

© 1984 ISIJ

鉄鋼材料のダイレス加工と加工熱処理



関 口 秀 夫*

Dieless Forming and Thermomechanical Treatment of Steels

Hideo SEKIGUCHI

1. はじめに

塑性加工の目的は、素材に変形を与えて所定の形状の製品を得ることである。ところが、素材が強すぎて加工困難となる場合や延性不足で加工中に破壊をおこす場合もある。また、素材と工具の界面に生じる摩擦によって加工不能となる場合もある。加工に際して素材の強度(変形抵抗)を小さくし、しかも延性を大きくするためには加工温度を高くしてやればよいが、この場合(熱間加工)も摩擦の問題は残る。したがって、工具を用いて加工する限り、問題なく加工しようと思えば、一回の加工度を小さくするか局部加工を繰り返す必要がある。

これらの問題をうまく解決する方法の一つとして、最近開発されたダイレスフォーミング法がある。この加工法は局部熱間加工であり、工具(ダイ)を用いないから無摩擦加工でもある。実用化に際しては未解決な問題も多いが、加熱と冷却を制御することによって、従来の加工法では加工困難ないわゆる難加工性材料も精度よく加工することができる。

ところで、塑性加工のいま一つの目的は、優れた性質の製品を得ることである。鉄鋼材料では、今までは主として合金元素の調整と熱処理によって、要求される製品強度を満たしてきた。これに対し、塑性加工と適切な熱処理の組み合わせを行い、しかも両者を同時に行うことによって材料を強靱化しようとする方法が加工熱処理である。たとえば、熱間圧延中の圧下量と冷却条件をプログラム制御し、結晶粒を微細化して高強度高靱性材料を製造する方法として制御圧延法がある。また、オースフォームド鋼は強度が高いことと靱性が優れていることで有名である。しかし、素形材加工[†]の分野では一般に高い生産速度を必要とすることもあつて、生産工程における複雑な熱的制御は困難であり、加工熱処理の適用例は比較的少ない。加工熱処理を素形材加工に適用して高品質の製品の加工を行うことができれば、最近求められて

† ここでいう素形材とは、「完成部品または製品に直結した仕上げ加工、仕上げ処理、組立、調整作業に提供する材料」であり、または「鑄造法や塑性加工のように金属素材を造形すると同時に、素材に金属組織学的な変化を付与するような加工法によって造られた材料」である²¹⁾。

いる製品の付加価値向上に寄与することができる。

ここでは上に述べたような観点から、高温変形と冷却の組み合わせ加工の例としてダイレス引き抜き法を紹介し、それに適用可能な加工熱処理法についての検討を行う。素材としては比較的安価な炭素鋼を対象として話を進めるが、難加工性材料の加工や高強度高靱性材料の製造についても将来の課題として含めている。また、塑性加工の専門家でない読者にも興味を持っていただくために、加工中の温度分布の解析や詳しい金属学的考察については省略する。

2. ダイレス引き抜きとは

ダイレスフォーミングの手法としては、引き抜き、バルジ¹⁾、曲げ²⁾³⁾などが考えられる。ここでは引き抜き加工のみを対象とする。

ダイレス引き抜きのアイディアは比較的早く、1949年にソ連人から米国特許⁴⁾が出されている。しかし、一般には R. H. JOHNSON⁵⁾ や V. WEISS & R. A. KOTT⁶⁾ らの超塑性についての考察に源を発していると思われる。最近では、英国の J. M. ALEXANDER ら⁷⁾⁸⁾ やモスクワ大学の Я. М. Охрименко ら⁹⁾ もチタン合金などを用いて実験を行い、この方法の基礎的研究を進めている。我々は工具が不要な加工法として温度を制御したダイレス引き抜き法を考え、超塑性を示さない材料を用いて基礎的研究を行ってきた^{10)~14)}。

ダイレス引き抜きは、通常引き抜き工程で用いられるダイスの代わりに素材の一部を急加熱しながら引張ることによって、材料径を一様に絞ろうとする加工法である。図1(a)に示すように、素材(丸棒、角棒、管、線など)の一端を固定し、一部分を加熱する。そして、棒の他端を一定速度 V_1' で引張り、同時に加熱源を引張り方向と逆方向に一定速度 V_2' で移動させる。加熱された部分は変形抵抗が小さいから、この部分にのみくびれ(necking)が生じる。しかし、加熱源が一定速度で移動することによってくびれは連続的に拡がり、結果として一様径の棒を得ることができる。

