高速引張加工されたステンレス鋼の機械的性質*

山 田 巖**小 寺 沢 啓 司**杉 田 忠 彰***

Mechanical Properties of Rapidly Stretched Stainless Steels

by

Iwao YAMADA, Keiji KOTERAZAWA and Tadaaki SUGITA

(Himeji Institute of Technology, Himeji)

This investigation has been conducted to make clear the effect of strain rates on the internal structure and the mechanical properties of rapidly stretched stainless steels. The 18%Cr-8%Ni stainless steel and 17%Cr-4%Ni PH stainless steel specimens have been used in this study.

The main results obtained are as follows :

(1) The yield strength and the tensile strength of these stainless steels in rapid tensile testing are larger than those in static tensile testing. The strain rate gives a remarkable effect on the resistance in deformation of these stainless steels.

(2) The yield strength, the tensile strength and the hardness of rapidly pre-stretched 18%Cr-8%Ni stainless steel are larger than those of statically pre-stretched sort. It was recognized that this fact is mainly due more to the promoting martensite transformation by rapid pre-stretching than by static one.

(3) The yield strength, the tensile strength and the hardness of statically pre-stretched 17%Cr-4%Ni PH stainless steel are larger than those of rapidly pre-stretched sort. It seems that this fact is mainly due more to the promoting aging by static pre-stretching than by rapid one.

(4) From the above mentioned results, it is recognized that the mechanical properties of pre-stretched stainless steels are remarkably affected by the internal structure caused by the strain rate in pre-stretching.

(Received June 14, 1965)

1 緒 言

高速変形に関する研究はすでにかなり多く行なわれているが、そのほとんどは衝撃荷重下の応力-ひずみ線図の測定に関するもので、次の諸点に関する研究はきわめて少ないように思われる。

(a) 高速変形の機構が静的変形の機構と異なっているかどうか。

(b) 高速変形を与えた場合には静的変形の場合と異なった内部構造の変化が起こるかどうか。

(c) (a)(b)のような変化が起こるとすれば、それらが高速加工材の機械的性質にどのような影響を与えるか。

上述の諸点は相互に関連性のある問題であるが、強度測定のみならず、これらの点もあわせて追求することによって高速変形の全¹⁾ぼうがより明らかにされるものと考えられ、作井博士もその必要性を強調している。

筆者らはこのような観点から、すでに一連の研究を実施しており、第1報²⁾として炭素鋼の場合を報告した。すなわち、炭素鋼の場合にも、前加工速度の大小によって内部構造の変化に相違を生じ、ひずみ速度のみならずこのような内部構造の変化もまた変形抵抗に寄与していることを明らかにした。

衝撃荷重下のステンレス鋼の挙動に関する研究には、Clark³⁾とWood⁴⁾、Clark⁵⁾、塚田⁶⁾ら、Baron⁷⁾、作井⁸⁾ら、河田⁹⁾ら、Henriksen¹⁰⁾ら、および福井¹¹⁾らのものなどがあるが、やはり強度あるいは変形能(伸び)の測定のみ重点がおかれている。筆者らは前述の立場に立脚して、炭素鋼について行なったと同様の実験をステンレス鋼について実施し、二、三の知見を得たのでここに報告する。

2 試料および実験方法

実験に用いた試料は18-8ステンレス鋼 (AISI 304) および17-4 PH鋼 (AISI 630) で、Table I はそれらの化学成分である。試験片はFig. 1 のようで、いずれも旋削成形後溶体化処理を施した。Table II は溶体化処理材の機械的性質を示す。なお実験装置の詳細については第1報²⁾を参照されたい。実験の順序は、

* 本報を「高速引張加工材の機械的性質(第2報)」(Mechanical Properties of Rapidly Stretched Materials II) とする

原稿受理 昭和40年6月14日

** 正 会 員 姫路工業大学 姫路市伊佐居

*** " " "

Table I. Chemical compositions of specimens (%).

