

討33

制御圧延鋼の強靱化作用におよぼす γ 域加工の影響

住友金属工業(株) 中央技術研究所 福田 実[※]・橋本 保
国重和俊 沢村武彰^{※※}

1. 緒言

圧延まゝで強靱性の優れた鋼板を製造する方法である制御圧延法 (Controlled Rolling) は、オーステナイト域加工を主体に、一部にはオーステナイトとフェライトの二相域加工を鋼の性質改善に利用する方法である。厚板圧延後に A_{c3} 点以上に再加熱処理される焼ならし鋼又は焼入焼戻鋼に対し、この再加熱処理がないのでオーステナイト域での加工条件が $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態を通じてより強く受け継がれている点で、比較的単純な熱サイクルのわりには鋼の強靱性は製造条件によって複雑な挙動を呈する。

報告者らは、かゝる多因子、多面性を有す制御圧延鋼の強靱化作用を、極力広範囲な観点から総合的に理解すべく試みてきたが、図1に示すような相互関係から強靱性が成り立っているのではないかと考える。図1の細粒化¹⁾・加工硬化²⁾・析出強化¹⁾・変態強化⁸⁾の4因子の中で細粒化作用は最も多く研究されておりその重要性から判断しても、制御圧延を結晶粒微細化圧延と形容しても過言ではなかろう。しかしながら他の3因子も、特に鋼の高強度化に対しては重要な役割を演ずるものである。本報では細粒化ほど議論のつくされていない析出強化と変態強化の2作用に関し、ともにオーステナイトの低温域での強加工により非脆化型の析出強化と、二相混合組織への分離型変態による強化の促進と云う、圧延加工の影響なしでは考えられない特異な現象を報告する。

2. V, Nbの析出強化作用と低温靱性の関係

2.1 析出強化と脆化に関する実験結果からの知見

V, Nbの微量添加によりもたらされる析出強化作用は焼ならし鋼、焼入焼戻鋼をはじめとして、一般にその強化にともない低温靱性が劣化するとされている。制御圧延鋼においても800℃以上の圧延終了温度のような高温仕上圧延材の析出強化は脆化を伴うものであるが、若干のフェライト域圧延を含めオーステナイトの低温域で強圧下を加えた制御圧延鋼では析出強化に伴う脆化の割合が著しく減少する¹⁾実験事実から非脆化型の析出強化の存在の可能性を提案した。

オーステナイト域の加工温度の違いによるこの析出強化と脆化の事実関係を一層明確にすべく、オーステナイト域圧延条件を一定にかつ加熱温度を変化した圧延まゝ処理、圧延+テンパー処理、直接焼入+テンパー処理、の一連のオーステナイト域加工処理と同一加熱、冷却法にてオーステナイト域での加工のみのない処理、等各種の加工熱処理法にて基準鋼として0.10C-1.3Mn鋼の性質と比較しながら、0.03Nb鋼、0.11V鋼の強度、靱性が如何に変化するか調べた。結果の1例を図2に示す。今回得られた結果ならびにこれまでの知見をまとめると次の如くである。

①析出強化(ΔTS): 加熱温度が高い程 ΔTS は大。又焼ならし法(Norm.)と圧延まゝ(As Roll)では、オーステナイト域加工のある後者の方が ΔTS は大。1100℃加熱圧延まゝ処理にて、970

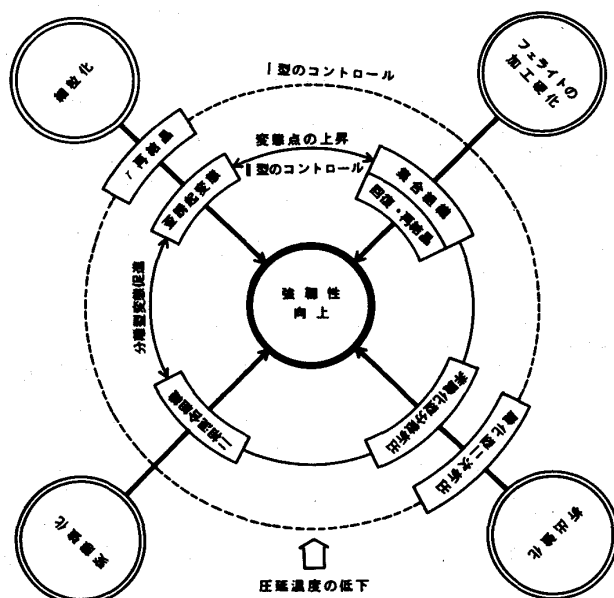


図1. 制御圧延鋼の強靱性と主要4因子の結びつきの圧延条件による変化

～700℃間の仕上温度を変えた場合、 ΔTS は低温仕上の方が若干大きい。(圧延による析出強化の促進作用)