なぜ一定速度の引張り加熱源の移動によって一様な

昭和 59 年 2 月 6 日受付 (Received Feb. 6, 1984) (依頼解説)

* 奈良工業高等専門学校 工博 (Nara Technical College, 22 Yata-cho Yamatokoriyama 639-11)

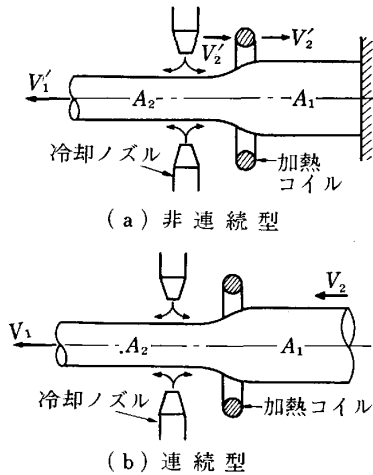


図 1 ダイレス引き抜き法

直径の棒が得られるかを説明しよう。図 1 (a) で、変形前後の棒の断面積をそれぞれ A_1, A_2 とする。いま変形が定常的に行われているとすると、体積一定の条件から、

$$A_1 V_1' = A_2 (V_1' + V_2') \dots\dots\dots (1)$$

となる。断面減少率 r は

$$r = 1 - A_2/A_1 \dots\dots\dots (2)$$

であるから、式 (1), (2) より

$$r = V_1' / (V_1' + V_2') \dots\dots\dots (3)$$

となる。図 1 (b) は、後で述べる連続的なダイレス引き抜きの場合 (加熱源は固定されており、材料が送り込まれる速度 V_2 , 引き抜き速度 V_1) であり、変形前後の断面積と速度の関係は

$$A_1 V_2 = A_2 V_1 \dots\dots\dots (4)$$

である。したがって、断面減少率は

$$r = 1 - V_2/V_1 \text{ (ただし } V_1 > V_2) \dots\dots\dots (5)$$

で決定される。

ダイレス引き抜きの利点は、ダイス、コンテナのような工具を一切用いないですむこと、比較的小さな力で加工できること、1 回の加工で大きな断面減少率が得られることなどである。また、工具と無接触 (無摩擦) であるから、低温では高強度で延性に乏しく高温では高摩擦のために加工しにくい、いわゆる難加工性材料^{†2}の加工に有効な加工法であるといえる。また、この加工法では通常の引き抜き加工では行い得ない加工も可能となる。たとえば、テーパ棒や段付棒のように変化に富んだ断面をもつ棒の製造ができるし、さらには被加工材の材質調整も可能である。

3. ダイレス引き抜きによる加工例

3.1 非連続型ダイレス引き抜き

材料試験機を定速引張装置として利用して、図 1 (a) に示すような方法で引き抜きを行った例を写真 1 に示す。加熱方法としてはいくつかの方法が考えられるが¹²⁾、

^{†2} 原子炉材料の Ti 合金や Zr 合金、耐熱材料の高合金など。一般には高炭素鋼やステンレス鋼を難加工性材料と想定してよい。

局部加熱が必要なこと、短時間内の昇温と温度制御が容易であることなどの理由で、高周波誘導加熱が適している。この場合、素材の加熱温度は装置の出力、周波数、加熱コイルの形状、素材の物理的性質 (比熱、密度、熱伝導率、透磁率など) などに依存する。ここで用いた装置は出力 3 kW、周波数 2 MHz のものであり、加熱コイルは内径 10 mm、厚さ 2 mm の円板状のものである。この加熱コイルはサーボモータ駆動により一定速度で上下方向に移動できるようになっている。

(1) 伸線 (真直棒の製造)

ダイレス引き抜きにおける断面減少率は式 (3) で示されるように速度比のみによつて決定されるが、加工の成否は種々の要因によつてきまる。すなわち、加熱温度、冷却速度、断面減少率、引張速度および材質などをうまく組み合わせて、最適加工条件を得ることが大切である。たとえば、加熱温度が低ければ材料表面にクラックが生じたり、延性不足で破断してしまう。また、変形を制御 (くびれの一様な拡散) するためには適当な温度勾配が必要であり、このためには急加熱とともに十分な冷却が必要となる。冷却が不十分であると変形が停止せずに破断してしまう。

写真 1 (a) は、直径 8 mm の S45C 炭素鋼棒を断面減少率 60.2% で引き抜いた例である。今までの実験によれば 1 回の引き抜きで得られた最大の断面減少率は、18-8 ステンレス鋼で 61%、ばね用炭素鋼で 70% であった。引き抜き中の変形が定常であれば、半径方向の寸

