

討28

東京工業大学 総合理工 中村正久 ○ 堀江賢郎
大学院 野村信彰

1. 緒言

金属材料の高温変形挙動は力学的観測ならびに組織学的観測の両面から考察することが望ましい。非調質高張力鋼の生産工程で取り入れられているところの制御圧延は、機械的変形、変態、さらには変形中あるいは変形後の回復、再結晶などのレストレーション機構などの総合的制御である。このような熱間加工工程は前述のような力学的因子と冶金学的因子が複雑に競合しており、通常の熱間加工よりさらに複雑な変形挙動である。しかしながら現状ではこれらの熱間加工工程における主たる制御因子であるところの加工温度、仕上げ圧延温度、総圧下率などの最適条件の選定には単純変形による実験室的実験も有効であろう。

本研究は、普通C-Mn鋼とそれに少量のNb、Vをそれぞれ単独添加したもの、そしてその両者を同時添加したものの計4種類の鋼について熱間ねじり試験を行い、制御圧延に関する研究の一環として、熱間変形挙動ならびに、変形中の再結晶、つまり動的再結晶挙動に関して、力学的ならびに金属組織学的考察を行った。

2. 試験片および実験方法

表1 供試鋼の化学組成

鋼	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	So1.Al	N
							(wt%)		
C	0.16	0.28	1.22	0.008	0.008	---	---	0.032	0.0099
N	0.10	0.28	1.22	0.008	0.012	---	0.02	0.031	0.0082
V	0.11	0.31	1.26	0.007	0.011	0.07	---	0.034	0.0111
VN	0.12	0.30	1.27	0.008	0.013	0.07	0.02	0.031	0.0077

2-1. 試験片

供試鋼の化学組成を表1に示す。これら鋼-C、鋼-N、鋼-Vそして鋼-VNと名付ける。供試鋼は鑄塊を温度1000℃から1100℃まで10秒まで熱間鍛造したものを850℃でエント焼きました。これよりゲージ部長210mm、ゲージ部外径および内径が14φ、10φの中空円筒状のねじり試験片に切削加工した。図1にその形状を示す。

2-2. 実験方法

実験には一定ひずみ速度でかつ高変形速度での試験が容易に行え、大きなひずみ量を達成でき熱間加工試験として最適であるねじり試験を採用した。塑性ひずみの均一化ならびに正確な応力-ひずみ関係を得る目的で試験片は、前述のように中空円筒状とした。一回転ねじりに相当する真ひずみ量は2.18になる。試験機は低速ねじり試験機(0.05~24tPm)と高速衝撃ねじり試験機(~2500tPm)を用いた。ねじり変形におけるせん断応力(τ)とせん断ひずみ(γ)は、次の関係式を用いて計算した。

$$\tau = 2M / \pi (D_1^3 - D_2^3) \quad \gamma = \phi (D_1 + D_2) / 4L$$

ここでMはトルク、D₁およびD₂は試験片の外径および内径であり、Lは試験片のゲージ長さで、φはねじれ角である。せん断応力およびせん断ひずみに、ミーゼスの条件すなわち $\sigma = \sqrt{3}\tau$ 、 $\epsilon = \sqrt{3}\gamma$ を適用して引

