

面心立方晶系耐熱合金の高温強度と微細組織に関する研究

伊藤, 孝矩

<https://hdl.handle.net/2324/1807075>

出版情報：九州大学, 2016, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：やむを得ない事由により本文ファイル非公開（3）

氏 名 : 伊藤 孝矩

Name

論 文 名 : 面心立方晶系耐熱合金の高温強度と微細組織に関する研究

Title

区 分 : 甲

Category

論 文 内 容 の 要 旨

現在、エネルギー変換効率の向上と環境負荷低減を目指して、内・外燃機関における操業条件の高温・高圧化が進んでいる。例えば、代表的な外燃機関である火力発電プラントでは、蒸気温度 700°C、蒸気圧 35 MPa に設定された次世代型発電システムの運用が計画されている。このような過酷な環境では、既存の体心立方晶系耐熱合金（主にフェライト系耐熱鋼）を適用することは極めて困難である。そこで、より優れたクリープ特性を有する面心立方晶系耐熱合金、特に Ni 基耐熱合金の適用が検討されている。これまでに開発された多くの Ni 基耐熱合金では、結晶粒内に $L1_2$ 型金属間化合物相 ($Ni_3(Al,Ti)$, 以降では γ' 相と表記) を微細分散させることでクリープ強度の向上を図っており、変形中の γ' 相の粗大化がその特性劣化を引き起こすことが知られている。また、 γ' 相の析出量を増加させ過ぎると熱間加工性が著しく低下することが問題となっており、 γ' 相による強化法に加えて、新たな材料強化技術の開発が求められている。

一方、代表的な内燃機関である自動車用エンジンでは、高い気密性を確保するための高性能ガスケットが必要であり、その部材となるオーステナイト系耐熱合金に対して、更なる耐熱性、高温での組織安定性および生産性の向上が求められている。そのためには、材料コストを極端に上げることなく高温強度を高めることのできる新たな組織設計・合金設計が必要不可欠である。

そこで本論文では、これら面心立方晶系耐熱合金の結晶粒界近傍または異相界面近傍の組織制御に注目し、微細組織とクリープ特性の関係を詳細に解析することで、面心立方晶系耐熱合金に共通する新たな高強度化技術を開発することを目的とした。

第 1 章では、エネルギー問題の現状や高温環境で使用される耐熱合金の開発、その問題点について説明し、本研究の目的と論文の構成を述べた。

第 2 章では、Ni 基耐熱合金中の炭素添加量を調整して、粒界炭化物の析出量を変化させたモデル合金を作製した。この合金について、クリープ試験と微細組織観察を行い、炭化物の粒界被覆がクリープ特性に与える効果を考察した。炭化物による粒界被覆量が少ない合金では、加速クリープ域において無析出物帯 (Precipitation Free Zone: PFZ) の形成がみられ、それに伴うひずみ速度の増加が認められた。また、PFZ の形成は、周囲の応力状態を変化させることが示唆されており、この粒界近傍の組織変化がクリープ特性を劣化させることを明らかにした。以上のことから、析出物によって高密度に粒界を被覆することは、クリープ弱化因子である PFZ の形成を抑制し、クリープ強度の向上に極めて有効に作用すると結論付けた。

第 3 章では、第 2 章で得られた強化概念を応用し、金属間化合物により粒界を被覆した新たな Ni 基耐熱合金について、その高温強度と微細組織の関係を調査し、粒界析出物によるクリープ強化機構についての知見を深化させた。本章で用いた合金では、初期組織からクリープ末期まで、高密度の金属間化合物 (Laves 相、 σ 相) によって粒界が被覆されており、クリープ弱化因子である PFZ の形成を効果的に抑制していた。すなわち、炭化物と同様に金属間化合物においても粒界被覆による強化が有効に作用することがわかった。これに加えて本合金では、クリープ変形に伴って数 μm の板状 Laves 相が結晶粒内に析出し、ひずみ速度の減少をもたらすという特異な挙動が認められた。以上のような、結晶粒内・粒界の析出物制御により、本合金では既存の Ni 基耐熱合金に比べて優れたクリープ特性を発現することが示された。

第4章では、MoとWの添加量を変化させた種々のNi基耐熱合金において、そのクリープ変形挙動と微細組織の関連性について調査した。第3章までに得られた知見から、MoとWは結晶粒内・粒界での金属間化合物の析出挙動を決める重要な添加元素であり、かつNi母相に対して固溶強化の効果を与えることも期待され、クリープ強度向上のため、それら添加量の最適化は極めて重要である。Mo当量(Mo+0.5W)が6~7 wt.%の場合、被覆率が0.6~0.7程度を維持し、母相の固溶強化が最も良好に働くことが明らかとなった。以上のことから、本合金においては、Mo当量が6~7 wt.%のときに最も優れたクリープ強度が得られることが明らかになった。

第5章では、第4章までで明らかとなった粒界析出物によるクリープ強化機構の概念を応用し、自動車ガasket用部材として実用化が進む高Mnオーステナイト系ステンレス鋼について、粒界析出物を利用してそのクリープ強度を向上させるための基礎的検討を行った。高Mnオーステナイト系ステンレス鋼は極めて良好な加工硬化性を有し、適切な加工を施すことで容易に高強度化することのできる合金である。一方で、高温環境下で生じる動的再結晶によって、その強度が著しく減ずることが問題視されている。本章では、加工硬化させた高Mnオーステナイト系ステンレス鋼にMoを少量添加して粒界上炭化物を熱的に安定化させ、それらが再結晶を抑制することでクリープ強度を向上させることを見出した。

第6章では、Ni基耐熱合金の粒内析出強化に着目し、タービンブレード材料である単結晶超合金における γ' 相の微細組織解析を行った。 γ/γ' 相間の格子不整合性を変化させた2種類の単結晶Ni基耐熱合金を用いて、クリープ変形中の特異な γ' 相成長挙動(ラフト化挙動)を3次元的に観察した。その結果、初期段階における γ' 相の配列性が良いほど、隣接プレートとの接触の少ない整然としたラフト組織が形成されることがわかった。また、このようなラフト組織は γ 母相を効果的に分断し、最小ひずみ速度の減少(クリープ強度の向上)をもたらすことを明らかにした。

第7章では、本研究で得られた知見をまとめて総括とした。