

であった。米国某社では1968年からディファレンシャルピニオンギヤの生産を目的に、方法と設備の開発が行なわれた。

製法の概要は、各種の学会、雑誌などに広く紹介されているので、ここでは省略したいが Metal Progress は、これらの開発の初期から、応用拡大されるまでのあらましを総合的に報告している³⁾。わが国では、現在自動車用よりも農機用、二輪車用にそのはじめの用途が開かれたが、最終形状に近いものを加熱して鍛造し、密度比を95~98%に上げる方法が多く、単純素材から製品化するのとは今後のことであろう。

(d) 焼結鍛造の応用

写真5・2・1にわが国の現在の製品例を示した。米国あるいは英国では、自動車用部品への応用研究が進められており、たとえば英国では自動車エンジン用コネクティングロッドの焼結鍛造を研究し、材料、設計、実地試験などすべて終了し、実用可能であるとの見通しを得ている。またサイドギヤ、ベルトプーリーなども作られた。しかし、これらは1973年までは、原料粉末、とくにアトマイズした低合金粉末が高価なため、専用のラインシステムを組んでも、一般鍛造鋼部品にわずかにおよばないコスト高のため、大量に使用されるに至っていない。これらはやはり今後の問題のひとつであろう。

(e) 設備の改良

最近米国で開発された新型プレスは、粉末の圧縮方向に2ないし3段の段差のある形状が可能となり、500 t、1,000 t、1,500 t の大型であり、また寸法精度もよく、単位時間の生産個数も従来より多いなど多くのメリットがあるので、米国のビッグスリーをはじめ、わが国のメーカー、欧州メーカーが競ってこのプレスを導入し、特にわが国では一挙に大型焼結部品の時代に入った。米国ではまた、焼結鍛造プレスの開発を行ない、さらに最近原料投入から鍛造終了まで一貫した焼結鍛造システムの開発も行なわれ、2~3級程度のギヤをこの方法で量産しようと発表されている。

(4) 今後の課題

以上のように、過去10年の大半は、焼結鍛造法による鉄系焼結部品の開発とその応用に主眼がおかれたといえるだろう。もちろん従来法による鉄系焼結部品も、今後大いに伸びることと思われる。

焼結鍛造法が今後伸びるためには、しかし、原料粉、設備の自動化などのほかに、鍛造型材のすぐれたものの開発が鍵となるであろう。

参 考 文 献

- 1) MPIF : P/M Materials Std. and Spec. 1969
- 2) 日本粉末冶金工業会 : JPMA-1-1970
- 3) Staff Rep. : Metal Progress, 1971, April p. 54

5.3 処理法および測定法

5.3.1 熱処理技術

(1) 概 況

図5・3・1は最近10年間の年度別熱処理加工高を特殊鋼生産高と比較したもので、鋼生産の増加が4倍弱に対し

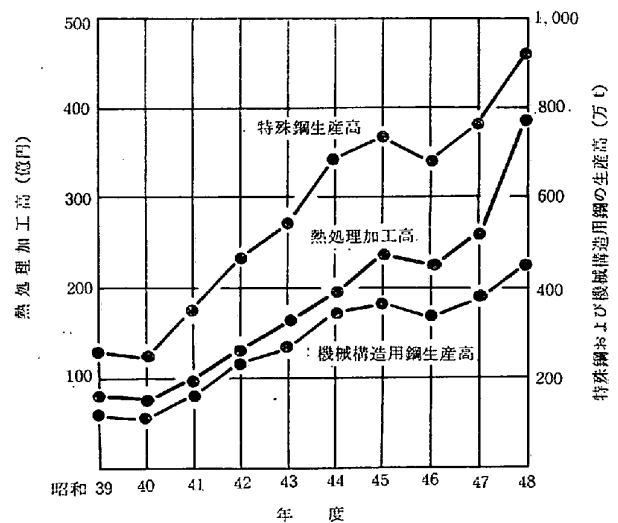


図 5・3・1 年度別熱処理加工高（金属熱処理専門業者による）と特殊鋼および機械構造用鋼生産高（熱延鋼材ベース）の推移
(熱処理加工高：日本金属熱処理工業会の資料による)
(鋼材生産高：鉄鋼統計時報による)

熱処理加工高は金額で約5倍、物価変動を考慮すれば、これらはよく対応した発展を示しているといえよう。ただし、図の熱処理加工高は金属熱処理専門業者によるもののみを示し、鉄鋼メーカーなど他業種の行なうものも含めれば、この数字はは1桁大きな数字になるものと推定される。

一方、研究および技術面の進歩も各方面にみられ、それによって合理化、省力化、低コスト化、あるいは使用鋼材の低級鋼への転換など多くの効果を生んでいる。

鋼の焼入性の定量化は1950年代までにほぼ確立され、とくに Jominy 式一端焼入方法は広く普及して、JIS でもこの方法による焼入性試験方法が昭和31年に制定された。また、これを利用して焼入性を保証した構造用鋼材の JIS も昭和40年に定められた。一方、GROSSMANN の方法による焼入性 D_I (理想臨界直径) は各種の炭素鋼、合金鋼について発表され、米国ではこの D_I をベースに電算機を駆使して熱処理鋼材を選択する CHAT (Computer Harmonized-Application Tailored) という手法も開発され、化学成分と結晶粒度から D_I をスライドルール式に計算する米国の円盤式、わが国の滑尺式焼入計算器も発表されている。

しかし、これらの各方法も直径 200mm 以上の大型鋼材には適用できない。一方最近では機械装置の大型化、高能力化とともに大型鍛鋼品を熱処理して使用する場合も増加している。そこで多くの鋼について連続冷却変態 (CCT) 図が作成され、また、水、油および空気中におけるいろいろの直径の丸棒の中心部と表面部付近の冷却曲線も実測され、鋼材内の各位置における冷却曲線を CCT 図の冷却曲線と対応させて、鋼材の質量効果を求めることも行なわれている。さらに、CCT 図より多くの報告がある TTT 図を用いて質量効果を計算する実験式も提案されている。

熱処理応力に関する研究も大きく進歩した分野の一つ

であろう。鋼の焼入応力は焼割れ、置割れなどの原因として有害である反面、切欠材や大型部品では、残留応力の分布状態によって疲れ強さが改善される場合のあることが確認され、車軸材の高周波焼入れなどで実用化されている。調質鋼では積極的な意味での残留応力の利用はまだ少ないが、焼入応力について最大せん断説を用いた新たな弾塑性計算が行なわれ、その結果にもとづいて急激な焼入れの採用による鋼の強靱化が試みられ、また焼入中の鋼の塑性変形能の変化もあわせ考慮して、焼割れに対する安全範囲を予測する方法も報告されている。

加工熱処理、すなわち熱処理の過程に外力、とくに塑性加工をたくみに組込む手法は後述される強靱化の目的以外にも多くの応用面が開かれている。球状化焼なましに先立って再結晶温度以下 200°C 以上の温度範囲で塑性加工を施して熱処理時間を $1/4 \sim 1/20$ にも短縮することを可能にした球状化予備処理、安定オーステナイト領域で加工し、直ちに焼入れて結晶粒の微細化、強靱化と焼入性の向上による低級鋼への転換を可能とした鍛造焼入れ、マルテンサイトの生成過程や焼もどし分解の過程で現われる変態超塑性を利用して、熱処理歪を矯正するプレスクエンチやプレステンパーなども実用化されている。

