

高濃度窒素鋼の組織と機械的性質 (2)

窒素による高強度低合金鋼の開発

Development of High Strength Low Alloyed Steels with Nitrogen

坂本政紀

Masatoshi Sakamoto

宮城工業高等専門学校 材料工学科 教授

1 はじめに

一般に、鉄鋼中の窒素は有害元素として知られている。すなわち、窒素の添加は微量であっても高い強度の増加を示すが、非常に脆くなるために避けられてきた。それゆえ、窒化処理は表面硬化法の一つとして実用化されているに過ぎない。

最近、高濃度の窒素を含むCr-Mn-N系オーステナイトステンレス鋼が実用化されてきた。同ステンレス鋼は高価なNiを含まず安価であり、Niアレルギーが避けられ、応力腐蝕割れに強くまた加工硬化率の高い高強度材料としても注目されている。

近年、フェライト鋼では窒素によるガス-金属反応を利用した組織制御高強度鉄鋼材料の研究が進められてきている。窒素は少量でも高い強化作用を示すことから、窒素による高強度低合金鋼の開発が望まれてきた。窒素による開発研究はK.H.Jackら^{1,2)}によって進められ、均一で微細な整合析出物の析出によるものと言われている。この種の整合析出物による強化は靱性の低下を伴わずに行える面が期待されている。

そこで、本研究は従来の高強度低合金鋼 (HSLA 鋼) より優れた窒素添加による高強度フェライト鋼の開発を目的として、Fe-Nb系合金の機械的性質に及ぼす窒素の影響を検討した。すなわち、窒素と親和力の強いNb元素を添加して冷間加工後NH₃+H₂混合ガス中で窒化することにより、著しい強化とともに延性の高い材料の開発を目指した。Nb元素は結晶粒の微細化および特に再結晶温度の高温化に著しい効果を示すことから、延性の保持が期待できる。

本論文では、冷間加工後に窒化して、Fe-Nb合金、Fe-Nb-Mn合金およびFe-Nb-Mn-Ni合金の機械的性質につ

いて³⁾ さらに、これら合金の昇温特性について⁴⁾ 得られた結果をまとめたものである。

2 実験方法

試料には真空溶解により作製された各種合金を用いた。板厚5 mmの熱間加工材を厚さ1-2 mmまで冷間圧延し、1073Kで焼鈍後冷間加工した板材を試験片とした。引張試験用の試験片は平行部の長さ20 mm幅5 mm厚さ1 mmであり、表面は機械研磨後電解または化学研磨された。試験片への窒素の添加はNH₃+H₂混合ガス中で加熱保持して行われた。加熱温度は主に873Kで1時間保持後炉冷された。均一に窒化され、窒素量はNH₃濃度により調整され、窒化処理前後における重量差を秤量し、重量増加により求めた。また水素処理は窒化後に主に873KのH₂気流中で行われた。引張試験は0.5 mm/minのcross head speedで行われ、また昇温試験は473Kまでは10⁻³ Paの真空中で473K以上ではArガス中で0.2-0.5 mm/minのcross head speedで行った。

3 実験結果および考察

3.1 Fe-0.1Nb合金の機械的性質

Fig.1はFe-0.1 wt % Nb-0.02 wt % N合金の応力-歪曲線であり、水素処理したものとししないものについて示している。水素処理によって伸びが大きく増加することが明らかである。延性は冷間加工、窒化処理、窒素濃度、水素処理など種々の条件に依存している。

これらの影響の結果をFig.2に示す。最も高い伸びは600 MNm⁻²での12.5%である。窒化したFe-0.1Nb合金が良好な伸びと靱性を持つことは重要なことである。

Fig.3は引張強さと伸びを窒素濃度について纏めたもので

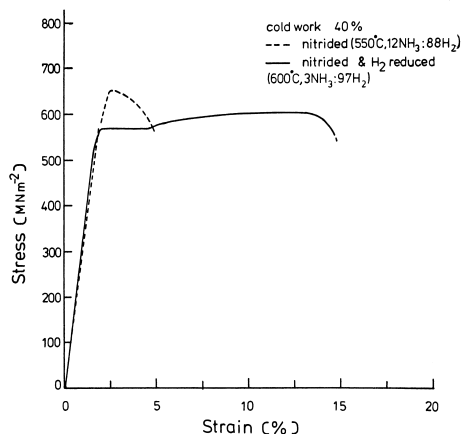


Fig.1 Stress-Strain curves of Fe-0.1Nb-0.02N alloys.