②析出脆化($\Delta FATT$): オーステナイト域加工のない場合は10 kg/mm²の強化に対し40℃の破面遷移温度の上昇を伴う。他方オーステナイト域圧下材では強下に伴う脆化が抑制される。低温仕上ほど脆化の抑制は大きいことが判明。(圧延による析出脆化の抑制作用)

③析出量: 酸不溶のV, Nb量の定量結果はVのオーステナイト域圧下材の析出量が多い。

Nbは差異不明。(圧延による析出量の増加)

④析出物の大きさ: i) 直接観察又は抽出レプリカにて観察される200 Å程度の析出物は焼

らし材, 圧延まゝ材とも強度の低い低温加熱材ほどむしろ量が多く, 強度の高い高温加熱材で量が減少する。又圧延材では強度の高い低温仕上材の方の量が少ない。(容易に観察可能なサイズの析出物は強度に対して無効又は寄与が小さいのであろう。) ii) ③項および④のi) よりいずれにしても強度に有効な析出物の大きさは100 Åか以下のかかなり小さい大きさと思われる。 iii) 別の実験例では水素ガスを用いた電界イオン顕微鏡観察の結果, 高温仕上材では120～250 Åの析出物が散在し, フェライト地のイオン像は明確なのに, 低温仕上材では80～120 Åの微細な析出物が均一に多数分布して、フェライト地のイオン像は不明確で歪んでいることを示唆する相異が認められた。⁴⁾

2.2 非脆化型析出物の推察

以上の知見よりオーステナイト域での加工のない単純熱処理および高温仕上材での脆化型の析出強化は二次析出強化に相当し, 低温仕上の脆化を伴わない析出強化で, Ac_3 点直上程度の極低温加熱の場合にはむしろ靱性が多少改善されるような析出強化は分散強化とみなすことができるのではなかろうか。実際の制御圧延鋼の析出強化はこの2種の析出強化の和で与えられ, 低温圧延を行うと二次析出強化が減少し, 分散強化型の析出物が増加するため脆化が抑制されることが可能である。二次強化型の析出物は分散型の析出物よりは低い温度でフェライト地中に整合性をもって析出するだろう。一般に二次強化はこの整合歪ゆえに大きな内部応力場を有するため, 亀裂の進展をこの歪エネルギーの解放により助長すると考えられている。④のi) 項にて認められる析出物はこのような二次強化型の析出物ではなく, 未固溶析出物又はオーステナイトの高温域析出が主体であろう。これに対し分散強化型の析出物としては次の二態の可能性が考えられる。オーステナイトの低温域にて導入された欠陥を析出サイトにした, 微細均一分布の析出物, および二次析出強化型よりは高温のフェライト地に同じく圧延により導入された高密度転位群を析出サイトにした微細均一分布の析出物である。オーステナイト地, 又は欠陥フェライト地への析出を問わず, 高密度の転位群に析出した微細析出物は図3の右図に示すごとく初めから基地と整合性を持たない, 非脆化型の分散強化を示すのではなかろうか。

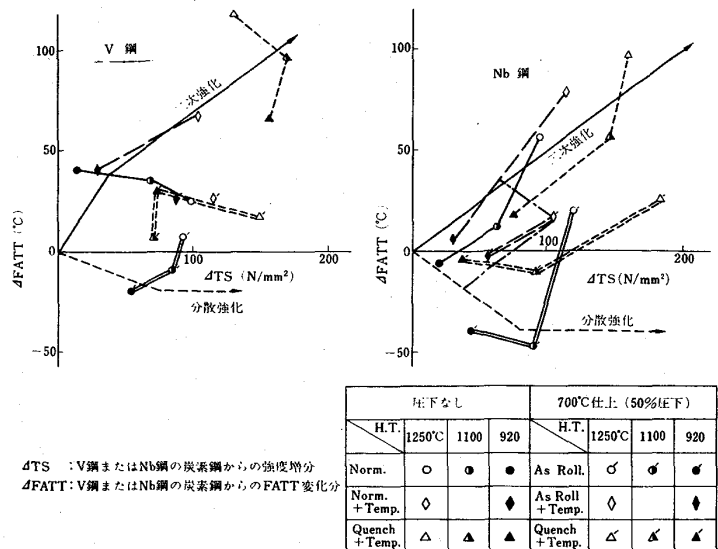


図2. 析出強化と脆化の関係におよぼすオーステナイト域圧延の影響 (板厚11mm)