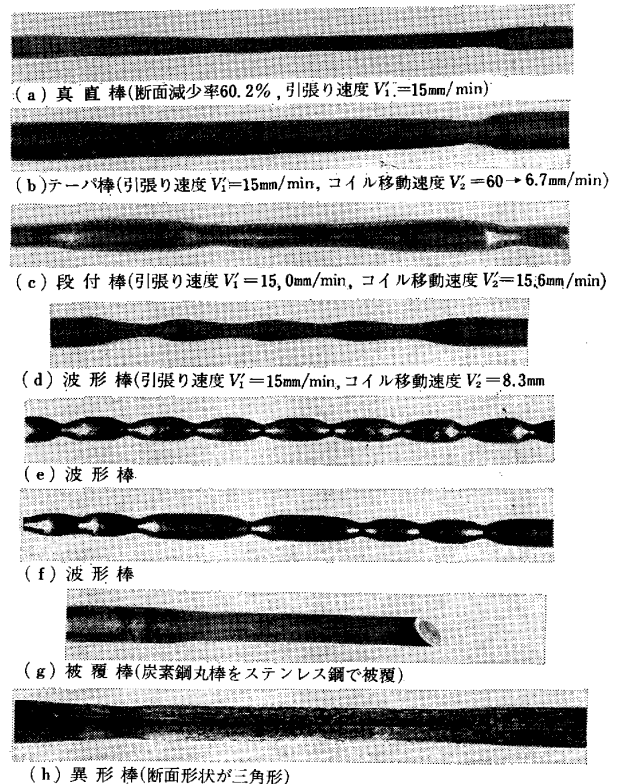


写真 1 ダイレス引き抜きによる加工例

法変化はみられない。ステンレス鋼の場合表面は比較的酸化されにくい。炭素鋼でも通常の熱間加工材と比べると酸化皮膜はわずかである。これは、加熱時間が短いこと、酸化膜ができて変形によつて剥離し、これを冷却空気で吹き飛ばしてしまうことなどの理由による。また不活性ガスによる冷却を行えば、酸化膜の発生は完全に押さえることができる。

(2) テーパー棒の製造

速度 V_1' または V_2' を一定割合で連続的に変化させると、テーパー状の棒を製造することができる。写真 1 (b) は、加熱コイルの移動速度 V_2' をある割合で減速させ、テーパー棒を造つた例である。

(3) 段付棒、波形棒の製造

変化に富んだ断面をもつ棒の製造は

(i) 均一径の棒材を部分的に引き抜き加工した場合、

(ii) 速度 V_1' または V_2' を断続的に変化させた場合、

(iii) 非定常な変形を規則的に生じさせた場合に可能となる。(i)と(ii)の方法は、写真 1 (c) に示すような段付棒の製造に応用することができ、前もつて速度変換をプログラムしておけば容易に希望どおりの形状を得ることができる。また、(iii)の方法によつて写真 1 (d) に示すような波形棒を製造することができる。引き抜き中の冷却能が不足していたり、冷却用の圧縮空気の流れによつて加熱部の温度に周期的なむらが生じたりするとき、くびれは均一に拡散しない。これを逆に利用して、くびれをうまく生じさせることにより、あたかも正弦波をなすような波の間隔を自由に変化させることもできる(写真 1 (e), (f))。

(4) 管の引き抜き

管の引き抜きも中実棒と同様の精度をもつて行うことができる。ただし、式(3)によれば、ダイレス引き抜きでは断面減少率が速度比によつて決まるので、加工後の外径または内径は加工条件によつて異なってくる。すなわち、温度分布によつて変形開始時のくびれの形状が異なるから、所定の径が得られるような最適加工条件をあらかじめ求めておく必要がある。

(5) 被覆棒の製造

写真 1 (g) は、炭素鋼丸棒の表面にステンレス鋼管をダイレス引き抜きによつて被覆し、複合材を製造した例である。加工後のパイプと中の丸棒は焼ばめのような機構で接合しているが、接合強さは加工度によつてあまり変化しない。被覆材の製造は他の加工法によつてもできるが、ダイレス引き抜きでは非常に簡単にできる点が有利である。この手法を用いれば、高周波加熱の効きにくい材料を他の金属で被覆することにより加熱可能とし、ダイレス引き抜きを行うことができる。

