

討32

熱間圧延におけるオーステナイトの再結晶挙動と圧延後の
変態組織について

(株)神戸製鋼所 加古川製鉄所 梶 晴男

中央研究所 ○ 町田正弘、勝亦正昭

1. 緒 言

高靱性を具備した非調質ラインパイプ用鋼板の製造法として急速に発展した制御圧延技術は、省資源、省エネルギー対策が急務である昨今の社会的・経済的要請も一因となり、単にラインパイプ用鋼板の製造にとどまらず、広く低温用鋼、高級線材、棒鋼、型鋼等の製造への適用も検討され、一部、制御圧延による製造が、既に工場段階で実施されている。加工熱処理としての制御圧延は、オーステナイト(γ)を高温域(再結晶 γ 域)で微細化し、さらに低温域(未再結晶 γ 域)で γ 粒を伸長化し、粒界面積を増加させるとともに加工下部組織の導入によって、変態組織を微細化し、高靱性・高強度を得ることを目的としている。

ここでは主に γ の高温域圧延で結晶粒微細化を図る上の重要な基礎的知見である熱間圧延過程における γ の再結晶挙動を報告し、更に、針状フェライト組織に注目した際の変態組織に及ぼす圧延条件の影響、変態組織と靱性の関係についても言及する。

2. 熱間圧延によるオーステナイト再結晶挙動とそのメカニズム

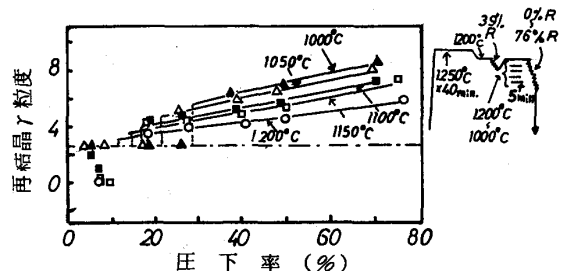
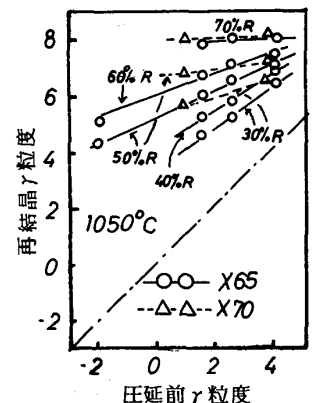
第1表に示す供試材を用い、圧延直後の再結晶 γ 粒度が、圧延温度、圧下率および圧延前 γ 粒度によりどのように変化するかを調査した。圧延前板厚は全て20mm、用いた圧延機のロール径、回転数は500mm、18r.p.m.である。得られた結果の1例を第1図に示す。

第1表 供試材の化学組成 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb	Al
X65	0.11	0.26	1.35	0.011	0.008	—	—	0.046	0.027	0.016
X70	0.06	0.14	2.04	0.012	0.007	0.11	0.84	—	0.049	0.020

再結晶 γ は、圧下率の増大や圧延温度の低下に伴って、細粒化する。また、高温域(1100℃以上)で10%以下の軽圧下を付加すると、平均粒度としての再結晶 γ は、圧延前 γ より粗大になる。この挙動については、次節で詳述する。図中に示す縦線は、 γ を完全再結晶させるに必要な臨界圧下率である。本研究から、臨界圧下率は、圧延温度の低下や圧延前 γ の粗粒化により、増大することがわかった。また、臨界圧下率の圧延前 γ 粒度依存性は、圧延前 γ を細粒にする程、減少する。さらに臨界圧下率の鋼種依存性は少ないこともわかった。第2図には、圧下率をパラメータとした場合の再結晶 γ 粒度番号と圧延前 γ 粒度番号の関係を示す。再結晶 γ 粒度番号と圧延前 γ 粒度番号の間には、良い直線関係が成立することがわかる。また、再結晶 γ 粒度番号の圧延前 γ 粒度番号依存性は、圧下率の増大とともに減少し、70%と高圧下を付加すると、再結晶 γ 粒度は、圧延前 γ 粒度にほとんど関係しないことがわかる。再結晶 γ 粒度に関して得られた上記知見を基に、以下、熱間圧延過程における γ の再結晶を支配するメカニズムについて考察する。

