

A98-19

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

低炭素鋼の初析フェライト  
変態速度に関する研究

申請者

裴 平 建

Pingjian Qiu

資源及材料工学専攻 材料強度物性学研究

1998 年 11 月  
(西暦)

鉄鋼材料の機械的性質、特に強度、靱性の向上にとっては、結晶粒の細粒化は重要な技術である。通常、フェライト、パーライト、あるいはペーナイトの核生成サイトはオーステナイト結晶粒界であるため、従来これらの組織の微細化にはオーステナイト結晶粒径の微細化に着眼していた。しかし、鋼の溶接熱影響部などのように非常に高温に長時間加熱される材料や、あるいは熱間鍛造加工後の材料などでは細粒化は困難であって、靱性の向上方法が問題となっている。特に海洋構造物などへの使用材料に対しては高強靱性の他に溶接性も要求される。これらの問題を解決するために、多くの研究が行われた。その一つとして鋼製造時にチタン脱酸することによって、溶接部の靱性が大幅に向上することが見出され、 $Ti_2O_3$  の微細粒子を鋼中に生成、分散させることによって高強度、高 HAZ 靱性の大入熱溶接用 Ti オキサイド鋼が開発された。この鋼は、溶接の冷却過程で、少量の粒界初析フェライトが析出した後、オーステナイト粒内から多数のフェライトが変態する。いわゆる粒内変態フェライトが生成されるため、一つのオーステナイト粒が多数の破面単位に分割される。これによって組織が微細化され、高温加熱された場合でも靱性が優れる。さらに、同じ原理からも非調質熱間鍛造鋼として V-N 鋼も開発された。

一般に、鋼の強度が高くなると優れた低温靱性を得ることは困難となるが、これらの鋼種の開発することにより、優れた諸特性を同時に達成できるため、新しい結晶粒の微細化技術として粒内フェライト変態の研究が注目を集めるようになった。

粒内フェライト変態のメカニズムについていろいろ研究が盛んに行われていたが、ほとんどフェライト変態核になる析出物 ( $Ti_2O_3$ 、VN など) について議論されている。しかしながら、実際は粒内変態鋼でも変態過程において粒界にフェライトが優先析出するため、粒界フェライトと粒内フェライトとの成長の競合が問題となるが、従来はこの点が無視されている。すなわち、変態の進行過程を考えて、変態のどの段階で粒内フェライトの核が発生するのか、その核生成する前に材料の内部構造がどのような変化が起こるのかについては研究されていない。

そこで、本研究では粒内フェライト変態の支配因子を明らかにするために、低炭素 V-N 鋼を主な対象として、変態進行の全過程に着目して、粒内フェライト発生段階、変態する前の組織の変化、その変化の役割の把握の解析を行うこととした。さらに粒内フェライト変態にどのような影響因子がどのように働くのかを調べることも今回の目的の一つとなる。

本論文は七章から構成されている。

第一章では緒論であり、本研究の背景および目的について述べる。

第二章では従来の研究および各章において基礎となる古典的核生成および成長理論について述べる。また、本研究で中心的な解析手法として用いた相変態速度論について紹介した。

第三章では本研究で共通している実験方法について述べる。材料は粒内フェライ

ト変態鋼として提案された V-N 鋼で、変態の進行過程を調べる実験は等温変態処理で行われた。

第四章では粒界フェライトの成長速度についての解析を行った。まず、粒内フェライトが析出する成分系の変態特性を検討することを目的とした。粒内フェライト変態鋼の V-N 鋼と低 N 系の V-C 比較鋼を用いて、粒内フェライトの析出について、等温変態における変態挙動を調べた。V-N 鋼は V-C 鋼より変態の開始が遅れていることが分かった。また組織の観察結果について、V-N 鋼は等温変態において粒内フェライトの析出が起きるが、粒界フェライトが先行する。しかし、V-C 鋼よりその成長が遅い。粒界アロトリオモルフフェライトの成長速度を測定した結果からは、V-N、V-C 両鋼とも放物線則に従うが、速度定数は V-N 鋼の方は小さい。その速度定数の違いは変態界面における炭素の過飽和度の差に起因があると考えられ、それについての解析を行った。過飽和度は VN 鋼及び VC 鋼ではそれぞれ 0.17、0.26 となり、対応するフェライトの界面炭素濃度はそれぞれ 0.29、0.35mass%となる。また変態進行の Johnson-Mehl-Avrami 式の解析によって、V-N 鋼の核生成速度が V-C 鋼より大きいことが分かった。