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Nb+Ta
18-8 stainless steel (AISI 304)	0.07	0.43	1.19	0.023	0.014	9.09	18.43	—	—
17-4PH stainless steel (AISI 630)	0.04	0.62	0.28	0.026	0.017	4.21	16.92	4.05	0.27

Table II. Mechanical properties.

Materials	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (D.P.N.)
18-8 stainless steel	25.0	62.0	64.0	180
17-4 PH stainless steel	70.0	112.5	9.7	315

Fig. 1. Specimen (mm).

- (a) 溶体化処理材の静的引張試験 $S^{\ast 1}$ および高速引張試験 $D^{\ast 1}$
- (b) 静的引張前加工材 $S^{\ast 1}$ の静的引張試験 $S^{\ast 1}$ および高速引張試験 $D^{\ast 1}$
- (c) 高速引張前加工材 $D^{\ast 1}$ の静的引張試験 $S^{\ast 1}$ および高速引張試験 $D^{\ast 1}$

これらの各場合について求めた荷重-伸び線図から、耐力、引張強度、伸びなどを求め、前加工材について

Fig. 2. Load-elongation diagram (Stress-strain diagram) for 18%Cr-8%Ni-stainless steel (AISI 304).

^{\ast 1} 実験結果の整理に上記のような符号を用いることとする。したがって、たとえば $S^{\ast 1}$ - $D^{\ast 1}$ は静的引張前加工材を引き続き高速引張試験した場合を、 $D^{\ast 1}$ - $D^{\ast 1}$ は高速引張前加工材を引き続き高速引張試験した場合を示す。
^{\ast 2} 詳細は文献2を参照されたい。

は硬度の測定およびすべり帯の発生の様相を顕微鏡で調べた。なお静的引張試験にはインストロン型の引張試験機を用いた。Fig. 2は18-8ステンレス鋼の溶体化処理材について得られた荷重-伸び線図の一例であるが、そのほか荷重-時間線図、伸び-時間線図を求め、これらの線図とあらかじめ求めた荷重および伸びの検定曲線を用いて、ひずみ速度、耐力、引張強度などを求めることができる。

3 実験結果

3・1 機械的性質のひずみ速度依存性

Fig. 3 (a)は18-8ステンレス鋼を低速 (5 mm/min, $\dot{\epsilon}=1.7 \times 10^{-3}$ 1/sec) および高速 (3.8 m/sec, $\dot{\epsilon}=76$ 1/sec) で引張試験した場合の応力-ひずみ線図を、Fig.

(a) Stress-strain diagrams for 18%Cr-8%Ni stainless steel.
(b) Stress-strain diagrams for 17%Cr-4%Ni PH stainless steel.
Fig. 3. Stress-strain diagrams for stainless steels in various strain rates.

3 (b)は 17-4 PH 鋼を低速 ($\dot{\epsilon}=1.7 \times 10^{-3}$ 1/sec) および高速 (1.3 m/sec, $\dot{\epsilon}=26$ 1/sec) で引張試験した場合の応力-ひずみ線図を示す。両材料ともひずみ速度が大きいくほど耐力、引張強度が大きくなるが、全伸びについては、18-8ステンレス鋼ではひずみ速度が大きいくほど小さくなるに反し、17-4 PH 鋼では逆に大きくなる (よく伸びる) ことがわかる。

Fig. 3 (a)のデータに加えて、さらにインストロン型引張試験機を用いて引張速度 100 mm/min ($\dot{\epsilon}=3.3 \times 10^{-2} \text{ 1/sec}$) の引張試験を実施し、ひずみ速度について耐力、引張強度、全伸びを整理すると、Fig. 4のよ

Fig. 4. Variation of mechanical properties of 18% Cr-8%Ni stainless steel caused by strain rates.