(6) その他の応用

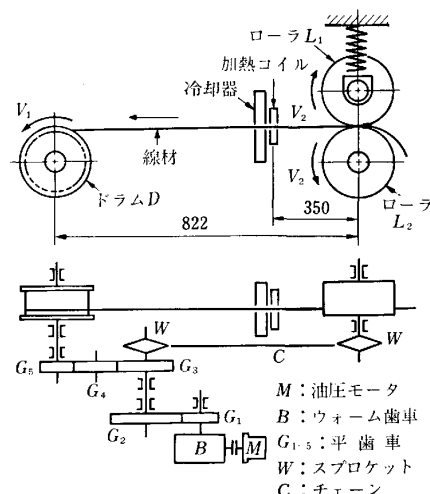


図 2 連続ダイレス引き抜き機の概略図

加熱コイルの形状が円形であつても、角棒、板材、異形材などを元の形状(相似)のままに、望みの断面減少率でダイレス引き抜きすることができる(写真 1 (h))。

3.2 連続型ダイレス引き抜き

前項でこの加工法のいくつかの特徴を示したが、いずれも材料試験機を用いて行つたものである。これらを実用化するためには、加工の連続化と高速化が必要である。そこで、簡単な連続型引き抜き機を試作して、2, 3の実験を行つた。図 2 はその概略図で、引き抜き速度 V_1 と材料の送り込み速度 V_2 の比は、かけかえ歯車 G_5 の取りかえによつて行うことができる。この場合、断面減少率は式(5)によつてきまるから、それぞれの速度の絶対値は関係せず、同一の断面減少率の加工を速い速度でも遅い速度でも行うことができる。駆動源は油圧モータであり、引き抜き速度 6 m/min までの実験が行えるようにしてある。加熱コイルは前記と同じものであるが、冷却方法としては空気あるいは水の吹きつけ、水と空気の噴射(噴霧状)、液化 CO_2 の吹きつけなどを試みた。冷却速度はこの順序で大きくなるが、引き抜き速度を大きくするためには急加熱とともに十分な冷却を与える必要がある。

直径 2 mm のばね用炭素鋼線、18-8 ステンレス鋼線を用いて引き抜きを行つた。現在までに実現した最高の引き抜き速度はともに 4 m/min である。この値は通常の伸線速度に比べると著しく小さい。ダイレス引き抜きを実用化するためには加工速度をさらに向上させる必要があるが、このためには加熱や冷却技術の改善が重要となる。しかし、ダイレス引き抜きの利点(大きな断面減少率、無摩擦加工、材質調整など)をうまく生かすことができれば、必ずしも通常の伸線工程ほどの高速加工は必要でない。

加工中の線材表面の温度分布についての詳しい説明は省くが、一例を図 3 に示す。実測値は熱電対を用いて測

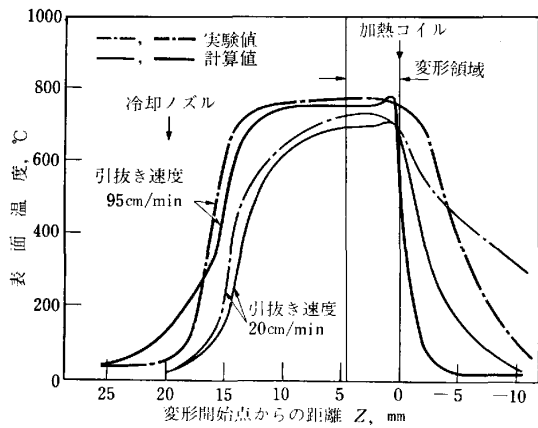


図 3 連続ダイレス引き抜きにおける線材表面温度の軸方向分布 (実測値と計算値の比較)