圧延後、直ちに水冷しても再結晶が完了してしまう高温 γ 域の再結晶を支配するメカニズムは、大別すると動的再結晶と静的再結晶に区別できる。ここで、動的再結晶とは、圧延中に再結晶が進行するものであり、再結晶 γ 粒径は、圧延前 γ 粒径および変形量に無関係に変形応力で決定されることが知られている。本結果では、第2図に示したとおり、広範囲の圧延条件下で、再結晶 γ 粒度が圧延前 γ 粒度および圧下率に依存することが明らかである。この事は、本実験の再結晶が、動的再

第1図 再結晶 γ 粒度と圧延温度、圧下率の関係(X65)第2図 再結晶 γ 粒度と圧延前 γ 粒度の関係

結晶に支配されないことを示す。そこで、静的再結晶の見地から本実験結果を考察する。静的再結晶理論によれば、再結晶粒度は、1次再結晶と1次粒成長によって決定されるが、本実験の再結晶 γ 粒度は、圧延後保持中の粒成長挙動の解析からは1次再結晶で決定されることがわかった。1次再結晶¹⁾は、核の生成頻度と核の成長速度に支配され、これまでの研究によれば一定温度における変形量、初期粒径は、核の生成頻度と強く関係することが知られている。したがって、本実験の圧延前 γ 粒度および圧下率も、核の生成頻度に影響を及ぼすことを通して再結晶 γ 粒度と関係すると考えられる。ところで、圧延中の γ 粒は、第3図に示すように、圧延で与えられる変形量に応じて伸長化し、再結晶核生成位置に寄与する粒界面積も変化する。この伸長粒界面積 Svg (mm^2/mm^3)は、Underwoodの解析²⁾によって(1)式で与えられている。

$$Svg (\text{mm}^2/\text{mm}^3) \approx 0.429 M_h + 1.571 M_v \quad \dots\dots (1)$$

M_h : 圧延面に垂直な断面における圧延方向の単位長さ当りの伸長粒数

M_v : 圧延面に垂直な断面における板厚方向の単位長さ当りの伸長粒数

この式を用いて、 Svg は、圧下率 R (%)、圧延前 γ 粒度番号 N_0 の関数として(2)式で与えられる。

$$Svg = 1.12 \times 2^{\frac{N_0+8}{2}} \{ 0.429 \times (1-R/100) + 1.571 / (1-R/100) \} \quad \dots\dots (2)$$

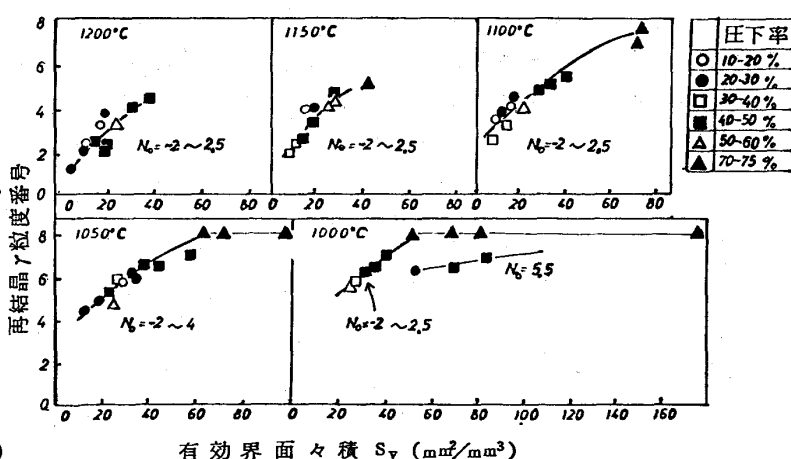
圧延で与えられる変形は、 γ 粒を伸長化するばかりでなく、粒内に変形帯を生成させることが、未再結晶 γ 域の場合においては、よく知られている。本実験の場合、圧延後急冷しても再結晶が完了するために、この事を光学観察によって実証できなかった。しかし、Sellarらの結果³⁾から、本実験のような高温圧延においても、変形帯が導入され、それが再結晶の核生成に寄与すると考えることは、妥当である。圧下率と変形帯密度の関係⁴⁾は、第4図に示すとおりであり、近似的に次式で表示される。

$$Svd (\text{mm}^2/\text{mm}^3) = 0 \quad (R < 30), \quad Svd (\text{mm}^2/\text{mm}^3) \approx 0.8R - 24 \quad (R \geq 30) \quad \dots\dots (3)$$

