

学 位 論 文 題 名

熱間鍛造用非調質鋼の組成と 組織制御による材質向上に関する研究

学位論文内容の要旨

自動車のエンジン部品、足廻り部品、あるいは建設機械部品などは古くから炭素鋼あるいは合金鋼を素材とし、熱間鍛造で成形した後、焼入れ、焼戻し（QT処理）後に使用されていたが、このQT鋼は鍛造、焼入れ、焼き戻し加熱を必要とし、エネルギーコストが大きな問題である。その解決方法として、欧州では、熱間鍛造後、調整冷却するだけで従来のQT鋼と同等の強度特性の熱間鍛造用非調質鋼（以下非調質鋼）が開発された。しかし、バナジウム（V）を微量添加した非調質炭素鋼やマンガン鋼の場合、鍛造後の組織は粗大パーライトからなり、延性や靱性に劣っていたため、その適用可能な部品は靱性を必要としないエンジン部品に限定されていた。日本でも、エネルギーコストが高いことから、非調質鋼の開発が活発に行われ、現在は環境負荷を低減する必要性から一層、非調質鋼の改質が要求されている。特に、高靱性化（高衝撃値化）が大きな課題となっている。このような背景から、本研究では、フェライト・パーライト型非調質鋼とベイナイト型非調質鋼に注目しその機能向上を研究目的とした。

非調質鋼の主な研究課題は、フェライト・パーライト鋼の場合には、初期の非調質鋼を基に組成と組織を制御することによる靱性と降伏強さの向上である。降伏比や衝撃値は、低炭素濃度の制御により向上可能であるが、強靱化は困難である。従って、一定の組成を有するフェライト・パーライト鋼を強靱化するには、組織の微細化が最も有望であることから、鍛造組織の微細化を重要課題とした。

その第一として、組織微細化法として、第二相粒子の分散を利用した再加熱時の γ 相粒の粗大化防止、および粒内フェライト変態促進効果を検討した。実用化されているベイナイト非調質鋼では、中炭素のフェライト・パーライト非調質鋼の組成を基に焼入れ性を高めることにより強度を調整しており、組織制御を主眼とした鋼組成の適正化はなされていない。

鋼の機械的性質はベイナイト組織中に混在するマルテンサイトおよびオーステナイト相に起因するため、ベイナイト非調質鋼の強靱化には、ベイナイト鋼の降伏強さと衝撃値に及ぼす影響因子を明らかにし、鋼の適正な組成の鋼合金を設計することが必要であることからその指針を得ることを目的とした。

以下に各章の内容を説明する。

第2章では、フェライト・パーライト鋼の第二相粒子による再加熱 γ 相粒の粗大化防止について検討した。その結果、1)大きく析出するMnS粒子は、高温加熱時に γ 相結晶粒の粗大化に対してその抑制効果があること。また、 $Al_2O_3 + MnO$ がMnS粒子の析出サイトとして作用することから、その分散を最適化することにより、MnS粒子を微細分散できることを示した。2)また、TiN析出物は微細に分散するため、この析出を制御することにより、再加熱後の γ 相粒は微細化できた。TiN析出粒子は、鑄造後の冷却速度が速いほど微細化することを観察した。3)粗大かつ多高密度で粒子を分散させる粒子として、TiNとMnS粒子の複合析出を行った結果、再加熱による γ 相粒は一層微細化し、異常結晶粒成長も抑制された。

第3章では、粒内フェライト（IGF）変態促進によるフェライト・パーライト組織の微細化のための、フェライト・パーライト鋼における粒内変態促進効果について検討した。1)粒内フェライトはMnS上に析出した窒化物（VN）をサイトとして変態することから、VNを高密度で析出させることによって、フェライトを微細に変態できた。2)高温で加熱後放冷すると、Mn-depleted Zoneの形成が確認され、IGF変態において、Mn-depleted Zoneが有効に作用していることを示唆した。

第4章では、フェライト・パーライト鋼の材料設計に対する基本的考え方を工業的観点から実用化例を示し記述した。1)MnS粒子とVN析出の分散で組織微細化を図ったNQF23の実部品への適用を例に組織

微細化効果の有効性を示した。2) TiN析出物の大きさと衝撃値に及ぼす鑄造断面サイズの影響を明らかにし、そのTiN析出とMnS粒子の分散を利用したNQF33Tの成分設計と実用化について記述した。

第5章では、中炭素ベイナイト型非調質鋼の組織と機械的性質に及ぼす合金元素の影響を検討した。

1) 中炭素ベイナイト鋼における炭素当量式を実験的に求めた。炭素当量係数とBs点係数と間には高い相関性が認められ、ベイナイト鋼の引張り強さが変態温度に支配されることを確認した。2) 一方、組織形態とBs点係数とは相関関係は認められず、連続冷却したベイナイト鋼の組織を効率的に微細化するのはCr, Mn, Mo元素の効果であることを明らかにした。3) 組織と機械的性質に及ぼす焼戻しの影響に関しては、473K焼戻しにより、ベイニティックフェライト中の過飽和炭素が析出することに起因して衝撃値の向上が確認された。また、573K以上での焼戻しによって、軟質な残留 γ 相が分解することにより耐力を向上できることから、残留 γ 相量が少ないほど、耐力および延性は高くなることを見出した。