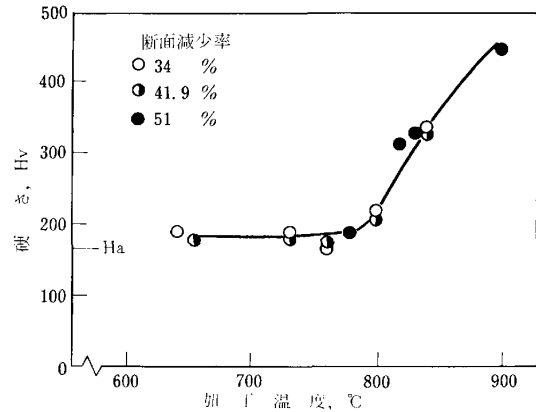


図 5 13Cr ステンレス鋼における硬さと加工温度の関係

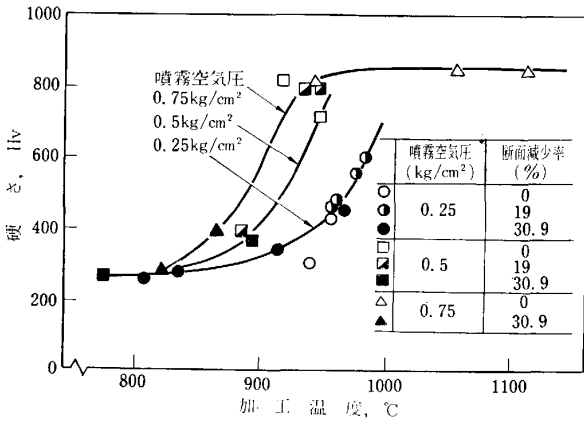
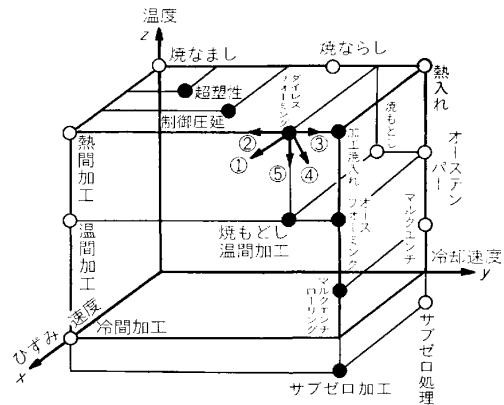


図 4 ばね用炭素鋼のダイレス引き抜き材の硬さと加工温度の関係



① 温間加工 ④ オースフォーミング
② 加工後焼なまし ⑤ 焼もどし温間加工
③ 加工焼入れ

図 6 加工熱処理の表示例

定した結果であり、計算値は有限要素法によつて解析した値である。このような計算手法によつて最適加工条件の設定ができるし、高速加工が可能となるような引き抜き機的设计にも役立たせることができる。

4. ダイレス引き抜き材の機械的性質

ダイレス引き抜きは加熱と冷却を組み合わせた高温加工であるから、加工条件によつて引き抜き材の機械的性質が変化する。図 4 は、0.6% C ばね用炭素鋼の加工温度と硬さの関係を示している。実験は連続型引き抜き機を用いて行い、水冷却の噴霧圧力と断面減少率を変化させた。いずれの場合も加工温度が 830°C 以上になると硬さは増加している。噴霧冷却 (平均の冷却速度: 200~250°C/s) では加工温度が 930°C 以上では硬さは一定値を示し、飽和の状態にある。断面減少率の違いによる硬さの差は認められず、硬さの増加の原因は焼入効果によるものと考えられる。

冷却速度が非常に小さい空冷の場合 (8~15°C/s) であるが、13Cr ステンレス鋼 (0.15% C) についても加工温度と硬さの関係を調べた。図 5 において、780°C 以上の

加工温度では硬さは著しく増加している。この温度は 13Cr 鋼の $\alpha \leftrightarrow \gamma$ 変態温度にほぼ一致しており、780°C 以下で加工した場合は焼なまし材 (図中の記号 H_a) とほぼ同じ硬さである。また、加工温度が変態点以上になるとマルテンサイト組織が観察される。したがって、加工後に軟質の材料を得ようとするれば 780°C 以下の温度で加工すればよく、加工温度を 780°C から 900°C の間で適当に選択すれば、ビッカース硬さで約 200~450 の範囲で材質調整が可能である。

5. ダイレス引き抜きと加工熱処理

5-1 加工熱処理の適用

前項でみたように、ダイレス引き抜きでは加工温度と冷却速度を選択することによつて、被加工材の硬さや強さがある範囲内で調整することができる。しかし、熱(温度)と変形を合理的に制御することによつて、よりいっそうの強靱化を図ることが望ましい。そこで、加工熱処理の適用の可能性を探るために、図 6 に示すような検討を行った¹⁵⁾。図中で、温度(z)-冷却速度(y)平面は熱処理をあらわし、温度-ひずみ速度(x)面によつて