うになり、前述の機械的性質にひずみ速度依存性のあることが一層明りようになる。

3・2 高速引張加工材の機械的性質

静的あるいは高速引張加工した試験片を、前加工してから約1日経過後ふたたび静的あるいは高速引張試験を実施した。Fig. 5 (a)は静的引張前加工した18-8ステンレス鋼⑤を引き続き静的引張試験 S した場合と高速引張試験 D した場合の応力-ひずみ線図を、Fig. 5 (b)は同じく高速引張前加工した18-8ステンレス鋼②

(a) Static and rapid tension test for statically stretched specimen ($\epsilon=20\%$).
(b) Static and rapid tension test for rapidly stretched specimen ($\epsilon=20\%$).

Fig. 5. Stress-strain diagram for 18%Cr-8%Ni stainless steel.

を引き続き静的引張試験 S した場合と高速引張試験 D した場合の応力-ひずみ線図である。(ただし、前加工度はいずれも20%である)。

Fig. 5から⑤と S 、②と D とは線図がほぼ連続しているが、⑤と D 、②と S は著しく不連続であること、前加工速度のいかにかわらず、引き続き引張試験速度の早いほうが σ - ϵ 線図のレベルが高い

ことがわかる。Fig. 6は17-4 PH鋼に対する同様の実験結果である。(ただし、前加工度はいずれも2.5%の

(a) Static and rapid tension test for statically stretched specimen ($\epsilon=2.5\%$).
(b) Static and rapid tension test for rapidly stretched specimen ($\epsilon=2.5\%$).

Fig. 6. Stress-strain diagram for 17%Cr-4%Ni PH stainless steel.

場合である)。Fig. 5の場合と異なり、Fig. 6の場合にはいずれも不連続な線図となっているが、引き続き引張試験速度の早いほうが σ - ϵ 線図で高いレベルを占め、前加工材でもひずみ速度依存性を有することは、炭素鋼の場合および18-8ステンレス鋼の場合とまったく同じ傾向にある。Fig. 5、および6のような一連の実験結果から、前加工に伴う耐力、引張強度、伸びの変化を示すとFig. 7、8、9のようになる。

Fig. 7 (a)は18-8ステンレス鋼について、Fig. 7 (b)は17-4 PH鋼について、前加工度と耐力の関係を示したものである。Fig. 7 (a)から18-8ステンレス鋼の耐力は前加工速度のいかにかわからず、前加工に引き続いて行なう引張試験速度が大きい場合のほうが高いレベルを占めていることがわかる。また引き続き試験速度が同一のものに注目すると、前加工度が同一であっても静的前加工材⑤よりも高速前加工材②のほうがより強化されていることが明らかである。

次にFig. 7 (b)の17-4 PH鋼の場合の耐力は、18-8ステンレス鋼の場合と異なり、わずかの前加工度で著しく上昇している。⑤- S および ②- S 曲線よりも、⑤- D 、②- D 曲線のレベルが高いことはFig. 7 (a)の場合と同様であるが、前加工に引き続いて行なう引張試験速度が同一の場合でも、②- S 曲線より ⑤- S 曲線のほうが、②- D 曲線より ⑤- D 曲線のほうがいずれも高いレベルを占めている。したがって、同一加工度でも高速引張前加工材②よりも静的引張前加工材⑤のほうが強化されており、このことは18-8ステンレス鋼の場合とまったく逆の関係にあることはきわめて興味のあることである。

以上の実験結果から前加工の際のひずみ速度の大小

(a) Yield strength for 18%Cr-8%Ni stainless steel.
(b) Yield strength for 17%Cr-4%Ni PH stainless steel.

Fig. 7. Variation of yield strength with pre-plastic elongation caused by static and rapid tension.

(a) Tensile strength for 18%Cr-8%Ni stainless steel.
(b) Tensile strength for 17%Cr-4%Ni PH stainless steel.

Fig. 8. Variation of tensile strength with pre-plastic elongation caused by static and rapid tension.