さて、他方では公害問題がクローズアップしてきた。熱処理公害は大別して排水汚染、大気汚染、騒音の三つに大別され、排水汚染では液体浸炭のシアンおよび焼入油の廃油、大気汚染では重油炉などの燃焼炉からの排ガスや煤煙、液体浸炭やタフトライド法のシアン排ガスや窒化によるアンモニアガスの悪臭などが挙げられる。それぞれに公害対策が進められ、中でも毒性の強いシアンを生ずる液体浸炭については、取締規制の強化とともに排水処理技術も開発され、とくに次亜塩素酸塩による酸化処理でシアンを分解無毒化する方法が一般に採用されつつある。しかし、工場による排水内容物の実態も不明な点が多く、また処理方法も確立されたとはいえない現状である。一方、ガス軟窒化などの無公害熱処理方法の開発も盛んで、それらへの転換をはかる企業も多い。また、油焼入れに伴う公害や安全問題、作業環境の改善などの面から、油に代わる水溶性焼入冷却剤も種々開発利用されるようになった。

なお、熱処理用語の JIS が昭和44年に、熱処理加工技術の JIS も昭和43年の「焼ならしおよび焼なまし」「高周波焼入れ焼もどし」を初めとして次々と制定された。

(2) 熱処理設備

労働力不足、生産性向上、環境改善などの問題に対処するために、熱処理設備においてプロセス制御や搬送の自動化、合理化、作業環境の改善がなされつつある。

ガス浸炭などの熱処理雰囲気管理には古くから露点測定法が用いられてきたが、最近では赤外線 CO_2 分析計が一般化した。特に endothermic gas 変成炉においては、設定値と分析値の偏差に応じて原料ガスあるいは空気の供給量を調節し、生成するガスを完全自動制御することが行なわれている。一方同様な考え方に基づいて炉内雰囲気自動コントロールが試みられているが、まだ完全な自動化には至っていない。雰囲気炉においては品物の

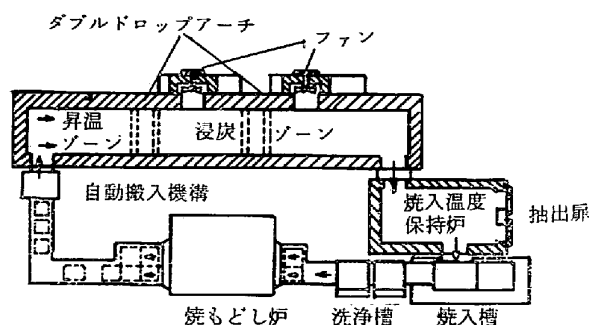


図 5.3.2 サイドファン式連続ガス浸炭炉

装入量、炉内でのガスの流れ方、取り出し、装入時の炉圧の変化による外気の漏入などにより雰囲気の変動が大きく、また必ずしも化学平衡状態にはなっていないことなどが雰囲気鋼の鋼反応性制御を難しくさせている。

連続ガス浸炭炉においては各ゾーンごとにカーボンポテンシャルを変える必要がある。このため各ゾーンの雰囲気の独立性を向上することを目的として図 5.3.2 のような Side-fan 型の炉や double-drop arch 型の炉が導入された。

炉回りの搬送設備の自動化、機械加工工場と熱処理工場とをコンベヤで直結するなど搬送関係を通しての省人化が進んだ。またパッチ型炉では装入、取出し、搬送などの機能を自動化した台車が普及しつつあり、またプレスクエンチにおける炉から部品の取出し作業においてはロボット化が進行しつつある。

公害問題では、シアンを含んだソルトを用いる液体浸炭、軟窒化、工具鋼の焼入れ焼もどしなどにおいては完全な排水処理設備が導入される一方、それ以外の方法、例えばガスを用いた熱処理、真空熱処理へと移行しつつある。

安全性に関しては、雰囲気調整ガスを用いる工場では爆発防止のため、可燃性ガス検出装置を設け、緊急時には窒素ガスで消火するシステムが普及しつつある。

今後、熱処理設備は省エネルギー化が進むものと思われる。加熱ソースとして電気、都市ガス、LPG、灯油、重油などの選択の再検討、炉全体の熱効率の向上の検討などにより従来の形式とは異なった炉構造の出現へと向かうであろう。

高周波焼入れは設備コストが低い、適用鋼種が炭素鋼など低コストの鋼でよく、サイクルタイムが短かく、機械加工ラインに組み込める、など多くの利点があり広く用いられている。この高周波焼入れに用いられる発振機は、従来 10kHz 以下の低高周波領域では MG 式が、 10kHz 以上では真空管式が用いられてきた。近年 MG 式に代って $500\text{Hz} \sim 10\text{kHz}$ の領域でサイリスタを応用した発振機が普及しつつある。これは小型で熱効率がよく、on-off が容易であるなどの利点がある。しかし大容量のものが難しい、コイルとのマッチングが限定されるなどの制約条件がある。

従来真空炉は単に加熱の目的で用いられ、冷却速度を問題とする場合には用いることができなかった。ガス冷却方式が確立されて以後、焼入性の高い材料の熱処理に適用できるようになり、工具材料など特殊な分野に広ま

った。近年真空中で油焼入れの可能な炉が開発され応用の範囲が広がり実用化が進みつつある。また真空浸炭技術もこの形式の炉を基礎として成立している。真空中での放電を応用したイオン窒化法も最近発達した。この両者については次項で詳述する。

従来、焼入焼もどしして使用されていた小物パネ部品は、最近オーステンパー処理炉の普及に伴いしだいにこの処理に変わりつつある。これに用いる装置は保護雰囲気中で部品を連続加熱する部分と、急冷用の塩浴槽、等温変態完了後の水冷、洗浄槽から成っている。今後パネ材料以外の分野の部品にも応用されるものと思われる。

(3) 表面硬化

表面硬化技術はこの10年の自動車工業や一般機械工業の発展に伴って自動化が推進されるとともに、注目すべき新技術が実用化されつつある。

表面硬化処理の中で最も一般的に応用されている浸炭焼入れでは、最近、真空浸炭と呼ばれる技術が開発された。従来、COやH₂を主成分とするキャリアガスにブタンなどのエンリッチガスを添加した雰囲気中で行なっていたガス浸炭に対し、いわゆる真空浸炭はCH₄を1～10 Torr 含んだ減圧雰囲気中で浸炭する方法である。900～930°Cの浸炭に対し以前から1,000°C以上の温度での高温浸炭は検討されてきたが、主として発熱体、炉体などの寿命の点で実用化されていなかった。ところが真空浸炭では雰囲気ガスと炉材の反応による寿命低下の懸念がないので、発熱体や断熱材として繊維状グラファイトを用いることができ、この結果高温浸炭を実用化することが可能となった。真空浸炭に用いられる装置の一例を図5・3・3に示す。処理方法は、まず加熱室に部品を装入後