第6章では、0.2mass% Cベイナイト鋼の組織と機械的性質に及ぼすSiとNの影響を調べた。その結果、

1) SiはBs点、ベイナイト変態速度が最大となる温度B_{max}点、およびB_f点を低下させた。フェライト安定化元素のSiは、Bs点を高め、また、 γ 相中の炭素ポテンシャルを高める元素であることから、Siは炭化物の成長速度を抑制する効果があり、その結果、Bs点を低下させるのに有効に作用していることを示唆した。このようにして、Siは加熱放冷過程での組織の微細化とそれに伴う強靱化に有効であることを明らかにした。一方、 γ 相安定化元素である窒素（固溶N）は、加熱放冷材において、鋼の降伏強さの低下と衝撃値の大幅な低下要因となることを示した。

第7章では、0.05mass% Cベイナイト鋼の組織と機械的性質に及ぼすSiとNの影響を調べ、炭化物形成の影響を低減した場合の両元素の効果を評価した。その結果、1) SiはBs点温度を高めるが、B_{max}点、B_f点へ及ぼす影響は非常に小さいことを示した。一方、Siはフェライト安定化元素として作用しBs点を高め、炭化物の成長を抑制する結果、Bs-B_{max}点間の温度幅を大きくする効果があることを指摘した。また、Siは加熱放冷材の組織を微細化する。このSi含有鋼の衝撃試験から、破面単位の微細化により衝撃値が向上することを示した。2) NはB_{max}点を低下させ、残留 γ 相を低減させる効果があることを確認した。Nは γ 相中のCの活量を高め炭化物の成長を促進する効果が作用すると推定した。更に、固溶Nは加熱放冷により衝撃値の大きな低下の原因となることを示した。

以上の研究の結果、フェライト・パーライト型の強靱化が析出粒子の適正分散による組織制御により達成され、高靱性特性の自動車用足廻り部品への適用を可能にした。また、ベイナイト型非調質鋼においては、合金組成の制御により強靱化が可能でありその成分設計の指針を提案した。

学位論文審査の要旨

主査	教授	高橋 平七郎
副査	教授	石井 邦 宜
副査	教授	岡田 亜紀良
副査	教授	工藤 昌 行
副査	教授	大貫 惣 明

学 位 論 文 題 名

熱間鍛造用非調質鋼の組成と 組織制御による材質向上に関する研究

自動車のエンジン部品あるいは建設機械部品などに使用されている非調質鋼に対して、現在、環境負荷の低減、高靱性化が求められている。フェライト・パーライト系非調質鋼における課題は、初期型非調質鋼を基に組成と組織を改善することによる靱性と降伏強さの向上であり、一定組成のフェライト・パーライト鋼を強靱化する方法として、組織の微細化が有力である。また、ベイナイト型非調質鋼は降伏比や衝撃値など機械的特性が不十分であり、その強靱化にはベイナイト鋼の降伏強さと衝撃値におよぼす影響因子の解明と組成の適正化による材料設計が課題である。本論文では、非調質鋼の材質向上のための適切な組成および組織制御を明らかにすることを目的とした。

まず、フェライト・パーライト鋼の第二相粒子による再加熱 γ 結晶粒の粗大化防止について検討し、1) MnS粒子の析出サイトとして作用する $Al_2O_3 + MnO$ の分散を最適化することにより、MnS粒子の微細分散が可能となることを示した。2) 分散する粒子として、TiNとMnSの複合析出物を分散することにより、再加熱によるオーステナイト粒の微細化と結晶粒の異常成長の抑制に有効であることを認めた。また、3) Mg酸化物は微量の析出でもオーステナイト粒のピン止め粒子として有効に作用することを明らかとした。

次に、粒内フェライト変態促進によるフェライト・パーライト組織の微細化のためのフェライト・パーライト鋼における粒内変態促進について検討し、1) 粒内フェライトはMnS上に析出した窒化物が高密度で存在することにより、フェライト相が微細化すること、および、2) 高温加熱後の放冷でMn濃度枯渇領域が形成され、それに起因して結晶粒内変態が促進することを示した。

また、フェライト・パーライト鋼の材料設計に対する実用化のための基本的考え方を検討し、MnS粒子と窒化物の析出分散は非調質鋼品の組織微細化に有効であり、これら析出物分散を利用する成分設計の実用化を示した。さらに、中炭素ベイナイト型非調質鋼の組織と機械的性質におよぼす合金元素の影響を検討した結果、1) 中炭素ベイナイト鋼における炭素当量式を実験的に求め、炭素当量係数とベイナイト開始温度係数との間に相関性があり、ベイナイト鋼の引張り強さは変態温度に支配されることを確認した。さらに、2) 連続冷却したベイナイト鋼の微細化にCr, Mn, Mo元素が効果的であること、3) 473K焼戻しにより、ベイニティックフェライト中の過飽和炭素

の析出に起因して衝撃値の向上が図られ、573K以上での焼戻しでは残留オーステナイト相の分解により耐力が向上することを見出した。

最後に、ベイナイト鋼の組織と機械的性質におよぼすSiと窒素の影響を調べ、1)Siはベイナイト変態開始温度、ベイナイト変態速度が最大となる温度、およびベイナイト変態終了温度を低下させ、加熱放冷により、組織の微細化が起こり、それに伴い強靱化することを明らかにした。窒素もSiと同様にベイナイト変態開始温度および終了温度を低下させる効果があることを明らかにした。

これを要するに、著者は、非晶質フェライト・パーライト鋼、非晶質ベイナイト鋼の材質向上について、熱処理および合金組成に基づく組織制御による強靱化のための材料設計に関する新知見を得たものであり、金属材料工学に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。