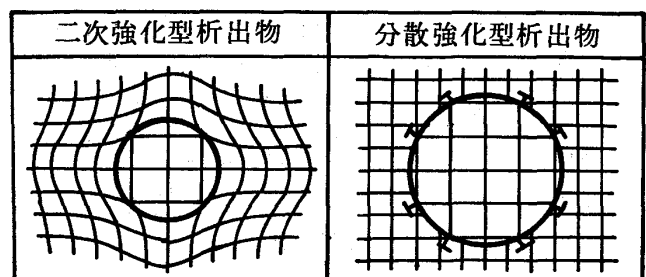


図3. 析出物状態の模式図

3. 変態強化とその利用法に関する検討

3.1 制御圧延による分離型変態の促進

Mn, Mo, Cr等の鋼の焼入性を高める元素を多く含んだ制御圧延鋼のマイクロ組織はオーステナイト域での加熱・圧延条件と密接な関係がある。オーステナイト域での加工の加わらない焼ならし型の処理の場合には粗いベイナイト相組織を生じやすいが、加熱温度の低下、低温域加工度の増加によりポリゴナルフェライトを生成し低温変態組織との二相混合組織へと変化する。これら二相混合組織生成に対する主要成分元素・圧延条件の影響を調査した結果、二相への分離型変態とでも称すべき現象が認められた。

0.05C-0.25Si-1.9Mn-0.25Mo-0.06Nb-0.03Al鋼をベースに、Mo, Si, Mn, Cなどの合金元素を増減した供試鋼に圧延A(1100℃加熱, 750~700℃間67%圧下), 圧延B(920℃加熱, 800~700℃間75%圧下)の2圧延を仕上板厚5%になるべく実施した。圧延後冷却途中の鋼板を逐次水食塩水中に焼入れした時の焼入温度と引張強さの関係より変態の進行状況を知ることができる。図4はMn量の影響を示す。1.95Mnのベース鋼にて700~600℃間の強度低下は $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態の進行により、500~300℃間の強度低下はベイナイト又はマルテンサイト変態の進行を示し、両変態の中間に強度不変、即ち変態の潜伏期が存在する。この温度範囲は圧延Bの方が広い。一方4.1Mn鋼では、このような潜伏期は存在せず500~400℃間でベイナイト

変態のみ進行する。同様に0.93Mnでは700~450℃間にてフェライト、パーライト変態のみが進行する。これは適度の焼入性を有す鋼をオーステナイトの低温域で強圧下するとフェライト変態とベイナイト変態が明瞭に分離される現象を生じ、かつ圧延Bの如く、低温加熱、強圧下の方が、フェライト変態はより高温側へ、ベイナイト(又はマルテンサイト)変態はより低温側へと移行し、圧延による分離型変態とでも称すものである。図5は同じくSi量の影響を調べた結果であり、Mnの場合とは逆にSi量の増大とともにフェライト変態とベイナイト(又はマルテンサイト)変態の分離は一層起りやすくなる。

表1は空冷材のマイクロ組織より混合組織の比率の定量結果を示す。Mn, Moに対しSiはその増量により低温変態組織の比率が減少する特色を示す。ベイナイト+マルテンサイトの硬質部の硬さはいずれの成分もその増量とともに硬さを増している。特にSiの場合には硬質部の面積率は減少するにもかかわらずその硬さが上昇する結果、Siの固溶強化約1kg/mm²/1%Siから得られる以上の強度上昇が変態強化によって得られることになる。又圧延Aと圧延Bとでは圧延Bの方が分離型変態を生じやすく、フェライト量は多くて、低温変態生成物の量は少ない。しかしこの硬質部の硬さは圧延Aよりも硬いために鋼の強度は圧延Aと同等

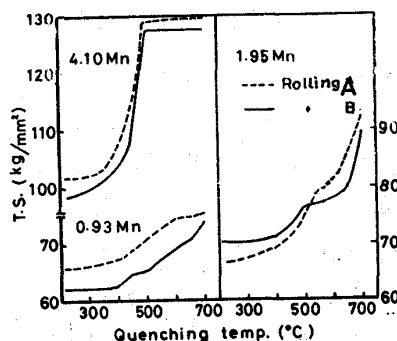


図4. Mn量と変態進行の関係

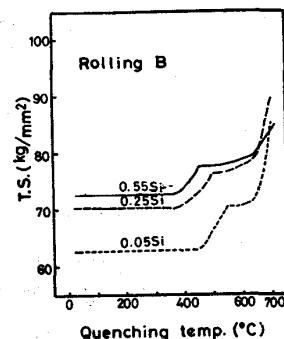


図5. Si量と変態進行の関係

		Rolling A				Rolling B			
		50 (%)	100	H _V [*]	T.S.	50 (%)	100	H _V [*]	T.S.
Mo	0 (%)	190	60	225	63	225	63		
	0.25	210	67	235	71	235	71		
	0.40	235	72	245	72	245	72		
Si	0.05	200	66	185	63	185	63		
	0.25	210	67	235	71	235	71		
	0.55	235	73	260	72	260	72		
Mn	0.93	210	64	205	62	205	62		
	1.95	210	67	235	71	235	71		
	4.10	300	101	285	98	285	98		