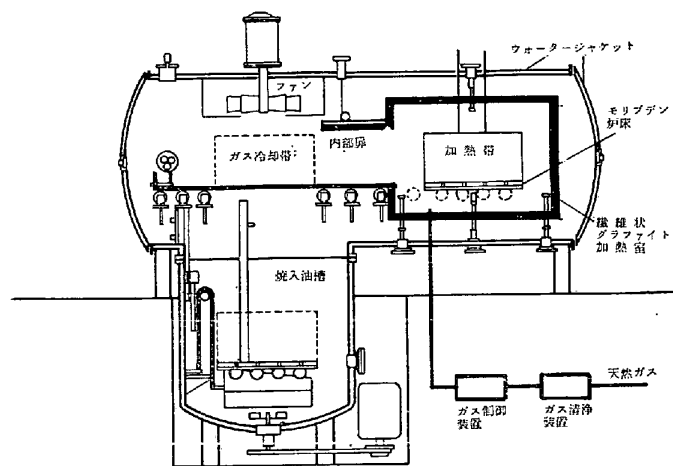


図 5・3・3 真 空 浸 炭 装 置

10⁻² Torr 程度に排気し、約1,040°Cに加熱保持したのち、あらかじめ精製された天然ガスを炉内に導入し浸炭を行なう。表面でのオーステナイト平衡炭素量はA_{cm}線から推算されるように約1.7%である。したがってこの方法で浸炭する場合、天然ガスを導入している間に高い表面炭素量に浸炭し、そののち10⁻² Torr 程度に排気し、真空中で炭素を内部に拡散させ、表面の炭素量を下げるとともに浸炭深さを増加させる。ガス導入中の炉

内雰囲気管理は赤外線CH₄分析計を用い、また浸炭深さや表面炭素量は、ガスの導入時間と拡散時間で管理される。浸炭完了後部品は冷却室に移され、焼入温度までガス冷却したのち油焼入れされる。この際、通常の鋼材では結晶粒の粗大化が起こるので、一般的にはA₁変態点以下までガス冷却したのち、再び加熱室に戻し、焼入温度に再加熱、保持し、その後、油焼入れすることにより組織の調整を行なっている。この方法の特長は、高温浸炭であるため、処理時間が短いこと、真空中で処理が行なわれるため、部品表面の光輝性がよいこと、炉気を燃焼させたり、装入、取出し時にフレームカーテンを必要としないので、作業環境がよいこと、雰囲気中に酸化性のガス成分を含まないので部品最表面にCr、Mnなどの酸化による異常層を生じないなどがあげられる。しかし一方では、従来と全く異なる設備を必要とすること、連続処理炉を作ることが難しいこと、雰囲気のコントロール方法や結晶粒の粗大化の問題が完全には解決されていないこと、真空焼入用として低歪焼入油が未開発であるなど、完成した技術とはまだいえない。しかし、省資源、省エネルギー熱処理として今後次第に普及をみると思われる。

一方、従来からのガス浸炭においては、雰囲気のコントロール技術が進み、パッチ型炉では（完全）自動制御している例もあり、連続炉でも同様の試みが今後進められるであろう。この背景には、雰囲気中のCO₂やCH₄などの微量ガス測定装置として、赤外線自動分析計の普及、PID制御、サイリスタ制御などによる炉内温度制御方法やミニコンピュータの発達が大きく寄与している。

浸炭浸室技術が確立、普及したのはこの10年のことである。これは通常の浸炭の際に炭素と同時に0.2～0.4%程度の窒素を拡散させる方法である。窒素が入ることにより、鋼のA₁変態点が低下し、焼入性が向上するので、表面硬化が容易になり、表面かたさも高くなる。また浸炭浸室焼入れされた硬化層は、浸炭焼入れの場合と比較して焼もどし軟化されがたく、耐摩耗性が大きいなどの特長がある。この処理は850～900°Cの温度で、ガス浸炭雰囲気中にNH₃ガスを2～5%添加して行なわれ、雰囲気管理には炉内の残留NH₃%とCO₂あるいは露点を用いられている。この処理は耐摩耗性、疲れ強さの向上を目的として主として鋼板、炭素鋼などに利用されている。

ガスを用いた雰囲気熱処理装置においても最近の省エネルギー、省資源化の検討が現在盛んに行なわれつつある。従来のれんがに代わってセラミックファイバーなど新しい断熱材を用いた熱効率の良い炉構造の検討、900～930°Cより高い温度での浸炭によるサイクルタイムの短縮、気密性のよい炉構造による装入ガスの減少、ひいては雰囲気ガスの再循環や、endothermicガス以外のキャリアガスの検討へと発展してゆく可能性がある。

窒化技術は近年目ざましい発展と変遷をへている。ことに、軟窒化処理技術が著しい普及をした。この技術は鉄系材料の最表面にε-Fe₂₋₃N、γ'-Fe₄N、Fe₃Cなどから成る5～20μ程度の化合物層を形成させ、その内側に0.5～1.0mmの窒素の拡散層を形成させるものである。こ

の結果、耐摩耗性、耐焼付性、耐疲労性が著しく向上する。適用できる材質には炭素鋼、合金鋼、工具鋼、鋳鉄など広範囲にわたっており、自動車、一般機械部品に広く応用されている。またこの処理方法は変態を伴わないので処理歪が小さいことも特長となっている。しかし、ころがり軸受などのように高いヘルツ応力を受ける場合や、浸炭焼入れや高周波焼入れのような高い疲れ強さを要求される場合には適用できない。

軟窒化処理方法は、西独 Degussa 社によって開発されたアルカリ金属のシアンおよびシアン酸塩 (MCN, MCNO) の熔融塩浴を用いる方法が広く利用されてきた。このような塩浴法は一般に廃ソルトの廃棄や、処理した部品の洗浄に用いた水の排水処理など、公害上の規制をみたす設備が必要になった。一方ガス雰囲気を用いた軟窒化処理法が開発され、現在普及しつつある。ガス軟窒化法には数種の方法がある。

1. endothermic ガス + NH_3 ガス (ナイトエンパー法, タフナイジング法)
2. exothermic ガス + NH_3 ガス (トライナイディング法)
3. 尿素の錠剤を滴下 (ユニゾフ法)

このうち最も一般的に应用されているのは 1. の方法で装入ガス中の NH_3 量を 40~60%, 炉内での未分解 NH_3 量を 40~50% に雰囲気量を管理している。用いられる設備は従来の浸炭炉を基本とし、ガスシール性を上げ防爆上の配慮をし、窒素に安定な炉材を採用するなどの考慮がなされている。いずれの方法も表面に生成する化合物層の組成に本質的な差異はない。一例として、従来の熔融塩法と 1. のガス法によって生成した最表面の化合物層の X 線回折結果を図 5.3.4 に示す。いずれも前述のごとく $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$, $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$ から成っている。しいていえば、熔融塩法、3 種のガス法の化合物層中の N, C の含有量には少々差異があるものと考えられる。

窒化技術のうち注目すべき方法としてイオン窒化法がある。この方法は原理的には古くからあったが、実用化されたのは最近のことであり、これは N_2 , H_2 , NH_3 などを 1~10 Torr のガス圧にした真空槽中において、部品を陰極に、炉体を陽極にし、この間に 200V~2 kV の直流電圧をかけてグロー放電を行なう方法である。この際、陰極付近のプラズマ部分で生じたイオン化した N は陰極電位降下の部分で加速され、陰極(部品)表面に衝突(イオン・ボンバー)する。その結果イオンの持つ高いエネルギーは、熱エネルギーとなって部品を加熱すると同時に表面を窒化する。N 原子が直接部品表面に衝突、侵入する、いわゆるイオンインプランテーションによるメカニズム、あるいは陰極スパッタリングにより叩き出さず Fe 原子とイオン化した N が結合し窒化物を形成し、これが表面に再吸着、分解するという窒化メカニズムが推論されている。この方法により表面に形成される窒化物はガス圧、ガス組成、処理温度などによって異なる。従来の窒化やガス軟窒化と異なって $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$, $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$ のそれぞれの単相の化合物層を形成することが可能である。従来の窒化鋼のガス窒化は NH_3 気流中で数十時間を必要とする上に、表面に脆い ϵ 相が出るなどの欠点があった。イオン窒化では処理温度を上げて表面が靱い