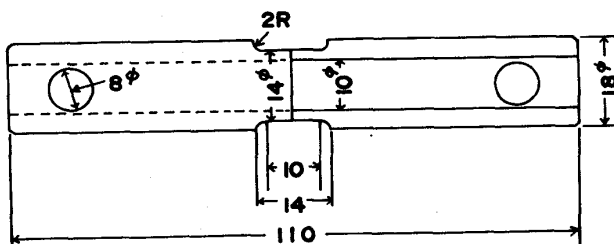


図1 試験片

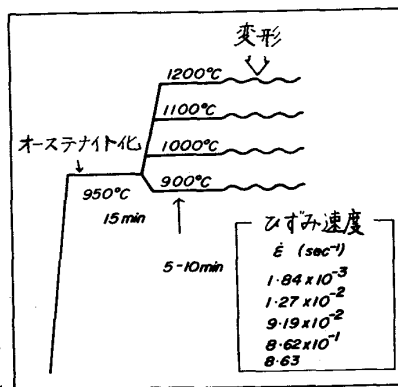


図2 変形条件

張の真応力および真ひずみに換算した。

変形前のオーステナイト粒径がその後の工程に重要な影響を及ぼすことが知られているので、微細かつ均一なオーステナイト粒径を得るため、 950°C で15 minのオーステナイト化処理を変形前に施した後、図2に模式的に示しているように 900°C から 1200°C の各変形温度に5~10 min保持後約 10^{-3} から約 10 sec^{-1} まで一桁ずつ異なる5種類のひずみ速度でねじり試験を行った。加熱は高周波加熱を用いて、冷却は高圧ヘリウムガスと水を併用した。

3. 実験結果および考察

3-1. 変形曲線の形状

熱間加工領域におけるねじり試験による応力-ひずみ曲線の形状は、通常の動的再結晶材料の場合、その特徴として初期加工硬化領域ののちのピーク応力の出現であり、さらにその後の何回かの応力振動を示すことある。これは加工硬化と動的レストレーション過程の釣り合った定常状態領域へと移行することである。図3、4に鋼-Cの応力-ひずみ曲線図を示す。行われた実験での最高ひずみ速度($\dot{\epsilon} = 8.63\text{ sec}^{-1}$)の応力-ひずみ曲線図(図3)において、いづれの温度においても初期硬化領域ののちに応力はピークを示し、 900°C の曲線を除いては定常状態応力域へと移行した。各温度でのピーク応力と 900°C を除いた定常状態応力のレベルは温度の上昇とともに低下した。ピーク応力に至るまでのひずみ量は温度の上昇とともに小さくなった。行われた実験での最低ひずみ速度($\dot{\epsilon} = 1.84 \times 10^{-3}\text{ sec}^{-1}$)の応力-ひずみ曲線(図4)において、各温度とも初期加工硬化領域ののち応力はピークを示し、その後さらに何回も振動を示した。初期のピーク応力に至るまでのひずみ量は温度の上昇とともに小さくなった。 900°C 、 $\dot{\epsilon} = 8.63\text{ sec}^{-1}$ でピーク応力示したのち、応力は低下し破断にいたったが、 $\dot{\epsilon} = 8.62 \times 10^{-1}\text{ sec}^{-1}$ 以下のひずみ速度ではピーク応力示したのち定常状態領域へと移行し $\dot{\epsilon} = 1.84 \times 10^{-3}\text{ sec}^{-1}$ では応力の振動が現われた。鋼-D、鋼-N、鋼-DNにおいて、応力-ひずみ曲線の形状は鋼-Cとほぼ同様の形状を示した。しかしピーク応力に至るまでのひずみ量は各鋼種とも鋼-Cよりも大きくなった。ピーク応力に至るまでのひずみはわずかに鋼-VNが一番大きく、N、D、Cの順に小さくなった。

