ti脱酸鋼の韌性の支配機構を熱履歴の効果について、ミクロ組織の変化及び変形組織観察から調べた。

ダブルサイクル材はシングルサイクル材に比べて遷移温度が上昇する。Ti脱酸

鋼はAl脱酸Ca添加鋼に比べて遷移温度が低いが、ダブルサイクルによる遷移温度上昇が大きく、Al脱酸鋼との差は小さくなることを示した。安定き裂進展抵抗や脆性破壊の停止特性は熱サイクルの違いによってほとんど変わらないが、脆性破壊は両鋼ともにダブルサイクル材はシングルサイクル材に比べて発生し易くなり、韌性の変化は脆性破壊の発生特性が主要因であることを示した。

Ti脱酸鋼の特徴である粒内 α の形態は熱サイクルの違いによってほとんど変わらず、またAl脱酸鋼に比べて粗大 α_B° が少なくラス幅が広いという特徴も変わらなかった。一方、両鋼とともに二相域に再加熱したダブルサイクル材には旧オーステナイト粒界に塊状M-Aが存在するが、脆性破壊起点には塊状M-Aは観察されないことを示した。

塑性変形の集中が $\alpha_B^\circ + \alpha_q$ 領域に見られるが、ダブルサイクル材のTi脱酸鋼では旧オーステナイト粒単位の変形量の違いが大きくなり、旧オーステナイト粒界への変形の集中が顕著になる。すなわち、変形の不均一性が大きくなることを示した。

以上の結果から、ダブルサイクル材では旧オーステナイト粒界に生成する塊状M-Aによって $\alpha_B^\circ + \alpha_q$ 領域の変形が拘束されることが脆性破壊の発生を容易にし、それが韌性の支配機構になり、Ti脱酸鋼の特徴である粒内 α の効果が薄れることを示唆した。

第7章では、本論文の各章で得られた成果を総括して述べた。

本研究の結果、HAZ韌性に及ぼす組織の影響として粗大 α_B° と $\alpha_B^\circ + \alpha_q$ 領域界面の不均一変形が脆性破壊発生を容易にすることが明らかになり、HAZ韌性の研究に新たな見解を示した。また荷重低下現象の解析結果は、ファセットの発生と連結という二つの段階に分けて考えるべきであるという提案を示し、鋼の組織設計の新しい指針となった。TiN鋼の研究結果はTi脱酸鋼についても当てはまることが明らかになり、一連の研究結果の一般性が示された。