によって、内部構造になんらかの相違点を生じた結果、前加工に引き続く引張試験の際、耐力に上述のような相違を与えたものと推定される。

Fig. 8 (a)は18-8ステンレス鋼, Fig. 8 (b)は17-4 PH鋼の、高速あるいは静的引張前加工による引張強度の変化を示したもので、前述の耐力の場合と同様の傾向を示している。ただ Fig. 8 (b)の場合の ⑤-D, ⑤-S 曲線、すなわち静的に前加工を与えた場合のみは直線関係にないことがわかる。

Fig. 9 (a)は18-8ステンレス鋼の前加工に伴う伸びの変化を、Fig. 9 (b)は同様17-4 PH鋼の場合を示す。18-8ステンレス鋼では、前加工の際のひずみ速度に無関係で、①-Dと⑤-S曲線および①-Dと⑤-D曲線はそれぞれほぼ1本の曲線に一致し、前加工に引き続いて行なう引張試験速度の早いほうが伸びが少なくなることがわかる。17-4 PH鋼では①-D, ①-S曲線は前加工度が約3%以上になるとほぼ一致し、⑤-D, ⑤-S曲線は約2%以上になると一致しているが、上述の前加工度以下ではそれぞれ別個の曲線で示される。

Fig. 10は前加工に伴う硬度の変化を求めた結果で、Fig. 10(a)は18-8ステンレス鋼の場合、Fig. 10(b)は17-4 PH鋼の場合である。これから18-8ステンレス鋼では同一前加工でも、高速引張前加工材 ① のほうがかたく、静的引張前加工材 ⑤ のほうがやわらかいが、17-4 PH鋼ではこれとまったく逆の関係にあり、⑤ よりも ① のほうがやわらかい。

(a) Elongation for 18%Cr-8%Ni stainless steel.
(b) Elongation for 17%Cr-4%Ni PH stainless steel.

Fig. 9. Variation of total elongation with pre-plastic elongation caused by static and rapid tension.

(a) Increase in hardness for 18%Cr-8%Ni stainless steel.

(b) Increase in hardness for 17%Cr-4%Ni PH stainless steel.

Fig. 10. Variation of hardness with pre-plastic elongation caused by static and rapid tension.

しかも、このような前加工の際のひずみ速度の大小による18-8ステンレス鋼および17-4 PH鋼の硬度の相違は、耐力、引張強度、伸びの各曲線に関して両材に認められた相違と定性的によく対応していることがわかる。

4 考 察

上述の実験から認められるおもな点を挙ると次のようである。

(a) 18-8ステンレス鋼、17-4 PH鋼の溶体化処理材の耐力、引張強度などにひずみ速度依存性が認められた。

(b) 引張前加工材の耐力、引張強度については、前加工に引き続いて行なう引張試験速度が同一の場合、18-8ステンレス鋼では静的引張前加工材に比べて高速引張前加工材のほうが高い値を示すが、17-4 PHでは逆に静的引張前加工材のほうが高い値を示す。

(c) 引張前加工材の硬度については、18-8ステンレス鋼では静的引張前加工材に比べて、高速引張前加工材のほうが高い値を示すが、17-4 PH鋼では逆に高速引張前加工材のほうが低い値を示す。

(a)については炭素鋼の場合にも認められたことであり、ステンレス鋼についてもすでに多くの研究者によって報告されている。

(b)(c)について共通している点は、前加工材の機械的性質が18-8ステンレス鋼と17-4 PH鋼とでは互いに相反した関係にあることで、筆者らはもっぱらこの点に興味をひかれたので、この点について考察した。

4・1 18-8ステンレス鋼の場合

まず、高速引張前加工材と静的引張前加工材のすべり帯の発生状態を比較するために顕微鏡観察を行なったが、高速引張前加工材のほうがすべり帯がやや細かい程度で、炭素鋼の場合ほど明確な相違は認められなかった。