γ' 相にできることを利用して、産業機械関係に应用されている。また高クロム耐熱鋼などガス窒化が困難な場合、この方法によれば、窒化を阻害している最表面の不動態化したクロム酸化物層をスパッタリング効果で除去できるので、窒化は容易にできる。もちろん従来の軟窒化法と同一の表面層を得ることはできるが、特に大きなメリットとなる点がないのでこの分野の置換はあまり多くない。しかし、無公害であること、省エネルギー処理であること、コントロールが容易であることなど、真空浸炭と同様の理由により将来普及してゆくものと思われる。

ボロン浸透処理は、1,000°C 以上の温度で鋼の表面から B を拡散させ、最表面に FeB, Fe_2B などの鉄ホウ化物の硬い層を形成させる技術である。この方法には熔融塩浸漬法、熔融塩電解法、固体法、ガス法などあり、多くの実用化研究が行なわれている。この方法によれば処理後焼入れもどしすることにより内部硬化ができること、鉄ホウ化物層は高温までかたさが低下せず、安定であるなどの特長がある。型寿命を延長する目的で熱間鍛造型 (JIS, SKD 61) にボロン処理を応用している例があるが、型以外の一般機械部品への実用例はほとんどない。

最近高エネルギー源を熱処理に応用しようとする試みが盛んである。レーザー、電子ビーム、プラズマ、パルス化した高周波などをエネルギー源として、従来の焼入れや急冷凝固(チル)を行なうものである。この方法では高エネルギーを与える時間は極めて短時間であり、加熱

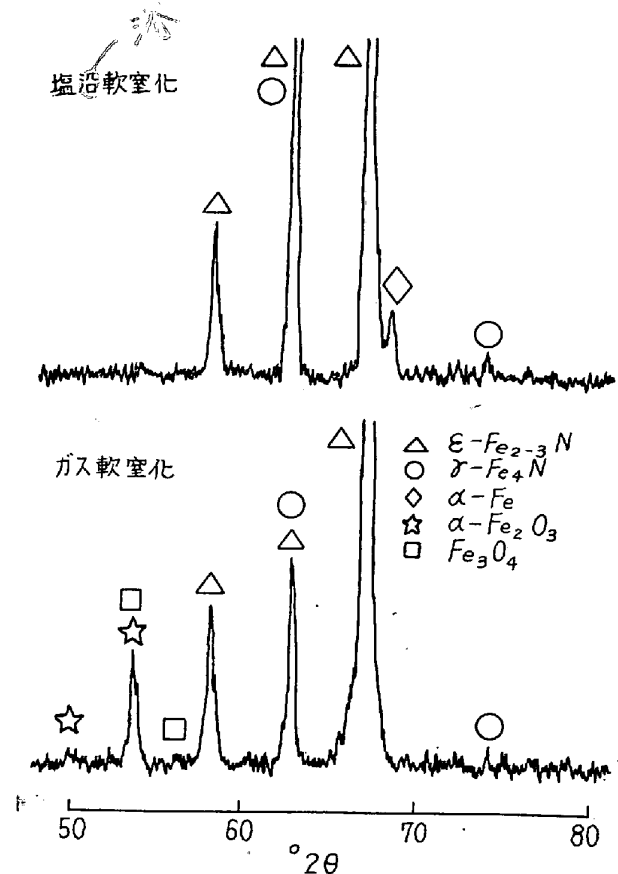


図 5.3.4 軟窒化した表面層の X 線回折結果

対陰極: Cr, フィルター: V, 電圧 30 KV, 電流 20 mA, スキャン速度 1°/2θ/min

部分は限られた部分のみである。周囲の非加熱部分により、固体冷却の原理で極めて速く冷却されるため、特に冷却媒を用いなくとも焼入れやチル化が可能である。また冷却速度が極端に速い場合にはマルテンサイト変態とは異なる変化が起こる場合が観察されており、今後この種の高エネルギーを表面硬化に応用する研究はますます進展するものと思われる。

(4) 加工熱処理

塑性加工と熱処理を併用した処理を加工熱処理 (thermomechanical treatment) という。加工と熱処理の組合せ方によって種々な処理法があり、それぞれの特徴をもっているが、超強靱化へ応用するときはマルテンサイト変態を利用し、高張力鋼などの延性 (ductility)、靱性 (toughness) の向上にはベイナイトやフェライト・パーライト変態組織を利用する。

これらの加工熱処理は1950年代よりしだいに発展してきたが、1960年代において研究が最も活発に行なわれ、1970年代に入って実用化されるものと、されないものとが区別され、鍛造焼入れとかコントロールド・ローリング (制御圧延) などは生産工程で大いに活躍している。オースフォームなど幾つかの加工熱処理は強靱化の方法として理論的にも実際のにも注目されるにもかかわらず、それほど実用化されず取り残されている。それには処理法が面倒で、用途が少ないなどいろいろな理由があるであろうけれども、われわれの認識が偏狭であったことも認めざるをえない。これらのすぐれた加工熱処理法を再認識するためにも、従来と少し違った見方で、その作用を考えてみたいと思う。

従来、加工熱処理を考える場合、たとえばオースフォームとか鍛造焼入れとか、オーステナイトを加工するという処理に対して、あまり突込んだ考察を行わず、加工されたオーステナイトの変態およびその変態組織と機械的性質に重点がおかれていた。そのためにオースフォームとか鍛造焼入れというような一連のオーステナイトの加工処理に対する統一的な観点に欠けており、オースフォームとか鍛造焼入れなど個々の処理にのみ注目して視野が狭かった。

加工熱処理における塑性加工は変態前のオーステナイト状態における加工、変態途中の加工および変態後の加工がある。

従来、準安定オーステナイトを加工する処理をオースフォームと呼び、準安定では加工処理が施しにくいので、750°C 付近の安定範囲で加工する方法を改良オースフォーミング (modified ausforming) という。さらに1,200°C 付近で鍛造して焼入れする方法を、鍛造焼入れとか、加工焼入れとか呼んでいるが、これらはすべてオーステナイト状態で加工されるもので、統一的に理解されなければならない。コントロールド・ローリングもこの意味で、この範ちゅうの中で理解されなければならない。

一般に、加熱された金属を変形させる場合、すべり変形によって転位密度を増し加工硬化してゆく過程と、回復再結晶をおこして軟化してゆく過程 (自己拡散過程が律速する) とが重畳しているのが実態である。このような混合した過程はもちろんその金属合金の種類によって

変化するが、同一金属合金においては加工温度 (T) と変形速度ないしはひずみ速度 ($\dot{\epsilon}$) によって支配されるものである。 $\dot{\epsilon}$ が非常に小さければかなり低い温度でも変形と回復とが同時におこり、これらが釣り合っている状態がえられる。クリープの定常状態がこの例である。熱間圧延のように $\dot{\epsilon}$ が大きければ温度が高くなければ、クリープの定常状態のように変形と回復ないしは再結晶が釣り合って、硬化も軟化もせずに変形が進行するような状態にはなりにくいけれども、 $\dot{\epsilon}$ と温度を調節すれば、そのような状態を作り出すことは可能である。このように、変形しながら回復や再結晶をおこしている状態を動的回復とか動的再結晶という。動的再結晶をおこさせれば、一般にきわめて微細な結晶粒をもつ組織となる。回復や再結晶をおこすためには駆動力を必要とし、その駆動力は転位密度などに原因される結晶内の蓄積エネルギーに関係するので、動的再結晶が完全におこるような $\dot{\epsilon}$ と温度の組合せであっても、変形初期には必ず加工硬化の過程を経て後、回復、再結晶がおこるようになる。完全な動的再結晶をおこす条件よりも $\dot{\epsilon}$ が大きいあるいは温度が低ければ釣合いがとれず加工硬化し、転位密度を増す。反対に $\dot{\epsilon}$ が小さく温度の高い場合は回復・再結晶が優先し、ある程度の粒の成長もおこるのである。