第4図は、1000℃以下で得られたデータであるが、変形帯密度は、圧延温度、圧延前 γ 粒度に無関係に圧下率のみに依存するという傾向が、本実験の対象である1000～1200℃の高温域でも成立するものとした。

以上より、再結晶の核生成位置として寄与する有効界面々積 Sv は(4)式で与えられる。なお、核生成頻度に対する寄与は、 Svg と Svd が同じであると仮定した。

$$\begin{aligned} Sv (\text{mm}^2/\text{mm}^3) &= Svg + Svd \\ &\approx 2^{\frac{N_0+8}{2}} \{ 0.48 \cdot (1-R/100) + 1.76 / (1-R/100) \} \quad (R < 30) \\ &\approx 2^{\frac{N_0+8}{2}} \{ 0.48 \cdot (1-R/100) + 1.76 / (1-R/100) + 0.8R - 24 \} \quad (R \geq 30) \end{aligned} \quad (4)$$



第5図 有効界面々積 Sv と再結晶 γ 粒度の関係

第5図に、X65級鋼について(4)式から求めた Sv と本実験で得られた再結晶 γ 粒度番号の関係を示す。高圧下(70～75%)と圧延前 γ が5.5番と細粒である場合を除外すれば、再結晶 γ 粒度は、圧下率、圧延前 γ 粒度が異っても、 Sv で良く整理でき、核生成頻度に支配されることがわかる。換言すれば、高温域における再結晶が、静的過程であることを強く裏付けるものである。なお、同一 Sv に対する再結晶 γ は、圧延温度が高い程、粗粒であることが明らかとなった。

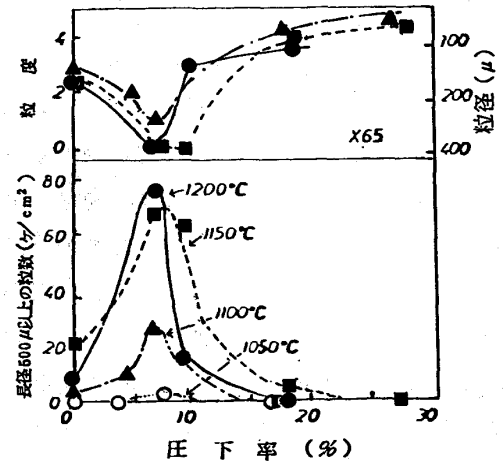
8. 粗大粒を含む混粒オーステナイトの生成とその再結晶

制御圧延過程の高温域で圧延を実施した場合、粗大粒を含む混粒組織が生成する場合がある。このような粗大粒を含む混粒組織の生成は、大別して、10%以下の軽圧下による場合⁵⁾と圧延後、特定の温度域に保持した時の粒成長による場合がある。第6図は、X65級鋼について得られた軽圧下時の粗大粒発生状況（長径500 μ 以上）を定量的に示したものである。軽圧下時の粗大粒発生頻度は、圧延温度依存性を示し、1100℃以上で混粒組織が生成し易く、特に、この傾向は、1150、1200℃で顕著である。一方、圧延温度1050℃では、粗大粒の発生頻度が極めて少なくなる。このような軽圧下時の粗大粒を含む混粒 γ 組織の生成は、X70級鋼についても認められた。ただし、この場合の粗大粒の発生頻度は、X65級鋼より少なく、1100℃以下の混粒組織の発生は認められなかった。