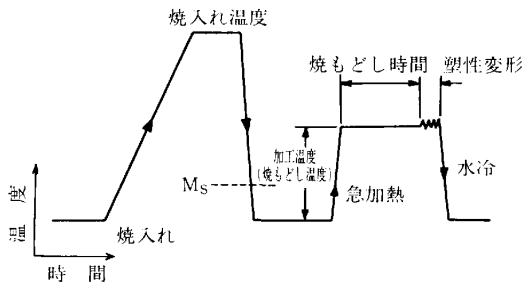


図7 焼もどし温間加工法の手順

加工法が表現できるものとする。ダイレス引き抜きそのものが一種の加工熱処理であると考え、 x, y, z 座標のある点に位置づけることができる。これに他の加工熱処理を適用しようと思えば、図中の記号①～⑤の方向へ加工条件を近づければよいことになる。

一方、ダイレス引き抜きにおける加工限界は、高温(変形領域)での延性に依存するとともに、高温と低温(変形終了部)における変形抵抗の比によつて決定される¹⁶⁾。すなわち、高温では十分な延性があつて、しかも変形抵抗の温度依存性の大きな材料であるほど、一回の引き抜きにおける断面減少率は大きくとれる。①～④の処理法は既知のものであるが、加工限界の向上にはあまり役立たない。また、炭素鋼の場合は④のオースフォージングなどは適用が困難である。

ここでは、温間領域で適用可能な加工熱処理法⑤について検討する。

5.2 焼もどし温間加工法

温間領域での加工性の向上と加工後の材質改善を目的として、新しい加工熱処理法を考案した¹⁷⁾。すなわち、焼入れた鋼を $400^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ に急加熱し、短時間(数十 s から数 min) この温度で保持したのち、焼もどしの組織変化の過程で塑性変形を与える方法である(図7参照)。この加工熱処理法は鍛造に適用できることから「焼もどし温間鍛造法」と名付けたが、ここでは焼もどし温間加工と呼ぶことにする。

(1) 加工中の延性(加工限界)

従来の加工熱処理では加工限界の向上はあまり重要視されていないが、焼もどし温間加工法の目的の一つは加工限界を向上させることにある。そこで、S45C 炭素鋼を実験材料とし、室温から 700°C までの高温引張試験を行つた。図8は、焼入れ材および焼なまし材の破断ひずみ^{†)} ϵ_f と試験温度の関係を示したものである。加熱時間はいずれも 15 s である。焼入れ材の破断ひずみは 200°C 付近から急激に増加し、 $400^{\circ}\text{C}\sim 700^{\circ}\text{C}$ の温度範囲ではきわめて大きな延性を示す。試験温度が 500°C のときの焼入れ材の破断ひずみは約 2.1 であり、焼なまし材に比べて約 3 倍も大きな延性を示す。

図9に、加熱時間が破断ひずみにおよぼす影響を示し

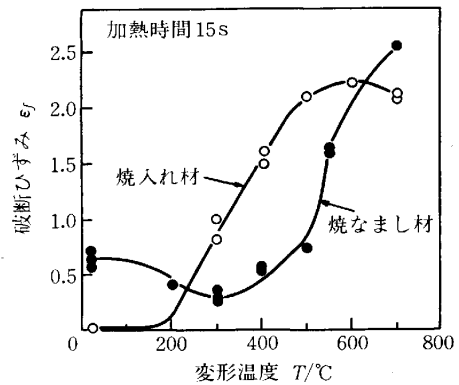


図8 S45C 炭素鋼の引張破断ひずみと試験温度の関係

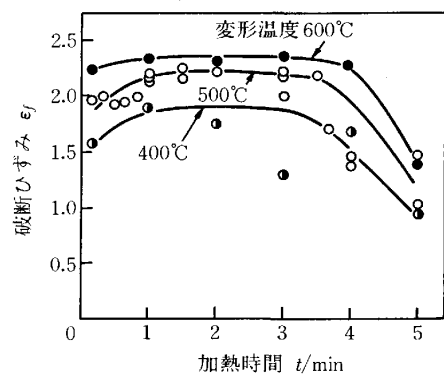


図9 破断ひずみにおよぼす焼もどし加熱時間の影響

た。焼もどし温間加工ではきわめて短時間の加熱によつて延性が増加し、加熱時間が 3 min を越えると延性はむしろ低下する。

(2) 加工後の機械的性質

加工(加熱)温度、加熱時間および加工度によつて被加工材の機械的性質は異なる。 $400^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で焼もどし温間加工(この場合は圧縮)した材料について、室温における引張強さ、残留延性、衝撃値などを調べた。その結果、焼なまし材を同一条件で温間加工したものや、焼入れ焼もどし処理したものに比べていずれも優れていることがわかつた¹⁷⁾。