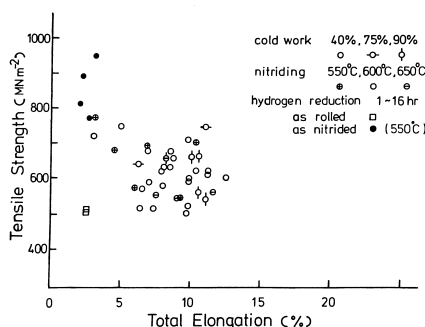


Fig.2 Mechanical properties of nitrided Fe-0.1Nb alloys.

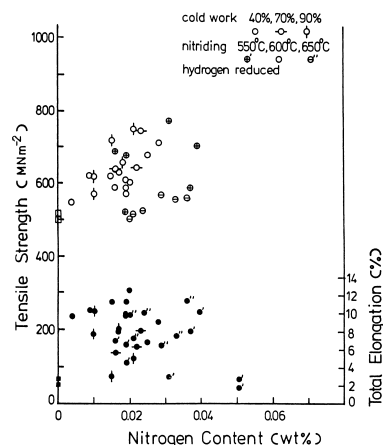


Fig.3 Mechanical properties and nitrogen content of Fe-0.1Nb alloys.

ある。高い窒素濃度では伸びが低い、窒素濃度に対する伸びの依存性はあまり明瞭ではない。引張強さは窒素濃度とともに増加している。

3.2 Fe-0.1Nb-1.0Mn合金およびFe-0.1Nb-0.5Mn-0.5Ni合金

Mnの添加は強度には大きな効果は示さないが、伸びに対して著しい効果を示している。750 MNm^{-2} で17%の伸びを、600 MNm^{-2} では20%の伸びが認められた。Fig.4は引張強さと窒素濃度との関係を各圧化率について纏めたものである。0.03 wt%の窒素濃度で高い引張強さに到達している。20%までの圧下率で約700 MNm^{-2} の強度である。

Fig.5はFe-0.1Nb合金に2 wt% Mnおよび0.5 wt% Mn + 0.5 wt% Niを添加した合金の結果をまとめて示している。Mnは伸びを大きく増加させるが2 wt%の添加は1 wt%と同程度であった。しかしMn合金にさらにNiを添加すると伸びと強度の両方が良くなることが示されている。

図からこれらの合金はHSLA鋼の領域に十分に達していることが明らかである。Niの添加は一般に結晶粒の微細化と伸びの向上を期待できるが、本研究の結果でも良好な結果が得られた20-30%の伸びと600-700 MNm^{-2} の引張強さを示すHSLA (High Strength Low Alloyed) 鋼の領域を越えるものも現れている。これらの結果から、MnやNiの添加はFe-Nb合金の伸びに関して著しい有効性を持つことが解った。また、冷間加工後窒化したFe-Nb合金は非常に良好な靱性を持ち、さらにニュータイプのHSLA鋼として用いることが期待できるであろう。

上記のようにFe-Nb系合金では良好な高い伸びを示しているが、他の合金系TiやVなどの窒素との親和力の強い元素では認められず、Nb元素特有の現象である。TiやVを添加すると1000 MNm^{-2} を越える著しい強度の増加は認められるが、伸びは殆ど得られず数%に留まっており、非常に脆くなっている。この高い伸びはMnやNiの添加によってさらに延性を増加させていることが上記の結果において示されており、MnやNiの延性向上に大きな効果を持つと言えるであろう。

一方、前述の再結晶温度について、0.1 wt%のNb添加は再結晶温度を著しく上昇させ、窒化温度以上にならないと再結晶しない。これはNbの添加により転位が著しく安定化されて、高温度までNbと転位との相互作用が強く安定化され