オーステナイトを種々な温度で種々なひずみ速度で加工して、上述のような加工硬化状態、動的回復状態、動的ポリゴニゼーション状態、動的再結晶状態になるように種々な加工度で加工し、その後マルテンサイト、ベイナイト、フェライト・パーライト変態をおこさせればどのような性質を得ることができようか。また、そのときの組織や欠陥のうけつきなどはどうなっているであろうか。このような観点から総合的に行なった研究はいまだ無く、この中にきわめて有望な強靱化の可能性がひそんでいるように思われる。過去において $\dot{\epsilon}$ に無頓着であった点が大いに反省されなければならない。わずかに BERNSTEIN はこの点に着目して、後述するような面白い結果を得ているが、総合的な研究には至っていないようである。準安定状態でオーステナイトを加工するいわゆるオースフォームは再結晶温度以下で加工するので、オーステナイトは加工硬化した状態、すなわち転位密度が上昇し、場合によってはある程度セル構造を形式した状態 (積層欠陥エネルギーにもよる) でマルテンサイト変態をおこさせるものである。これによって大きく強化し、その割にあまり靱性は低下しない。750°C 付近で加工する改良オースフォーミングでは少し動的回復をおこしているかもしれない。衝撃値が向上するといわれている。また、1,000~1,200°C で加工する鍛造焼入れは靱化するといわれている。動的再結晶をおこしているのかもしれない。しかし、すべてにおいて上記のような $\dot{\epsilon}$ と温度の兼ね合いとしてとらえられていないので、オーステナイトはどのような状態にあったかということについてすら不明確である。コントロールドローリングについても $\dot{\epsilon}$ と温度と加工度の組合せた最適条件をいま一度考えてみる必要がある。

BERNSTEIN によると、たとえば0.25% C を含む鋼では、図5・3・5に示すように1,100°C で引張試験するとき、 $\dot{\epsilon} = 0.001 \sim 0.002/\text{sec}$ では硬化よりも再結晶軟化が

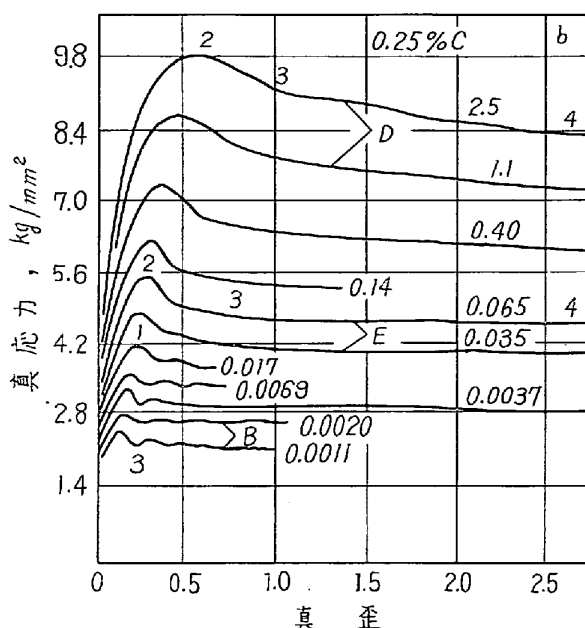


図 5.3.5 1, 100°C で種々なひずみ速度における 0.25%炭素鋼オーステナイトの高温ねじりのときの応力-ひずみ曲線. 数字はひずみ速度. Bではひずみ速度がおそくて再結晶優先. Dでは強く加工硬化して, 再結晶の駆動力が大きくなった後動的再結晶をおこしている. Eでは硬化と軟化のバランスがとれて動的ポリゴンゼーションをおこしている.
(M.L. BERNSTEIN: Steel in the USSR, 2 (1972) No. 2, P. 151)

優先する(曲線B). $\dot{\epsilon} = 0.035 \sim 0.065/\text{sec}$ 程度では(曲線E)真ひずみ0.3付近まで加工硬化し, その後動的回復してさらにひずみが1以上になると動的ポリゴンゼーションをおこす. $\dot{\epsilon}$ が $1/\text{sec}$ 以上でも(曲線D)大きく加工硬化して, 蓄積エネルギーが大きくなった後に動的回復, 動的再結晶をおこしてゆく. 動的ポリゴンゼーションをおこした状態で焼入れしてマルテンサイトを作り, 適当に焼もどすと強靱化にきわめて有効で, 焼もどし温度にもよるが引張強さ $180 \sim 200 \text{ kg/mm}^2$ とした場合, 破壊靱性, 衝撃値がきわめて高く, 疲労, おくれ破壊に強く, 低温脆性もおこしにくい. 切欠感受性もきわめて低い. 彼の現在までに得た最高の性質の組合せは, 引張強さ $240 \sim 250 \text{ kg/mm}^2$, 0.2%耐力 $200 \sim 220 \text{ kg/mm}^2$, 伸び $7 \sim 9\%$, 絞り約 40% , 衝撃値約 6 kg-m/cm^2 , K_{IC} 約 $200 \text{ kg/mm}^{3/2}$ と述べている. 驚くべき性質である. 彼によれば, オースフォームは温度が低くて転位密度が高くなり, 靱性に乏しいといっている.

オーステナイトを加工することは幾つかのきわめて重要な意味をもっている. 特に靱性に関連してはオーステナイト粒の微細化, および粒界に偏析した微量不純物元素の分散作用に注目しなければならない. もちろん強化を望むならば加工硬化した状態を用いればよい. 一般に転位密度を上昇させることは強化にはきわめて有効であるが, 靱性を著しく下げる. 結晶粒やセルの大きさを小

さくすることが強靱化にとって重要な要件である.

次の問題は, 変態によってこれらのオーステナイトの状態がどのようにマルテンサイト, ベイナイト, パーライトにうつがれてゆくかということである. マルテンサイト変態の場合には, 転位にいたるまで大部分がうつがれるが, フェライトやパーライト(拡散変態)では多分不純物元素のあまり偏析していない細かい結晶粒がうつがれるものと思われる.

変態途中の加工はマルテンサイト変態途中と拡散変態途中に分けることができる. 前者は加工誘発変態(5.1.3 (2)(d)参照)による加工硬化を利用して強化するものであるが, 多量に残留オーステナイトを含むので, そのオーステナイトあるいはそのオーステナイトの TRIP 現象によりかなりの延性靱性を保有することができる. この種の処理法はステンレス鋼などの強靱化法として発展の余地を残しているように思われる. 拡散変態途中の加工は十分な研究はなされていないが, コントロールローリングなどの研究結果からすれば, 加工がフェライト生成域に及ぶと, 衝撃遷移温度は上昇して好ましくない. 等温変態加工(アイソフォーム)では転位密度をあまり上げることなしに細かい亜粒界を形成して, 強度をあまり上げないが室温衝撃値を著しく上昇させる. たとえば, En 18 鋼 (0.48% C, 1% Cr) の 600°C アイソフォームでは約 22 kg-m の室温衝撃値を示す. しかし, これらは変態途中で加工したことの原因するのか否かについては明らかではない. 他の原因によるのかもしれない. 特にアイソフォームの場合は変態直前の加工に意味があるのかも知れない.