たとえば、図10は加工温度と衝撃値の関係をあらわしている。焼入れ焼もどし材(圧縮ひずみ $\epsilon = 0$) と比べても、焼もどし温間加工材 ($\epsilon = 0.62$) の衝撃値は大きい。また、同じ加工度を与えた焼なまし材の温間加工材と比較すれば、3倍以上も大きな衝撃値を示す。

6. 焼もどし温間ダイレス引き抜きの試み

高付加価値製品を得るために、ダイレス引き抜きと加工熱処理の組み合わせを試みた。

近年、小型乗用車の懸架ばねとして非線型特性をもつたテーパコイルばねが使用されるようになってきた。通常これらは素材の両端部を切削加工によりテーパ状に加

†) $\epsilon_f = 2 \ln(d_0/d)$ ここで d_0 : 初期直径, d : 破断部の直径

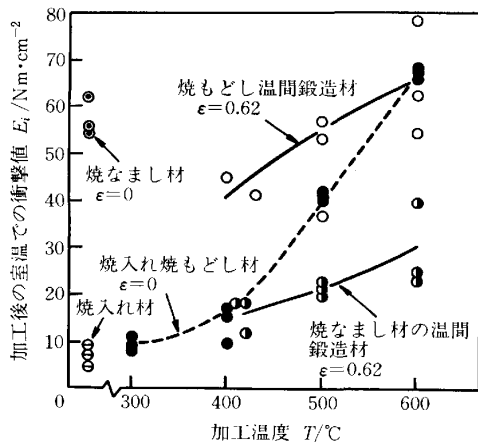


図10 衝撃値と加工(加熱)温度の関係

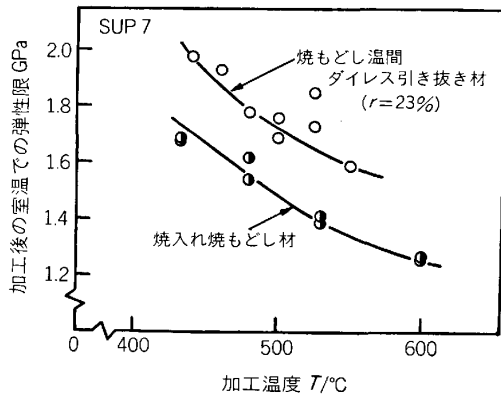


図11 加工熱処理材および焼入れ焼もどし材の弾性限

工したのち、コイルングを行い、焼入れ焼もどし処理が行われている。このような製造法では材料の歩留りが悪く、線径の異なる部分で焼むらが生じるなどの欠点がある。そこで、あらかじめ焼入れた線材を温間領域でテーパ状にダイレス引き抜きすることによつて、高品質のばね用素材を得ることを検討してみた¹⁸⁾。

図1(a)と図7にそれぞれ示した手法を組み合わせたものが焼もどし温間ダイレス引き抜き法である。この場合、焼もどし時間は加熱コイルの移動速度によつて調整することができる。必要な線径を得るための断面減少率は式(3)で定まるから、引き抜き速度を連続的に変化させることによつてテーパ棒をつくることことができる。ここでは主として焼もどし温間加工材の機械的性質を調べるために、直径6mmのばね用鋼線を用いて、断面減少率23% (V_1' : 10 mm/min, V_2' : 33.5 mm/min) で実験を行った。

ばね鋼 SUP7 の場合、最適なばね特性を得るための熱処理条件は 900°C 加熱後室温での油焼入れ、480°C × 10~20 min の焼もどし(ソルトバスの場合)が推奨されている。そこで、比較に用いた焼入れ焼もどし材の焼もどし時間はいずれも 10 min とした。

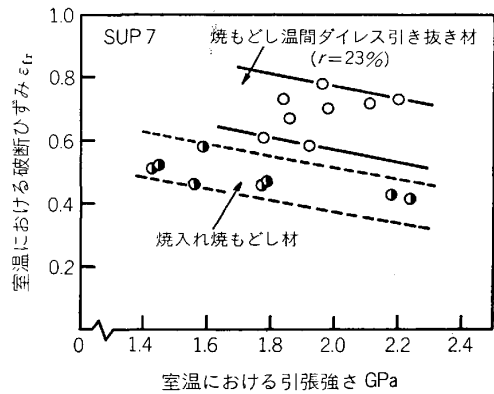


図12 引張強さと延性の関係

図11は、ダイレス引き抜き材の加工温度と室温における弾性限の関係である。通常の焼入れ焼もどし処理では弾性限は 160 kgf/mm² 程度であるが、加工熱処理材では 200 kgf/mm² の弾性限を示す。同一焼もどし温度における硬さ、引張強さおよび延性は、いずれも加工熱処理材の方が優れている。引張強さと延性の関係を図12に示す。通常の焼入れ焼もどし処理によるばね鋼の引張強さは約 180 kgf/mm² (480°C 焼もどし) であるが、460°C の加工温度における加工熱処理材は 220 kgf/mm² にも達している。しかも、同一強度における延性を比較すると、いずれも加工熱処理材の方が大きな延性を有している。したがって、この加工熱処理法は材料の強靱化に対してきわめて有効な方法であるといえる。