ていることを示している。この状態で窒化によって窒素原子が侵入し、Nbと転位との相互作用に窒素原子が何らかの作用を付け加えることによって大きな延性を引き出しているように考えられる。しかしその詳細についてはさらなる研究を待たなければならない。

3.3 Fe-Nb合金の昇温引張試験

Fig.6はFe-Nb合金の引張試験の応力—歪曲線を各温度について示している。

低温（液体窒素）では引張強さは非常に高い値（1200 MNm^{-2} ）を示すが、しかし伸びは非常に小さい。この値はDaibisら⁵⁾の値とほぼ同じである。これらの試料は0.02-0.03 wt%の窒素を含んでおり、373-473Kの温度範囲に鋸歯状のserrationが見られる。一般にこのserrationは軟鋼でよく見られ、423-523Kで現れ、そして窒素と転位との相互作用に起因すると言われている。この合金では著しく低い温度に出現している。一般的には窒素との親和力が強い合金元素が入るとserrationの出現温度を高めることが認められている。それゆえ、本研究の結果はうまく説明できない。このことは、前記のようなNbと転位と窒素原子との何らかの相互作用に基づき起こっている現象であろうと思われる。

4 まとめ

冷間加工後に窒化したFe-Nb系合金は非常に良好な靱性を持つゆえ、新しいタイプの高強度低合金鋼として利用でき、窒素による強化鋼が開発された。フェライト鋼における窒素の有効性が認められ、今後の発展が期待される。

参考文献

- 1) K.H.Jack : Scand.J.Metals, 1 (1972), 195.
- 2) J.Driver, D.Unthank and K.H.Jack : Phil.Mag., 26 (1972), 127.
- 3) M.Sakamoto : Proce. of 2nd Int. Conf. of High Nitrogen Steels, Aachen, (1990), 244.
- 4) M.Sakamoto : Proce. of 3rd Int.Conf. of High Nitrogen Steels, Kiev, (1993), 474.
- 5) R.Davis and C.Magee : J. of Metals, 17 (1979), 290.

(2002年8月26日受付)

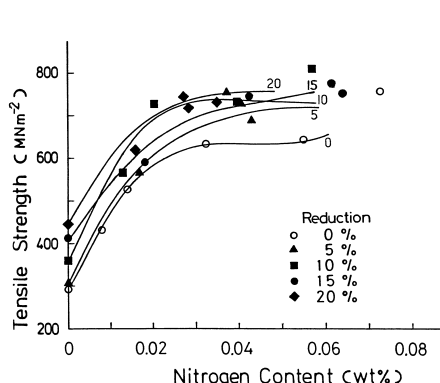


Fig.4 Relation between tensile strength and nitrogen content of Fe-0.1Nb-1Mn

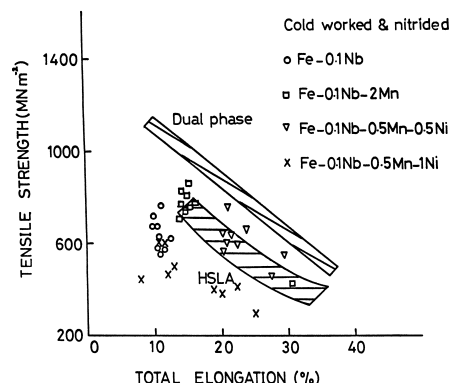


Fig.5 Mechanical properties of strength-nitrided steels.

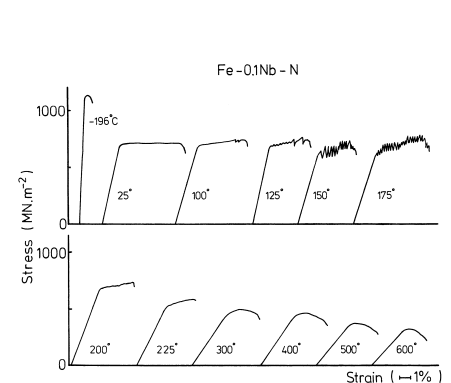


Fig.6 Temperature dependence of stress-strain curves of nitrided Fe-0.1Nb alloys.