変態後の加工は必ず焼もどしを必要とし, その強化はひずみ時効硬化である. 加工温度を上げると動的ひずみ時効も考えなければならない. マルテンサイト, ベイナイトないしはフェライト・パーライトの加工硬化はオーステナイトに比して小さいが, ひずみ時効による強化は顕著で, 特にマルテンサイトおよび焼もどし (200°C 以下) マルテンサイトにおいては, きわめて著しく強化する. それと同時に弾性限が上昇する. しかし, それに従って延性, 靱性の低下が著しいので, 普通の構造用材料の強靱化にこれを応用することは困難であろう. もちろん加工度を0.5%程度以下とすると, 時効後0.2%耐力が上昇して, 他の引張性質はあまり害されないというデータもある. 線材では直径が細くなるほど柔軟性をもつので, 普通の材料よりも高強度レベルで使うことができる. ひずみ時効は弾性限を上昇し, 応力のリラクゼーションをおこしにくくするので, 線材にこの種のひずみ時効処理を施す. これをストレッチ・テンパー(stretch temper)といい, さらに 400°C 付近で, わずかな永久変形を与えるホット・ストレッチ処理が特にリラクゼーションに有効であるといわれている. このような動的ひずみ時効はわずかな変形で転位密度を上昇させる最も有効な手段と考えられる.

鉄鋼の超強靱化処理としてオースフォームが最も有効であり, 二次硬化性鋼がこの処理に適しており, 1%オースフォーム当り約 1 kg/mm^2 の強度上昇があり, マトリックス鋼を用いれば引張強さ 320 kg/mm^2 , 0.2%耐力 280 kg/mm^2 , 伸び 8% , 絞り 35% , 硬さ $H_{RC} 65.5$ を得

る。超強靱鋼としては、より強くするよりも、靱性を上げて材料の信頼性を高め、その強さを設計に反映できるようにすることが現在の重要問題であろうと考える。その意味から言っても加工熱処理は今後なお重要な処理法として一層の研究が望まれる (TRIP 鋼については 5・1・3 (2) (d) 参照)。高張力鋼の靱性改善にはコントロールド・ローリングが広く採用されているが、このことについては別項にて詳述されるはずである。線材の強化、特に弾性限の向上とリラクセーション強さの向上にひずみ時効ないしは動的ひずみ時効が採用されており、一層の詳細な研究が待たれている。

5・3・2 表面処理技術

(1) 概 況

本項においては、拡散浸透法、金属溶射法、ほうろう鉄板、合せ板の各分野について述べるが、いずれの分野においても新技術の開発、需要分野の拡大など、その発展はめざましいものがある。

これらの分野の進歩を総括して述べることは困難であるが、共通している点は、表面処理される対象が小物から比較的大きな品物、あるいは構造物までに拡大されてきたこと、おのおのの技術に固有の公害要因を解消するための新技術の登場、量産化、省力化などの製造工程の合理化を目的とした技術の開発が活発に進められたことである。

拡散浸透法の分野では、クロマイジングおよびホウ化処理の進展が特記できよう。

すなわち、クロマイジングについては米国の鉄鋼業を中心に、コイル状のストリップに処理する方法が工業化し、耐食、耐熱用材料として多量生産化方式が採用されてきたが、近年の自動車排ガス規制に伴う新マフラー用材料に適用することを目ざして、Cr の拡散剤を静電気によりストリップ表面に連続的にコーティングする方法など、製造方式の合理化研究も進められている。

ホウ化処理については、耐摩耗性、耐熱性がすぐれていることから、ソ連をはじめ、わが国でも研究が活発に進められ、自動車工業においては、熱間鍛造型をはじめ機械部品などにも一部で実用化が開始された。

拡散浸透処理に対し、化学工業、機械工業などの需要分野から要求される特性はさらに高度のものとなってゆくであろうが、これらの要求に応ずるために既存技術の改良はもとより、チタンの拡散浸透や、B-Al、B-Cr をはじめとする多元系拡散浸透などの新しい浸透技術の研究開発が進められてゆくであろう。

金属溶射の分野では、従来、溶射技術があまり広く普及しなかったが、その理由として品質や試験法の規格化がおくれていたことも一因として挙げられる。しかし、昭和46年に Zn および Al の溶射に関し JIS が制定され、質、量ともに発展する基盤ができあがってきた。

溶射法はこれまで搬線式が主流を占め、フレーム式とアーク式が用いられてきたが、最近になって、プラズマが工業的な超高温熱源として安定して使用できるようになってから、プラズマ溶射法が米国で発達し、ジェットエンジンメーカーなどで実用化されるようになったのをはじめ、Detonation 法や線爆溶射法も開発されて、溶射

方式も多様化してきた。溶射機も高能率化を目ざして改良が進められているが、溶射する対象も防錆を目的として大型構造物に適用するようになった。その代表的な例として、長大橋の防食に採用したことで、関門大橋にも Zn 溶射と塗装からなる防食法が施され、大型構造物の重防食時代の幕開けとなった。

ほうろう鉄板の分野では、国民生活の近代化が進むに

表 5・3・1 最近 10 年間のほうろう鉄器生産量
(単位: T)

年 次 (昭和)	38	39	40	41	42
生 産 量	37,019	47,924	43,110	49,286	65,988
年 次 (昭和)	43	44	45	46	47
生 産 量	82,091	92,495	115,901	123,310	139,995

(鉄鋼二次製品年鑑：鋼材クラブ編)

つれて、日常の生活用器具、用品などにほうろう製品の需要が著しく伸びた。その状況は表 5・3・1 に示すとおりである。

需要分野は日用品、台所用品などの小物の分野から、反応器、蒸留器、攪拌機、酒造タンクなどの大型化学機器、建築用パネル材料などの比重が増大した。特に、ユニット式ほうろう浴槽が公団住宅などに広く採用されるようになってからは、その生産量は飛躍的に増大し、ほうろう製品のうちの主流を占めるようになり、溶射技術と同様に、処理する対象が大型化した典型的な表面処理工業となつてきた。製造技術では、古くから二回掛けほうろうが行なわれてきたが、オープン焼鈍による鋼板の脱炭技術の進歩と、鋼板とほうろう層との密着性を向上させる前処理技術の改善によつて一回掛けが可能となり、その経済性はもとより、機械的変形や衝撃にも強いなどのすぐれた特性を発揮するようになった。

合せ板の分野では、圧延圧着法のほか、爆発圧着法が実用化された。圧延圧着法は古くから行なわれ、主としてステンレスクラッドが生産されてきたが、爆発圧着法では、ほとんどすべての金属についてクラッドをつくることができるほか、圧着強度も強く、製造工程も簡単に少量多品種にも適応できるため、化学機械類や反応容器をはじめ、各方面で広く利用されるようになった。すなわち、その生産量を比率でみると、昭和40年を100とした場合、昭和44年は900、昭和48年には1,200に達した。

以上のように、ここに取り上げた各種の表面処理分野では、今後も過去10年と同じように、需要分野の拡大、需要量の増加という道を歩み続けられると思われるが、これらのプロセスに付随した公害要因を取り除くための新技術の開発には一層のエネルギーが投入され、省力化技術とともに急速な進歩を示すものと期待される。

(2) 拡散浸透法

拡散浸透法は拡散被覆法 (diffusion coating) ともいい、古くはセメンテーション法 (cementation, 浸透法) と称した。これは鉄鋼の表面から他元素を侵入拡散させ、表面層を高合金鋼に変えて表面被覆層を形成する方法であ