7. おわりに

高温変形と冷却の組み合わせ加工の例として、ダイレス引き抜き法と加工熱処理法の紹介を行った。これらはいまだ実験的な段階に止まっているが、種々の利点を考えると広い範囲での応用が期待される。

工具を用いない加工法としては、すでにダイレス曲げ加工が大口径管の曲げ継手の製造に活躍している³⁾¹⁹⁾。ダイレス引き抜きも従来の引き抜き工程のすべてに置き換えようとするのではなく、難加工性材料の加工や特殊な形状の製品の加工、さらには加工熱処理の適用による高付加価値製品の製造等に利用することが有効であろう。

素形材加工における加工熱処理の適用の重要性についてはすでに他で報告されている²⁰⁾²¹⁾。ここでは焼もどし温間加工だけを例にとつたが、塑性加工における加工熱処理は古くて新しい課題である。今後は加工法相互の関連や組み合わせを考えた複合加工技術としての展開が期待される。

なお、ここで紹介した研究成果の大部分は奈良工専小島耕二助教授によるものである。また、神戸大学工学部助教授小坂田宏造博士および他の共同研究者に深く感謝する。

文 献

- 1) 小島耕二, 関口秀夫: 奈良高専研究紀要, 14 (1979), p. 11
- 2) 市瀬辰己, 小島耕二, 木村貞男: 同上, 18(1983), p. 13
- 3) 竹山輝義: 熱処理, 10 (1970), p. 125
- 4) 米国特許, No. 2479353 (1949)
- 5) R. H. JOHNSON: Met. Rev. (1970) Mar., p. 146
- 6) V. WEISS and R. A. KOTT: Wire J., (1969) Sep., p. 33
- 7) J. M. ALEXANDER and T. W. TUNNER: Proc. MTDR (15th Intr. Machine Tool Design and Research Confr.), 15 (1974), p. 525
- 8) J. W. H. PRICE and J. M. ALEXANDER: 同上, 18 (1977), p. 259
- 9) Я. М. ОХРИМЕНКО, О. М. СМОРНОВ, В. П. ВАЛАКИН, Б. В. ПЫЛАЕВ, and В. Е. ШКЛЯЕВ: Миссис Науц Тр., 81 (1975), p. 188
- 10) H. SEKIGUCHI, K. KOBATAKE, and K. OSAKADA: Proc. MTDR, 15 (1974), p. 539
- 11) 関口秀夫, 小島耕二, 小坂田宏造: 塑性と加工, 17 (1976) 180, p. 67
- 12) K. KOBATAKE, H. SEKIGUCHI, and K. OSAKADA: Proc. MTDR, 18 (1977), p. 253
- 13) 小島耕二, 関口秀夫, 小坂田宏造, 吉川勝幸: 塑性と加工, 20 (1979) 224, p. 814
- 14) 小島耕二, 関口秀夫, 小坂田宏造, 吉川勝幸: 同上, 21 (1980) 228, p. 52
- 15) 関口秀夫: 総合鋳物センター先端金属材料調査委員会資料 (1982), (私信)
- 16) W. A. BACKOFEN: Deformation Processing (1972), p. 221 [Addison-Wesley Publishing Company]
- 17) 関口秀夫, 小島耕二, 小坂田宏造, 久保勝司: 塑性と加工, 24 (1983) 271, p. 873
- 18) 小島耕二, 関口秀夫, 小坂田宏造: 昭和 58 年度塑性加工春季講演会論文集 (1983), p. 221
- 19) H. ASAO, K. OKADA, M. WATANABE, H. YONEMURA, T. MATUMOTO, and N. UMEHARA: Proc. MTDR, 24 (1983), p. 97
- 20) 宮川松男, 関口秀夫: 機械技術, 31 (1982) 1, p. 34
- 21) 鳥坂泰憲, 宮川松男: 機械の研究, 33 (1981) 1, p. 1 および 33 (1981) 2, p. 273