

氏 名	田 代 均
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 4 年 7 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 49 年 3 月 東北大学大学院工学研究科金属材料工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	共析鋼極細線の強靱化に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 及川 洪      東北大学教授 西澤 泰二 東北大学教授 谷野 満

## 論 文 内 容 要 旨

共析鋼は硬鋼線、ピアノ線として幅広く実用に供されている強度の高い工業材料であり、その用途もスチールコード、ゴムホース、ワイヤロープ、ばね、PC鋼線、長大吊橋など広範囲にわたっている。

極細線に対する明確な定義はないが、ここでは直径が0.5mm未満の鋼線を極細線、それ以上を太径線と呼称する。極細線の場合、太径線より総量としての伸線加工歪を大きく取る。これは非金属介在物や中心偏析が問題とならなければ、線径が細くなるほど伸線加工しやすくなるためである。たとえば太径線の場合、伸線加工歪は一般的に2以下であるが、極細線の場合には3以上と大きい。

鋼線材の強化の基本思想は冷間伸線加工による加工硬化である。全パーライト組織になる組成範囲であれば加工硬化率はほとんど同じなので、伸線後の鋼線強度を増加させるには伸線素材の強度増加と伸線加工歪の増加が必要になる。しかし、極細線の高強度化を図るための基本設計に必要な合金元素、非金属介在物、中心偏析などがこれらの特性に及ぼす影響に関する情報は非常に少ないのが現状である。極細線は伸線加工歪が大きいので、伸線素材の強度を高めるために添加した合金元素が伸線加工性にどのように影響を及ぼすかは重要な問題である。また極細線は0.5mm未満と細いので精錬時に発生する非金属介在物、特に硬質で伸線加工性や伸線後の延性を劣化させる非延性介在物が問題となる。さらに、極細線の場合、最初のパテンティング省略のため熱間圧延後、直接熱処理が行われているので、中心偏析が存在するところの直接熱処理時、中心部にマイクロマルテンサイトが発生し、その後の伸線加工時の断線原因となる。したがって、これらの問題に対処するため

の系統的な設計指針を与える必要がある。

共析鋼への合金元素添加効果，強化機構に付いて多くの研究が行われているが，Bainによるフェライト硬度に及ぼす合金元素の影響のような系統的研究は行われていないのが現状である。今後パーライト鋼での高強度化を考える場合，合金元素の影響を体系化しておくことが基本的に重要である。

また，従来の共析鋼の伸線加工性に関する研究はほとんどが太径線に関するものであり，極細線に関する研究は極めて少ない。鋼の精錬，鑄造技術が進歩し，非金属介在物，中心偏析の少ない鋼の製造が可能になってきたことと製品の小容量化指向が合致したことにより極細線の需要が増加しつつある。しかし，これらの要求を満足する高強度極細線を製造するための系統的な設計指針が無いのが現状である。

以上の諸点を考慮して，次のような展開により本研究を進めた。

- (1) パーライト組織に及ぼす合金元素添加の影響については断片的な研究は多いが，系統的研究がないので，パーライト変態に及ぼす合金元素添加の影響について，変態温度，時間，パーライトラメラ間隔，ラメラの配向度などの基本特性の点から検討を行い，合金元素添加の設計指針を明らかにした。
- (2) 極細線の伸線加工性に及ぼす線径，合金元素，パーライト組織の影響について検討し，極細線に適したパーライト組織と鋼材の化学組成を提案した。
- (3) 極細線の工業的利用のためには鋼材の非金属介在物，中心偏析をいかに制御するかは重要な問題である。そこで極細線の強度，延性に及ぼす鋼材の非金属介在物，中心偏析の影響を明らかにした。
- (4) 以上の検討結果より実際に高強度極細線を試作し，その特性が目標に達しているか確認した。

本論文は全8章から構成されている。

第1章では本研究の背景と極細線における課題，目的を述べた。

第2章では本研究で使用した試料と実験方法についてまとめて示した。

第3章ではパーライト変態に及ぼす合金元素の影響について，共析変態開始温度，パーライト変態終了時間，パーライトラメラ間隔，ラメラの配向度などの基本特性の点から検討を行い，合金の設計指針を明らかにした。

合金元素の影響は各々の合金元素によって異なり，周期律表による統一的な説明はできない。

共析変態開始温度を高くするという観点から有効な元素はAl, Cr, Si, Mo, Co, パーライト変態終了時間を小さくするという観点から有効な元素はCo, Ta, パーライトラメラ間隔を小さくするという観点から有効な元素はMo, Cr, W, Si, Mn, Al, パーライトラメラの配向度を大きくするという観点から有効な元素はCo, Ni, またフェライトを固溶強化するという観点から有効な元素はSiである。ただし，MoはCrと異なりパーライト変態終了時間を著しく大きくするので工業的な利用は難しい。

パーライト強度を向上させるためにはパーライトラメラ間隔を小さくするCrとラメラの配向度を大きくするCo, Niの組合せ，また，パーライト変態終了時間をそれ程遅くしないフェライ

ト固溶硬化元素のSiの組合せが有効である。

第4章では極細線の伸線加工性に及ぼす線径、熱処理条件、合金元素の影響について検討した。

伸線加工限界歪および実用強度限界は最終熱処理線径の対数に対して直線的に変化する。伸線加工限界歪は $0.10\mu\text{m}$ 程度のラメラ間隔で最大値を示し、実用強度限界はラメラ間隔の減少に伴い増加する。より大きな実用強度限界を得るためにはラメラ間隔を可能な範囲で小さくすることが有利である。また、ラメラの配向度が大きいものほど極細伸線加工時の延性劣化が小さい。