表 5.3.2 おもな Al 拡散浸透法

分 類	拡 散 剤	加 熱 炉	加熱温度時間	拡 散 処 理	合金層・Al 量
アルミニウム粉末法	一段法 アルミニウム粉末に塩化アンモンを少量添加	回転レトルト炉 中性ふん囲気	850~950°C 4~6 hr	行 な わ な い	合金層 25~53 μ 約 60% Al
	二段法 同	上	上	一段法の処理を終わったのち、品物を炉より出し、800~1,000°C, 12~48 hr 拡散処理する	合金層 0.6~1.0mm 約 25~30% Al
配合拡散剤法	Fe-Al (50:50) 合金、あるいはフェロアルミニウム粉末に塩化物、弗化物などを少量添加	ケース中に充てん密閉、普通の熱処理炉使用	900~1,000°C 6~24 hr	行 な わ な い	合金層 0.6~1.0mm 約 25~30% Al
気 体 法	塩化アルミニウム・ガス	特殊な反応炉を必要とする	900~1,000°C 数 時 間	行 な わ な い	合金層は一般に薄い。Al 濃度は比較的高い

る。たとえば鉄鋼に Cr の拡散浸透を行なえば、表面層は Fe-Cr 系合金鋼になり、Cr 濃度は表面から内部へゆくにしたがって減少するという特徴がある。

現在、Al, Cr, Zn, Si の拡散浸透が工業的規模で実施されている。Al 拡散浸透は酸素製鋼用ランスパイプに応用され、拡散浸透法を急速に発展させた。Cr 拡散浸透は表面処理鋼板の製造に応用されたが、試作の域を出なかった。しかし Ni 基合金などに適用してタービン翼に応用された。Zn 拡散浸透はその歴史も古く、防錆防食用に適用されたが、近年溶融亜鉛めっきに置き換えられ、わずかに長尺細管あるいは寸法精度が要求される小形鋳物、ボルト・ナット類に応用されている。Si の拡散浸透は古くから着目され、数多くの開発研究もあるが、Si を含む多成分の同時拡散浸透が開発され、鋳鉄用金型に応用され実用化された。これらのほか多くの元素の拡散浸透が試みられたが、いずれも実験的規模であって工業化には問題点を残している。

拡散浸透処理層の特性は、形成された合金層の金属材料学的知見から推察される。したがって拡散させる元素も選定できるが、すべての元素の拡散浸透が可能というわけにゆかない。鉄鋼に対して原子直径 2.04 Å 以下の元素で、固溶体を形成するものは比較的容易である。一方、処理操作のうえからは高温長時間加熱保持する必要がある。素材の鉄鋼材料の熱影響、炉設備および熱経済などの点から、処理温度が 1,100°C 以下でなければ実用化されにくい。

(a) Al 拡散浸透法 おもな処理方法をあげると表 5.3.2 のとおりである。Al 粉末法はカロライジング (calorising) といわれ、おもに米国で発達した。配合拡散剤法には、カロライズというわが国独自の方法があり、今日では Al 拡散や浸透法の主流をなしている。Al 拡散浸透鋼は高温耐酸化性にすぐれているので、熱機関や化学装置に利用されているが、近年ステンレス鋼などの高級材料に対する Al 拡散浸透が研究されている。

(b) Cr 拡散浸透法 クロマイジング (chromising)

といわれている。Chromalloy, Chromollising, Dikrom など商業上の名称もある。現在おもに実施されている方法は粉末バック法である。これは Cr 粉末に Al_2O_3 粉末とハロゲン化物の少量を添加した拡散剤と、被処理物とをケース中に入れて 900~1,000°C に加熱保持する方法である。処理温度で発生したハロゲン化 Cr と Fe との反応によって Cr の侵入拡散が行なわれる。Cr の析出と Cr/Fe 相互拡散とによって、処理層の表面 Cr 濃度および処理層の厚さが決まる。

(c) Zn 拡散浸透法 シェラダイジング (sherardising) ともいう。Zn 粉末と被処理物とを回転ドラム中に入れて密閉し、350~375°C に 3~12hr 加熱する。ボルト・ナット類や寸法精度を問題にする小形鋳物、電線管などの長尺細管に適用されている。

(d) Si 拡散浸透法 シリコナイジング (siliconising)、浸けい法などといわれている。四塩化けい素を利用する気体法、Si 粉末を拡散剤とする粉末バック法が研究開発されたが、工業的に成功していない。Fe-Si 系は耐食とくに耐酸性にすぐれているので Si 拡散浸透が着目されるのであるが、Si の拡散速度と Fe のそれとは差が大であるため、処理層が多孔性となり耐食用に適さない。Fe-Si-Cr 合金粉末拡散剤による多成分の拡散浸透による鋳鉄用金型の製造は実用化された。

(e) その他 B の拡散浸透はボロナイジング (Boronising)、ボライディング (Boriding) あるいは浸ぼう法と称し、ソ連、日本で研究開発が盛んである。ほう化鉄形成による表面硬化に期待し、工具類への応用を試みているが工業化されていない。処理設備、処理層に対する二次的熱処理など問題点が残っている。

(3) 金属溶射法

金属溶射法は、線状、棒状あるいは粉末状の金属を溶融し、物体表面に溶融状微粒子として噴射し、金属被覆あるいは肉盛を施す方法である。この方法は 1900 年頃スイスの Ulrich Schoop により発明され、その後溶射器、装置の開発研究、溶射皮膜や密着機構に関する基礎研究

によって進歩発展してきた。わが国には大正10年に江沢によって導入された。初めは非金属材料に溶射し、表面の金属化による表面美化に用いられたが、今日では、防錆防食、高温酸化防止、機械部品の肉盛補修、表面硬化に用いられるようになった。溶射技術の急速な発展には、ほうろう、プラスチックなどの溶射に関する研究開発、また日本溶射協会の設立（1956年）が貢献している。

JIS規格には、亜鉛（H8300-1971）、アルミニウム（H8301-1971）の溶射規格があり、鋼の肉盛溶射（H8302-1974）も制定された。溶射製品の試験方法としては、亜鉛（H8661-1961）、鉛（H8662-1961）、アルミニウム（H8663-1961）について鋼の肉盛溶射に対してH8664-1974が制定された。さらに亜鉛溶射作業標準 H9300-1971 およびアルミニウムのそれとして H9301-1971 がある。

金属溶射には、(i)金属を溶かす、(ii)溶けた金属を微粒にする、(iii)金属の微粒を噴射するという3過程が必要であって、これらを連続的に操作する溶射器（ガンまたはピストルという）と溶射装置が必要である。溶射器は、金属線（あるいは棒）を用いる溶線式と、金属粉末を用いる粉末式とに大別され、さらに溶融するための熱源により、可燃性ガスを用いるガス溶線式と電気を用いる電気溶線式に分けられる。ガス溶線式は、プロパンまたはアセチレン-酸素の混合ガスを用い、装置が比較的簡単に機動性があり、線の送りも一定で、今日最も多く用いられている。用いられる線径は1~1.5mmφであったが、現在3~5mmφの線も使用できるようになった。電気溶線式は、かつての交流方式に代わりモータージェネレーターを備えた直流式が開発された。このアーク溶線式では溶射される金属が高温で溶解されるため、線の合金成分が燃焼消失するという欠点がある。しかしガス溶線式に比べて経済性、作業能率の点ですぐれているので、今後一そう普及すると思われる。ソ連では高周波誘導加熱による溶線式が実用化されているという。抵抗加熱溶線式は実用化されていない。粉末式は、伸線不可能な金属、セラミックその他プラスチックなどの溶射ができるが、粉末が未溶融状態で噴射されるおそれがある。最近では、自溶合金、サーメット、セラミックなどの高融点材料の溶射に用いられる傾向にある。また、超高温耐熱被覆の要求から、高融点材料を溶射するため、プラズマを利用する溶射装置や線爆発溶射法も開発された。