次に(c)で述べたように、18-8ステンレス鋼では、同一加工度でも前加工速度が早い場合のほうが遅い場合よりも硬度が高く、このことは(b)で述べた特性と相関関係にある。18-8ステンレス鋼では冷間加工によって準安定な γ から α へのいわゆるマルテンサイト変態を生ずることから、前加工速度によってマルテンサイト変態促進の程度に相違を生じ、その結果、同一前加工度でも前加工速度によって、硬度その他の機械的性質に差を生ずるのではないかと推定されるので、次の実験を行なった。

すなわち前加工度7.4%、34%および約55%（破断試験片の局部収縮を起こしていない部分）の3種について、X線ディフラクトメータによる川崎、篠田¹²⁾の方法で、高速引張前加工材と静的引張前加工材とのマルテンサイト量の定量を行なった。その結果を示すとFig. 11のとおりで、この図から高速引張前加工材 ④ のほ

Fig. 11. The transformed martensite wt % for statically and rapidly stretched 18%Cr-8%Ni stainless steel.

うがマルテンサイト変態がより促進されており、しかも、この傾向は前加工度の増加とともに著しくなっている。したがって、静的引張前加工材に比較して、高速引張前加工材のほうが耐力、引張強度、硬度などの値が高いのは、主として静的引張前加工の場合より高速引張前加工によってマルテンサイト変態がより促進されたことによると考えてよからう。なお、18-8ステンレス鋼を低温で加工すればマルテンサイト変態が促進されることはよく知られているが、高速変形によってもマルテンサイト変態が促進されていることから、高速変形が低温での加工に類似しているとする一つの証左といえよう。

4・2 17-4 PH鋼の場合

顕微鏡観察を行なって、高速引張前加工材と静的引張前加工材のすべり帯の発生状態を比較したが、両者

- (a) Stress-strain diagram.
l-curve : Statically pre-strained ($\epsilon=2.5\%$) and immediately stretched.
m-curve : Statically pre-strained ($\epsilon=2.5\%$) and stretched after aging for one day at room temperature
- (b) Stress-strain diagram.
Tensile load required to pre-strain ($\epsilon=2.5\%$) was kept for one minute and stretched again.
- (c) Stress-strain diagram.
Dotted line : rapidly pre-strained ($\epsilon=1.2\%$) and statically stretched after aging treatment (100°C , 60min).
Solid line : statically pre-strained ($\epsilon=1.2\%$) and stretched again after aging treatment (100°C , 60min).

Fig. 12. Variation of stress-strain diagram for 17%Cr-4%Ni PH stainless steel with testing and aging condition.

の間にほとんど相違が認められなかった。Fig. 7, 8, 10の各 (a) (b) 図を比較して明らかなように、18-8ステンレス鋼と17-4 PH鋼とでは耐力、引張強度、硬度に及ぼす前加工速度の影響がまったく逆の関係にある。すなわち18-8ステンレス鋼では、同一前加工度でも高速引張前加工材のほうが静的引張前加工材に比べてより強化されているにもかかわらず、17-4 PH鋼では逆に静的引張前加工材のほうが強化されている。

このような強化の起こる原因として、前加工速度の相違によって時効進行程度に差を生ずることに原因するのではないかと考えられるので、その点を検討してみた。Fig. 12 (a) は2本の試験片のうち、1本は静的前加工後除荷してからただちにふたたび引張試験した場合 (l 曲線) と、他の1本は静的前加工して除荷後常温に1日放置してからふたたび引張試験した場合 (m 曲線) とを比較したものである。1日経過してから引張試験した場合のほうが耐力の上昇が大きく、常温で時効が進行していることがわかる。Fig. 12 (b) は前引張加工応力直下の状態に1分間保持した後ただちに引張試験した結果であるが、すでに耐力の上昇が認められることから、応力の作用下では時効が進行しやすいことを示している。次にFig. 12 (c) は2本の試験片のうち、1本は1.2%静的引張前加工を与えてから、 100°C 、60分の時効処理を施し、ふたたび静的引張試験した場合 (実線 ⑤-S) と、同じく1.2%高速引張前加工材に同じ時効処理を施してからふたたび静的引張試験した場合 (点線 ④-S) とを比較したもので、同一時効条件に対して静的引張前加工材のほうが著しく耐力が上昇しており、高速引張前加工材より時効が促進されていることがわかる。しかも Fig. 12 (b) の結果