高強度極細線に適したパーライト組織として望ましい組織はラメラ間隔が小さく、ラメラの配向度が大きいものであり、この目的のために $0.88\text{C}-0.5\text{Si}-0.25\text{Mn}-0.5\text{Cr}-2\text{Co}-0.1\text{Ni}$ の化学組成が適しているものと考えられる。Cは強度確保のための基本元素である。極細線の実用強度限界は $0.71-0.94\%$ Cの範囲では顕著な差がないので、工業上の利用を考えると初析セメントタイトの出現を抑制しやすい $0.88\%$ 程度が適当である。Siは固溶硬化作用が大である。しかし、同時にフェライトの加工変形能を低下させるため加工歪に対応する最適Si量がある。本研究で対象としている伸線加工歪 $3.5$ から $4.5$ の範囲では $0.5\%$ である。Mnは鋼の熱間脆性防止元素であるが、Mn添加により伸線加工後の延性が劣化する。そのため熱間脆性防止が可能な $0.25\%$ 程度の添加とする。Crはラメラ間隔を顕著に小さくする。極細線の強度・延性を改善する効果が $0.5\%$ 程度で飽和するので最適添加量は $0.5\%$ である。Co添加により伸線加工後の強度は変化しないが、ラメラの配向度が大きくなるので延性低下が小さくなる。配向度を大きくするには $2\%$ が必要である。

第5章では極細線の強度・延性に及ぼす非金属介在物の影響を明らかにした。

極細線で問題となるのは酸化物系の硬質な非延性介在物である。極細伸線加工時、撚り加工時の断線を引き起こすのは $\text{Al}_2\text{O}_3$ が主体の硬質介在物であり、線径の約 $10\%$ 以上のものである。また、非延性介在物は疲労特性を劣化させる。

極細線の酸化物系介在物としては $\text{Al}_2\text{O}_3$ 単体酸化物を析出しにくく軟質で、ガラス質が安定でかつ硬度測定時の圧痕からクラックが発生しにくいものが良い。推奨する介在物は6元系複合介在物 $41\text{SiO}_2-7\text{Al}_2\text{O}_3-10\text{CaO}-13\text{MgO}-17\text{MnO}-1\text{CeO}_2$ である。

第6章では極細線の強度・延性に及ぼす中心偏析の影響を明らかにした。中心偏析は $5.5\text{mm}$ 直接熱処理線材の伸線加工性を通して影響するので、この点から研究した。

直接熱処理線材の中心偏析部にミクロマルテンサイトが存在するとシェブロンクラック発生の原因となる。ミクロマルテンサイトが発生しなくても、中心偏析の程度によっては中心偏析が直接伸線加工中のコピー断線の原因になる。伸線加工限界と線材の中心偏析評点との間には対応関係が認められた。中心偏析の有害度を極力少なくするためにはパーライト変態遅延元素であるMn、Pを少なくし、パーライト変態促進元素のCoを添加すること、および直接熱処理時に伸線加工性を阻害しない範囲で冷却速度を遅くすることが有効である。

第7章では以上の検討結果から有用と考えられる合金を製造し、実際に極細線を試作し、その特性が目標に達しているか確認した。

開発成分系を溶製し $5.5\text{mm}$ 線材を製造した。低合金鋼ではあるが炭素鋼とほぼ同等の非金属介在物評点、中心偏析評点にすることができたので極細線として工業的な利用が可能である。熱間圧延

後の冷却速度を小さくすることにより完全なパーライト組織にすることができ、5.5mm線材からパテンティング処理無しに伸線加工が可能であった。種々の線径の極細線を試作したが、0.20mmで4000MPa、0.031mmで4700MPaの高強度極細線が得られることがわかった。

第8章で本研究を総括した。

## 審査結果の要旨

共析鋼細線は現用の金属材料としては非常に強度の高い材料であって極めて広い範囲にわたって使用されているが、最近是小容量化、軽量化の強い要請からより一層の細線化、高強度化が求められている。この目的を達成するためには共析鋼母材の強度向上や強加工にたえる加工性の向上などに関する知識が必要であるが、これらに関する系統的研究は見当たらない。本研究は高強度高靱性極細線製造のための合金設計指針を基礎的立場から得る目的で行われたもので、全編8章よりなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では本研究で用いた試料および実験方法をまとめて示している。

第3章ではパーライト組織に及ぼす合金元素の影響について述べている。共析変態の温度、時間、パーライトラメラの間隔、配向性、オーステナイトの結晶粒度などに及ぼす添加元素の影響を20種の合金元素の単独添加およびSi-Mn-Cr-Ni-Coの複合添加の場合について系統的に調べ、パーライト強度向上に対する合金元素添加の効果について考察を加えた。

第4章では極細線の伸線加工性に及ぼす合金元素の影響について述べている。伸線加工後の強度、延性に及ぼす線径の影響および合金元素添加の影響を調べ、Si, Cr, Coを含む合金系が有用であることを見出した。

第5章では極細線の強度、延性に及ぼす鋼材中の非金属介在物の影響について述べている。極細線の疲労特性、撚り加工性などに及ぼす介在物の塑性変形能の影響を調べ、介在物を望ましい組成とする改善指針を示した。

第6章では極細線の強度、延性に及ぼす鋼材中の中心偏析の影響について述べている。中心部のミクロマルテンサイト発生や加工時の中心部き裂発生・伝播と中心偏析との関係を調べ、高強度極細線製造のためには中心偏析の軽減が重要であることを明らかにした。

第7章では3～6章で得た知見に基づいて、極細線用の新組成を提案し、その試作と特性調査を行い、高強度高靱性極細線が実際に得られることを述べている。

第8章は総括である。

以上要するに、本論文は、共析鋼極細線の強靱化のための設計指針を確立し、それに基づいて新組成鋼を提案したもので、材料工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。