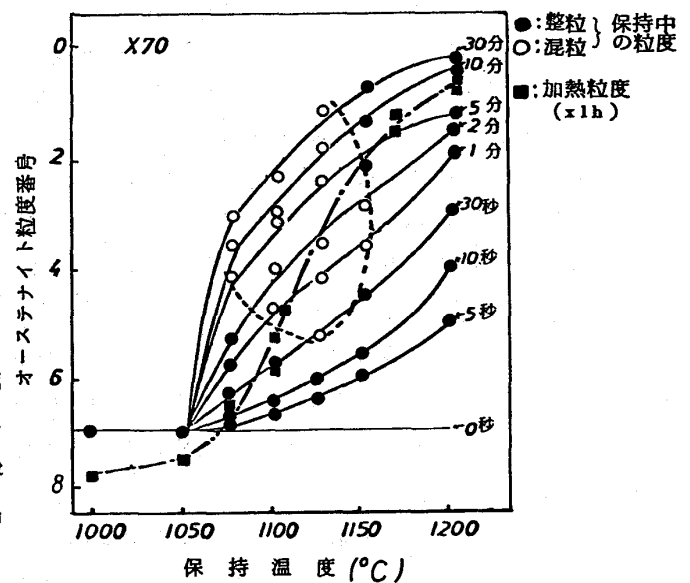
第7図は、熱間圧延によって得られた7番の粒度を有するX70級鋼を所定温度で一定時間保持した場合の粒成長による粒度変化を示す。図中の白丸は、粒成長による混粒 γ の発生を示している。これより、混粒組織は、保持温度と保持時間で定まる特定の領域で発生することがわかる。また、第7図中には、各温度における加熱 γ 粒度も示してあるが、保持時間零の粒径が加熱 γ 粒径より大である温度域では、保持中の粒成長は、認められない。一方、加熱 γ 粒径より小である場合、保持中に粒成長が起り、保持時間を長くすると、加熱 γ より粗大になる。

このような混粒 γ が生成した場合の熱間圧延による再結晶挙動は、第8図に示すとおりであり、おおまかには、混粒中の粗粒域および細粒域とも、圧下率を増大させるにしたがって再結晶細粒化する。しかしながら、混粒 γ は、比較的軽圧下で初期状態以上に粒度差が増大した顕著な混粒組織になり、高圧下を付加しても整粒化しにくいことが判明した。特に、混粒 γ 中の粗大粒に注目した場合、第9図に示すように、粗大粒は、これとほぼ同一粒径を有する整粗大粒よりも再結晶しがたい。

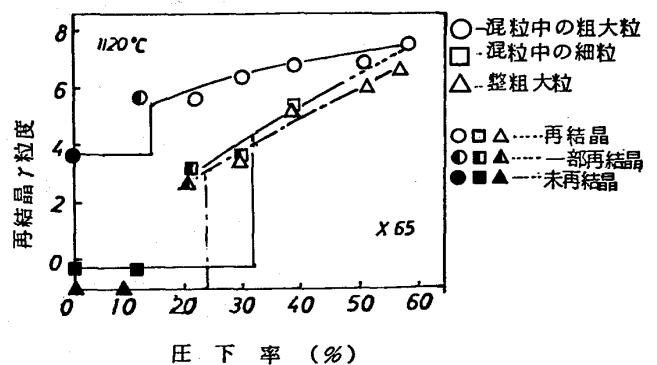
このように、いったん生成した混粒中の粗大粒を再結晶させるためには、整粗大粒より少なくとも1パス圧下率を10%以上増大させた圧延を行うことが必要である。しかしながら、このような圧延法は、現行の圧延機の能力上、多くの困難を伴うので、現状では、いったん生成した混粒中の粗大 γ 粒は、その後の圧延過程で



第6図 軽圧下時の粗大粒発生



第7図 圧延後保持中の γ 粒度変化



第8図 混粒 γ の再結晶挙動

再結晶細粒化されがたい。

4. 針状フェライト組織の靱性におよぼす影響とその生成条件

混粒 γ 組織が生成すると、混粒中の粗大 γ は、靱性劣下の大きな要因である針状フェライト組織に変態することが考えられる。そこで、未再結晶 γ 域での合計圧下率 R_u (%)と再結晶 γ 域での最終 γ 粒度 N_f を変えた圧延を行い、種々の分率の針状フェライト組織を得、組織と靱性の関係を調査した。なお、再結晶域の γ は、圧延実験を簡便化するために、整粒組織とした。第10図は、針状フェライト組織分率 V_w が40%以下のX65級鋼について、破面遷移温度 vTs を

フェライト粒度で整理したものであり、大まかには、フェライトが細粒化する程 vTs は低下するものの、 vTs のフェライト粒度に対するバラツキの範囲は、20~60℃ときわめて大きく、Petchの関係を満たさないことがわかる。そこで、同じ実験結果を V_w と vTs の関係で整理し直した。第11図(a)に示すように、フェライト粒度が異なっているにもかかわらず、 V_w と vTs の間には、良い相関関係が成立することがわかる。針状フェライト組織の混在による vTs の上昇は、フェライト粒度を8番に補正した