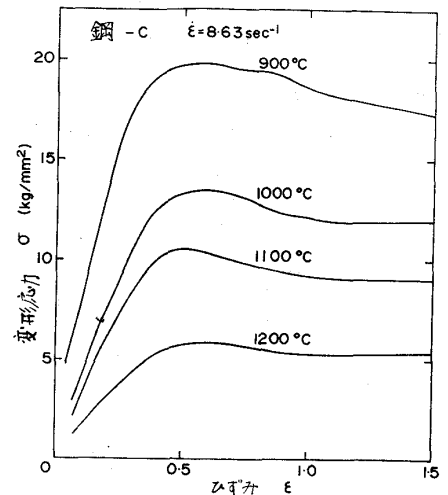


図3 変形応力-ひずみ曲線

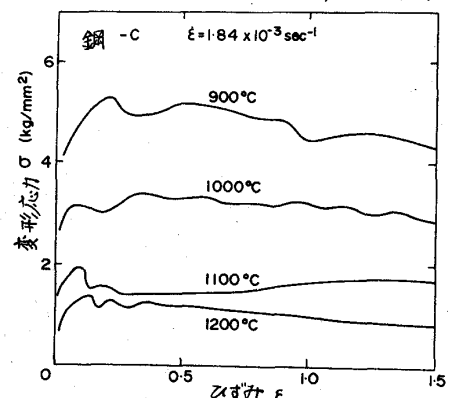


図4 変形応力-ひずみ曲線

3-2. 変形応力の温度依存性

変形応力と温度依存性を検討するため、鋼-Cの最大変形応力と試験温度の逆数の関係を各ひずみ速度ごとにプロットした結果を図5に示す。変形応力は各ひずみ速度とも温度にしたがって低下した。この試験温度範囲内では、一定ひずみ速度で最大変形応力はほぼ一本の直線として表わすことができた。これらの直線の傾きは高ひずみ側でわずかに大きくなっている。他の鋼種、鋼-V、鋼-N、鋼-DNについても最大変形応力と温度の逆数とは同様の関係にあった。各鋼種においてこのような直線関係を示すことは、変形機構がこの温度領域においては単純な熱活性化過程によっていることを示すものである。

3-3. 変形応力のひずみ速度依存性

最大変形応力とひずみ速度依存性について鋼-Cの関係を図6(a)、(b)に示す。最大変形応力

はひずみ速度の増加とともに上昇した。図6(a)において1200°Cが一本の直線として表わされ、それ以下の温度では折れた直線で表わされる関係となり、その屈曲点は試験温度の低下とともに低ひずみ速度側へと移行した。図6(b)の表示において高温側では直線関係が得られるが低温側で高ひずみ速度側に屈曲点が表示された。そして、これらの傾きは図6(a)では高応力側、(b)では低応力側で大きく変わった。それぞれの鋼種についての变形応力のひずみ速度依存性は、傾きに多少の差はあるがその形状はほぼ同様の結果が得られた。

3-4. 变形応力の温度およびひずみ速度の相互関係

以上の結果は、変形が熱活性化過程によって律速されており、次のようなアレニウス型の变形方程式が成立することと裏付けるものである。

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

ここで、 σ は応力、 R はガス定数であり、 Q は変形に対する活性化エネルギーである。

(1)式を変形して

$$\dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = A\sigma^n \quad (2)$$

(2)式の左辺は温度で補償されたひずみ速度を表わしており、温度補償ひずみ速度因子(Zener-Hollomon因子(Z))と呼ばれている。Z値は熱間加工試験の間に一定に保

たれるものであり、Zと変形応力との間のこのような相互関係の存在を図7に鋼-VNについて示す。図5、図6(a)、(b)より応力関係式の各定数を求めた結果を表2に示す。