から、応力の作用時間が長いほど時効が進行しやすいことが推定される。したがって、高速引張前加工材よりも静的引張前加工材のほうが時効がより促進される結果、後者の強度や硬度が前者のそれより高い値を示すものと解釈してよさそう。

以上のことから、前加工速度によるすべり帯の発生の様相や、前加工の際に生ずる変態、時効などに及ぼす前加工速度の影響を詳細に検討した上でないと、単に高速前加工材のほうがかたい (強い) とか、やわらかい (弱い) とかを簡単に断定できないことが明らかとなった。

5 結 言

前加工速度の大小によって、内部構造に相違が起こるかどうかが、それが起こるとすれば高速引張加工材の機械的性質にいかなる影響を与えるかを18-8ステンレス鋼および17-4 PH鋼の場合について検討した。得られた結果を総括すると次のようである。

(1) 18-8ステンレス鋼、17-4 PH鋼とも溶体化処理材の耐力、引張強度は静的引張試験の場合に比較して、高速引張試験の場合のほうが高い値を示し、ひずみ速度依存性が認められた。

(2) 18-8ステンレス鋼の場合、静的引張前加工材に比較して高速引張前加工材のほうが耐力、引張強度、硬度が高い値を示した。これは、主として静的引張前加工の場合より、高速引張前加工によってマルテンサイト変態がより促進されるためであることが明らかにされた。

(3) 17-4 PH鋼の場合、高速引張前加工材に比較して静的引張前加工材のほうが耐力、引張強度、硬度が高い値を示した。これは主として静的引張前加工材の

ほうが引張加工応力の作用時間が長く、高速引張前加工材よりも著しく時効が促進されるためであることがほぼ明らかにされた。

(4) 以上のことから、前加工速度の大小によって、ステンレス鋼の内部構造には著しい相違を生じ、それが前加工材の機械的性質に大きな影響を与えていることがわかる。

本研究を遂行するにあたりご助言を賜った大阪大学工学部教授篠田軍治博士および火薬を提供していただいた日本化薬㈱沢田継男博士のご好意に深謝する。

(昭和40年5月19日 日本材料学会第14期総会講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 作井誠太, 森勉, 日本金属学会会報, **3**, 303, 358, 405 (1964).
- 2) 山田巖, 杉田忠彰, 小寺沢啓司, 材料, **14**, 192 (1965).
- 3) Clark, D.S., and D.S. Wood, Proc. ASTM, **49**, 717 (1949).
- 4) Clark, D.S., Trans. ASM, **46**, 34 (1954).
- 5) 塚田晴一, 井上稔, 桜井武尚, 塑性と加工, **2**, 123 (1961).
- 6) Baron, H.G., Sheet Met. Ind., **39**, 257 (1962).
- 7) 作井誠太, 中村正久, 布村成具, 鉄と鋼, **48**, 28 (1962).
- 8) 河田幸三, 福井伸二, 清野次郎, 応用物理, **32**, 742 (1963).
- 9) Henriksen, E.K., I Lieberman, J.F. Wilkin and W.B. McPherson, ASTM STP, No. 336, 104 (1963).
- 10) 福井伸二, 河田幸三, 清野次郎, 機械学会誌, **67**, 150 (1964).
- 11) たとえば Cina, B., J. Iron and Steel Inst., 179, 406 (1954).
- 12) 川崎正, 篠田軍治, 金属学会誌, **22**, 489 (1958).
- 13) 応用金属学大系6, ステンレス鋼・耐熱鋼, p.64 (1963) 誠文堂新光社