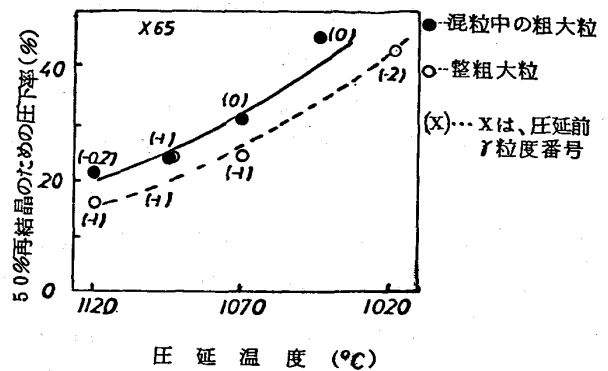
(b)図に示すとおりであり、 V_w が0~10%とわずかな増加に対して、約60℃と極めて大きな値になる。以上のように、針状フェライト組織が混在するフェライト・パーライト組織においては、針状フェライト組織が、制御圧延材の靱性を支配する最大の因子である。

次に、針状フェライト組織生成に及ぼす圧延条件の影響について述べる。第12図は、再結晶域の最終 γ 粒度 N_f をパラメータに、針状フェライト組織分率 V_w と未再結晶域での合計圧下率 R_u の関係を示したものであり、再結晶 γ の細粒化および R_u の増大によって、 V_w は、減少する。

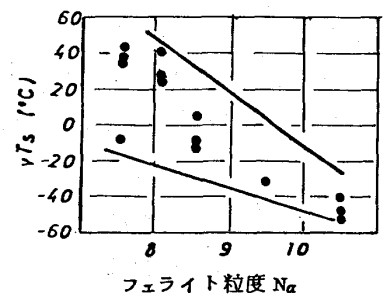
$N_f = 5, 6$ では、 $R_u \geq 50\%$ で針状フェライト組織は完全に消滅するが、 $N_f < 2$ の粗大 γ では、 R_u が70%以上でも数%の針状フェライトが混在する。このように、針状フェライト組織の混入防止には、再結晶 γ を細粒化することが有効である。したがって、一たん混粒組織が生成すると、先にも述べたとおり混粒中の粗大 γ 粒は細粒化されがたく、容易に針状フェライト組織に変態して、制御圧延材の靱性劣下を招くことになる。なお、針状フェライト組織によって靱性が大幅に劣化する一因として、この組織中の島状マルテンサイトが考えられる。

参考文献

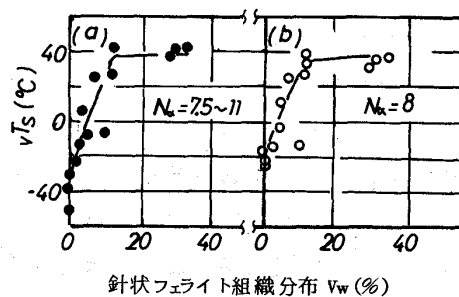
- 1) R.W. Cahn : "Recrystallization, Grain Growth and Texture" (1965), P. 99, [ASM]
- 2) E.E. Underwood : Quantitative Microscopy, McGraw-Hill, (1968), P. 77
- 3) Sellar et al. : Metal Science, 8(1974), P. 325
- 4) 梶, 勝亦, 町田, 木下 : 鉄と鋼, 60(1974), S295
- 5) 波戸村, 田中 : 鉄と鋼, 62(1976), S648



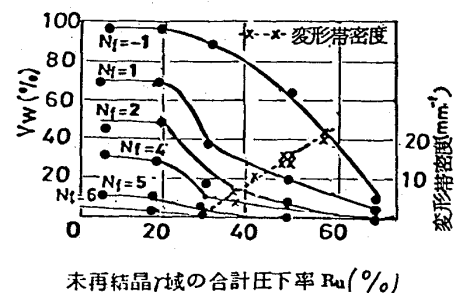
第9図 50%再結晶させるに必要な圧下率と圧延温度の関係



第10図 破面遷移温度とフェライト粒度の関係



第11図 破面遷移温度に及ぼす針状フェライト組織分率の影響



第12図 針状フェライト組織分率と未再結晶 γ 域の合計圧下率の関係