各鋼種について求めた Q の値を用いてZを算出し、Zと最大変形応力、 σ_m と定常状態応力、 σ_s との関係を鋼-VN

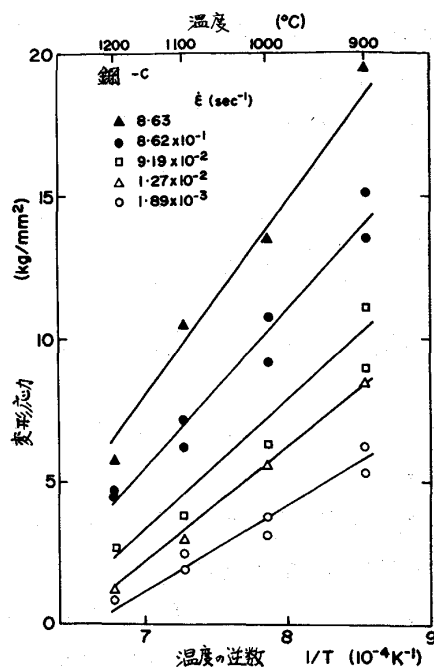


図5 変形応力と温度の逆数との関係

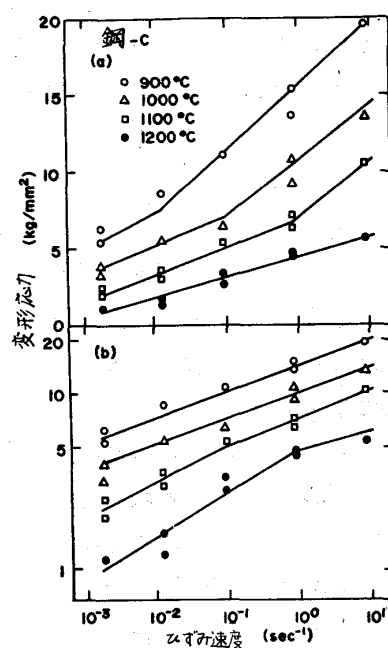


図6 変形応力とひずみ速度との関係

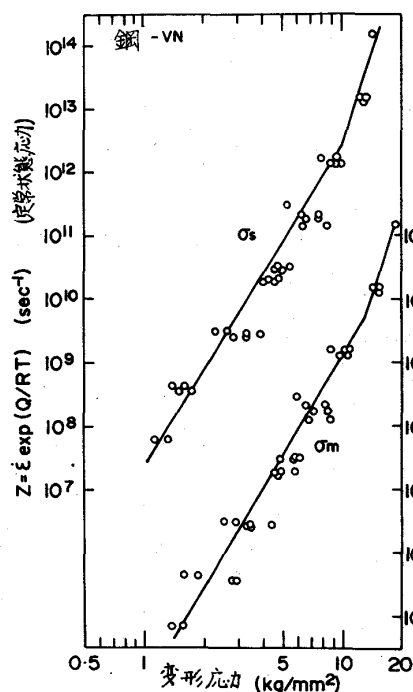


図7 Zと変形応力の関係

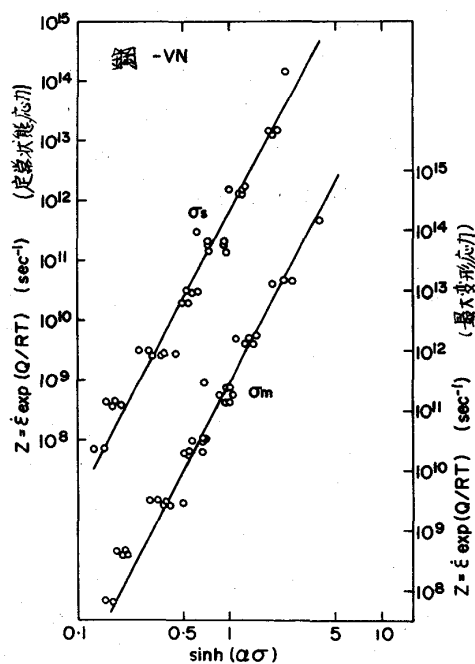


図8 Zとsinh(ασ)の関係

表2 実験で求めた応力関係式の定数

鋼	C	V	N	VN
定数				
n	4.46	4.46	4.16	5.33
α	0.131	0.161	0.180	0.110
Q (Kcal/mole)	74.8	71.9	75.2	71.0

はついで図7に示す。 σ_s , σ_m とも $Z = 10^{12}$ 程度で折れた直線となり、 $Z = 10^{12}$ 以上では大きな応力依存性を示した。またその臨界応力は最大変形応力値で 10 kg/mm^2 であった。

低応力域を表わすべき法則型応力関係式と、高応力域を表わす指数法則関係式を合成した次式はこれらの関係を一本の直線として表わされる。

$$f(\sigma) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (3)$$

Z 因子と $\sinh(\alpha\sigma)$ の関係を鋼-VNについて図8に示す。

3-5. 変形組織と延性

写真1は鋼VNについてひずみ速度 $1.84 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ でのピーク応力を示した後のひずみで変形を中断したもの急冷組織を 1200°C から 900°C までの各試験温度ごとに示したものである。これらの組織写真に現われた旧オーステナイト粒、すなわち動的再結晶粒は混粒であった。そして変形温度の低下とともに結晶粒は細粒となった。

一般に、動的再結晶粒 d は定常状態変形応力 σ_s に反比例する、すなわち $\sigma_s \propto 1/d$ の関係があることが知られている。高応力側で指数関数型応力関係式が応力と Z との関係を表わすことを考慮して、平均オーステナイト粒径と Z の対数とをプロットした結果を図9に示す。 $\log Z$ の値が10で折れた直線の関係が得られた。他の鋼種についてもほぼ同様の折れた直線の関係が得られた。