これらの結果から、V-N 鋼が粒内フェライトを生成する理由としては、VN が核生成サイトとして粒内析出を優先することよりも、むしろ粒界フェライトの成長を抑制する効果が結果的に粒内フェライトが生成する機会を与えていると推測した。

第五章では粒界フェライトの成長速度に及ぼすオーステナイト域保定の効果を調べた。等温変態において最高加熱温度から冷却中のオーステナイト温度域は変態の潜伏期にあたる。従来変態の潜伏期に起きる現象については研究がほとんどなされていない。そこで第四章で述べた V-N 鋼の粒界初析フェライトの成長速度が V-C 鋼より遅れている理由について、等温変態に先立つオーステナイト域で保定したときの効果を調べた。

V-N 鋼の変態速度の遅れはオーステナイト域の保定によって失われ、保定温度は変態の開始時間に対して“C”曲線的な効果を持つことが分かった。また、保定処理によって粒内フェライトの析出が抑制されることが組織の観察から確認された。

保定処理の効果の原因について、粒界初析フェライトの成長速度の解析を行った。速度定数はオーステナイト域の保定処理によって増加するが、これを変態界面の炭素の過飽和度と関係づけた。その結果過飽和度がオーステナイト域の保定処理によって大きくなる。また、THERMO-CALC の計算により、高温オーステナイト域で、V-N 鋼の炭窒化物の析出量は V-C 鋼に比べて著しく増加していることが分かった。

また変態進行の Johnson-Mehl-Avrami 式の解析からは、オーステナイト域の保定処理によって、V-C 鋼の等温変態で見られた二段階の変態進行が現れ、Avrami 式の解析指数からは粒界初析フェライトの核生成速度が低下していることによるもの

と考えた。

これらの結果から、V-N 鋼で粒界初析フェライトの成長速度が V-C 鋼に比べて遅くなる理由は、変態潜伏期において V(C,N)が析出してCを吸収するために、変態界面におけるCの過飽和度が減少するものと考えられる。

第六章では核生成速度におけるオーステナイト化温度効果について調べた。従来 V-N 鋼で粒内フェライトが析出することを報告した研究では 1300℃という高いオーステナイト化温度が用いられている。

V-N 鋼が粒内フェライトを析出するための条件として、先行する粒界初析フェライトの析出が少ない必要がある。一方 Johnson-Mehl-Avrami 式を用いた解析による初析フェライトの核生成速度の観点からは、V-N 鋼では粒界面が核生成サイトとなって核生成が比較的容易であるが、オーステナイト域安定処理によって核生成速度が減少する。したがって V-N 鋼における粒内フェライト生成条件としては核生成の観点からの検討も必要である。そこで等温変態における粒界フェライトの核生成速度に及ぼすオーステナイト化温度の影響を調べた。

等温変態の進行はオーステナイト化温度の上昇によって遅れる。その原因については、画像処理装置を用いて、等温変態における粒界フェライトの核生成速度を測定した。オーステナイト粒はオーステナイト化温度の上昇に伴って粗大化すると同時に、粒界単位面積当たりのフェライト核生成速度も低下していることが分かった。またフェライト核生成が定常状態ではなく、核生成速度が時間とともに増加する傾向が認められた。

Johnson-Mehl-Avrami の式による変態進行速度の解析では、オーステナイト化温度の上昇に伴って等温変態の進行が遅れることは変態が粒界面での核生成であり、核生成速度が早い場合に対応する結果が得られた。

これらの結果から、オーステナイト化温度の上昇による変態進行速度の低下は、単にオーステナイト粒の粗大化に伴うフェライト核生成サイト数の減少ではなく、オーステナイト粒界自体の状態（たとえば、合金元素の偏析）がオーステナイト化温度によって変化するためと考えられる。オーステナイト化温度を高くとることは粒内フェライトを析出させるための一つの必要条件となっていることが分かった。

第七章ではまとめであって各章の結果を総括している。V-N 鋼が粒内フェライトを析出する理由の一つとして先行する粒界フェライトの成長が遅れていること、また高温オーステナイト化が必要であることを明らかにした。この機構としてオーステナイト域における V(C,N)の析出が粒界フェライト界面のCの過飽和度を減少させること、またオーステナイト粒界の性質が関与することを示した。