Legend: $\square$ F_D $\square$ F_P $\blacksquare$ B+M $\boxtimes$ Pearlite

表1. 最終マイクロ組織の構成比および性質と主要元素の関係 (F_D:加工フェライト, F_P:ポリゴナルフェライト, B+M:ベイナイト+マルテンサイト)

か又は高強度である。V, Nb等の析出強化が圧延加熱温度の低下によりその作用が弱まるのに対し、変態強化作用、とりわけ分離型変態強化作用は低温加熱ほど有利であることは靱性面で注目値する。

3.2 変態強化の利用法

低温域強圧下の制御圧延により分離型変態を生じた二相混合組織鋼は微細ポリゴナルフェライトによる低温靱性、高延性と、微細硬質組織による高強度の特色を有し強度-靱性-延性に関して興味ある組み合わせが可能である。これまでに得られた知見をもとに次の2法の利用が考えられる。

高強度高靱性鋼：低温加熱、低温域強圧下の主として圧延加工による分離型変態の促進作用を利用した方が同一成分であってもより高強度・高靱性が得られる。このような観点から実験的に試作した板厚30%のAs Rolled型の80 kg/mm²級高張力鋼のマイクロ組織を写真1に示す。微細なポリゴナルフェライトと低温変態生成物の二相混合組織であり、80 kg/mm²級に十分な強度と良好なシャルピー特性（vTs=-150℃）が得られた。

高強度高延性鋼：多量のポリゴナルフェライトと少量の硬質組織の組み合わせにより高強度高延性鋼が可能である。この場合には上記低温加熱低温強圧下型ではフェライト変態の促進が著しくフェライトの加工による延性低下をさけねばならない。表1の圧延Aと同Bでは後者の方が加工フェライトの量が多い。その結果図6に比較すると圧延Bの方が同一強度でも破断伸びは小さい。圧延Aの如く、加工フェライトの生成をさけながら、Siの多用等により分離型変態を促進した形で二相混合組織を作ることが望ましい。

4. 結 言

制御圧延鋼の強靱性因子の中で比較的検討の少ない析出強化と変態強化に関し、オーステナイト域の加工条件とこれら因子の変化挙動を調べた結果、次の知見を得た。

- ① オーステナイト域の高温域圧延材は脆化を伴った強化、即ち二次析出強化が主体であり、低温域強圧下により、この二次析出が減少し、脆化を伴わない分散型の析出が増してくる。この結果脆化が抑制された形で強化のみが進行するようになる。（非脆化型の析出強化）
- ② 適度な焼入性を有す鋼をオーステナイトの低温域で強圧下するとポリゴナルフェライトとベイナイト（又はマルテンサイト）との二相混合組織を生成する。その変態挙動はフェライト変態は高温側へ、ベイナイト変態はより低温側へ移行することから丁度両変態が分離するような現象を生じる（分離型変態）。フェライト生成型のSiの増量はこの分離型変態を促進する。

5. 参考文献

- 1) 福田, 橋本, 国重: 鉄と鋼, 58(1972) P.1832
- 2) 福田, 橋本: 鉄と鋼, 61(1975) S670, S671
- 3) 福田, 沢村, 橋本: 鉄と鋼, 63(1977) S283, 284
- 4) Y. YASHIRO, T. ABE and N. IGATA: Trans. ISIJ, 16(1976) P.523

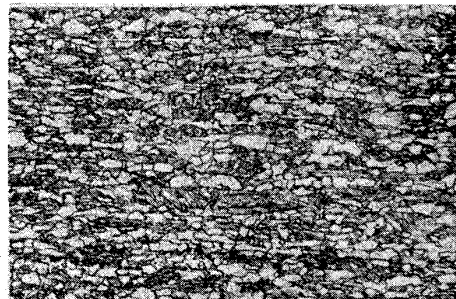


写真1. As Rolled 80 kg/mm²高張力鋼のマイクロ組織(×500×%)

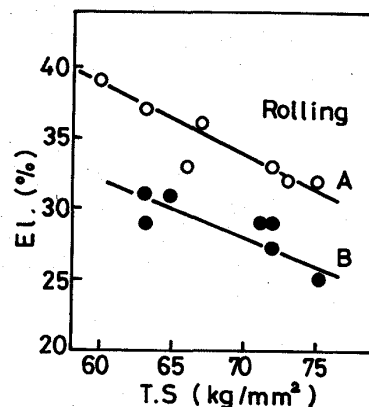


図6. 強度と引張破断伸びの関係