図10に今回の実験の範囲での延性について示した。 900°C , $\dot{\epsilon} = 8.63 \text{ sec}^{-1}$ で延性が大きかったが他の条件ではほぼ同程度の破断ひずみ量を示した。

4. 結論

- (1). 各鋼種はその応力-ひずみ曲線の形状から、いずれも典型的な動的再結晶型であった。
- (2). 各鋼種の高温度形態機構は、この試験条件では単一の熱活性化過程によって支配されるものと推定され、この実験から求めた活性化エネルギーは γ -Feのクリープの結果から求められた値と同様に γ -Fe中のFeの自己拡散の活性化エネルギーに一致した。
- (3). 定常状態領域でのオーステナイト粒径と $\log Z$ の関係は折れた一本の直線で表わされ低温、高ひずみ速度側ほど細粒化がある。

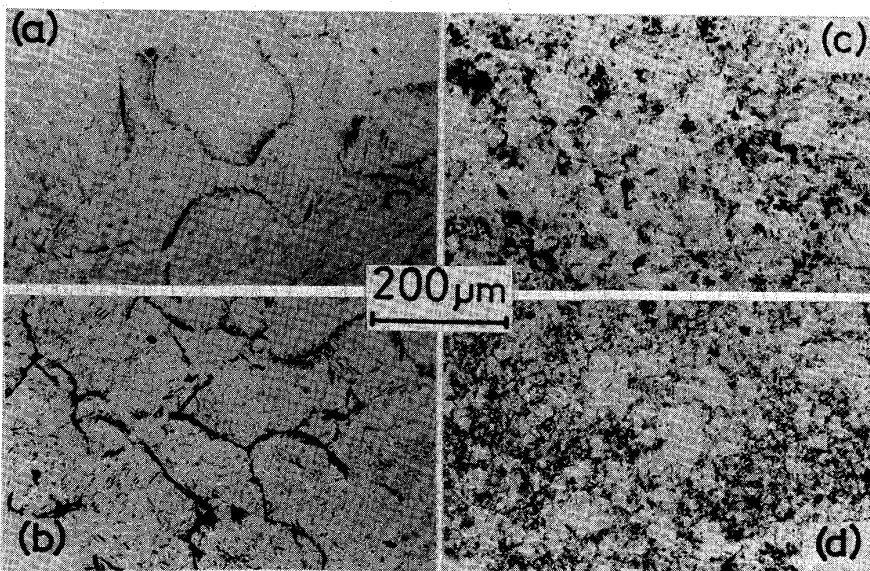


写真1 定常状態変形領域からの急冷組織 $\dot{\epsilon} = 1.84 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$

- (a) 1200°C ($\log Z = 7.81$) (b) 1100°C ($\log Z = 8.57$)
 (c) 1000°C ($\log Z = 9.46$) (d) 900°C ($\log Z = 10.5$)

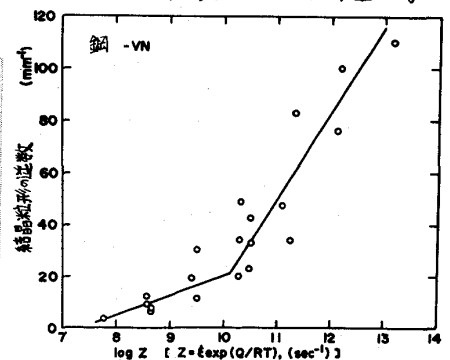


図9 結晶粒径 d と Z の関係(鋼VN)

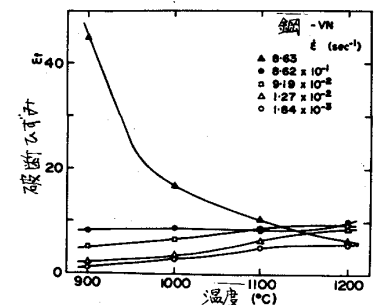


図10 延性の温度による変化(鋼VN)