金属溶射法の特徴は、(i) Sn, Pbのような低融点から Mo や W のような高融点のものまでの金属を被覆でき、(ii)被溶射物体への熱影響がきわめて少なく、(iii)比較的簡単な装置で作業ができ、機動性に富み、大形構造物などの現場加工を可能にすることである。したがって鋼構造物、船舶、車輛、化学装置のほか原子力工業、ロケット、宇宙船その他の機械部品に応用される。

溶射層は、素地上に溶射粒子が扁平に変形し、積み重なって層状の組織となる。そして溶射金属は完全な流動体でなく、液相から固相への結晶化が行なわれず、ピンホールおよび酸化物を含んでいる。溶射被覆の素地に対する密着力は溶射条件によって影響を受けるが、プラストによる前処理が重要である。溶射粒子が物体表面に溶着し、機械的投錨効果（anchor effect）によって、強固

な密着性をうるには、被溶射物体表面が清浄で適当に粗面化され、さらに活性化されていなければならない。このため溶射では一般にプラスト処理を行なう。プラスト材は普通 0.3~3mm 程度のけい砂が用いられるが、高温酸化防止用の Al 溶射被覆のように、溶射後加熱拡散処理によって溶射金属を拡散させる場合には、アルミナをプラスト材に用いないと均一な拡散がえられない。肉盛溶射の場合は単なるプラスト処理では不十分であって、アンダーカットやローレットをかける必要がある。また、0.5μ程度の Mo 溶射を下地のボンディングコートとして溶射し、密着性の改善も行なわれている。

溶射層は多孔質であるので、防錆防食を目的とする場合には封孔処理（sealing）が不可欠である。溶射金属と反応しない新しい封孔剤の研究が望まれている。還元性あるいは中性ふん囲気中で焼なましを行ない、層状組織の結晶化と、拡散による合金層の形成により、被覆層の強度や密着性の改善も行なわれている。また高温酸化防止を目的とする Al 溶射では、適当な封孔処理を施したのち、約 800°C で数分ないし数十分加熱し、Al を素地鋼中に拡散させ密着性の改善をはかっている。溶射被覆の密着性を評価するための試験方法として、種々の方法が提案されているが、それぞれ問題点があり、標準となる試験法が確立されていない。

防錆防食の目的で大形鋼構造物への金属溶射は大正11年以来実施されてきた。これらは、Zn 0.15~0.30mm あるいは Al 0.15~0.25mm, Al 0.10mm+Zn 0.15mm の二重溶射、Zn 0.1~0.2mm + クロメート処理 + れき青塗装などの処理である。わが国で、橋梁の防錆処理として金属溶射と塗装の重防食が用いられたのは皇居二重橋が最初である（昭和38年）。その後各橋梁メーカーおよび塗料メーカーによってこの重防食システムが研究され、関門橋に採用された。この施工条件は亜鉛溶射作業標準 JIS H 9300 (1971) によるもので、ガス式により Zn 皮膜 75~125μ に塗装を重ねたものである。このような塗装と Zn または Al 溶射との併用は、塗料の溶射層への浸透によって、活性化されている多孔質の溶射層が強化され、一方、塗膜の密着性も強化され、これら両者の相乗的防食効果に期待している。

防錆防食のための溶射には Zn あるいは Al が最も多く用いられる。環境によってそれぞれ適不適がある。選択は目下のところ過去の経験による。Al-Zn 合金の溶射も試みられているが、Al-Zn 合金の伸線が技術的にむずかしいので、今日まだ実用化していない。

(4) ほうろう鉄板

低炭素鋼板をオープン焼鈍して、C を 0.005% 以下の極低炭素鋼板にすることができるようになってから、ガス発生に起因するほうろう表面の欠陥が避けられるようになったため、ほうろうの一回掛けの技術が普及し、わが国では11工場、米国では30工場で採用されるようになった。一回掛けほうろう用鋼板には急速酸洗性が要求され、P, Cu などの元素で酸洗速度がコントロールされている。最近では真空脱ガス技術によるほうろう用鋼板の製造が注目されているが、米国の Armco Steel Co. では Cd-Ti 入りの脱炭アルミスタビライズド鋼板を開発中で、深絞り性がすぐれ、焼成後の強度低下も少ないとい

われている。鋼中の微量元素とほうろう特性との関係についても研究が進展し、セメントタイトと泡立ち性、非金属介在物と爪とび性、Mn と Sag 特性などの関係も明らかになってきた。

ほうろうと鋼板との密着機構については XMA や電子顕微鏡の活用により詳細に究明され、鋼板表面のあらさに関係する物理的結合力、ほうろう焼成時に溶解しているガラス質が電解質となり、鋼板表面の成分的に異なる微小部分の間で局部電池を形成し、陽極部分が腐食して微細な凹凸をつくって、ほうろう層と鋼板との間に物理的な結合力を与えると考えられるガルバニック結合力、ほうろうを焼成する際に生成する FeO がほうろう中に溶け込み、境界面に FeO に富んだ密着層が生成すると考える、いわゆる化学結合力などの観点から密着力が説明されている。

ほうろうの爪とび試験方法については、実際にほうろう掛けをする方法と、鋼板の特性、たとえば、水素透過時間を測定する方法に大別される。前者は実用に近いが釉薬の焼成条件に左右され、後者では爪とび推定精度は 50%程度とされている。

ほうろう用の前処理を施した鋼板も出現し、英国の John Summers and Sons Ltd., より酸洗と Ni ディップ処理をした 1 回掛けほうろう用鋼板が発売された。また、西独の Hoesh 社からは電着 Ni 処理を行なった前処理済みの鋼板のほか、ほうろう釉をメタアクリレート・コーポリマーの樹脂とともに焼付けた鋼板を開発した。このほうろう掛け鋼板を需要家で使用する場合は、樹脂分は焼成時に分解して消失し、ほうろう層が完成するものである。最近、特に問題となる労働環境の改善、公害の低減などの見地から、上記のような前処理を施したホウロウ用鋼板の開発は、わが国においても歓迎されるようになるであろう。

また、連続铸造鋼のほうろう特性をみると、酸洗速度が速く、焼成後の鋼板の強度も低下が少ないことから、爪とび特性をはじめとするほうろう特性の改善に向けて、今後、活発な研究が進められよう。

(5) 合せ板

製造法は圧延圧着法と爆発圧着法に大別できる。圧延圧着法はステンレス・クラッド鋼を中心に多量生産に適する方法として発展してきたが、この分野における 10 年間の進歩をふりかえると、爆発圧着法の進出を特記すべきであろう。

爆発圧着法における接合過程のメカニズムについては、接合時に発生する金属ジェットが接合に寄与していることが指摘されてから、接合過程の研究が進展し、そのメカニズムが明らかとなってきた。

すなわち、火薬の爆発力によって生ずる非常に高い圧力によって合せ板が母材に加速された状態で衝突する際に、衝突点の前方に金属ジェットが高速で噴流し、金属板表面の酸化物、窒化物、吸着ガスなどの不純物を除いて新生な金属面が露出し、原子間の直接接合が行なわれるとされている。

この方法によると、圧着時には材料は熱的な影響を受けず、火薬の爆発圧力だけによるため圧着強度は大で、代表的な圧着材の機械的強度を示すと、表 5・3・3 のごとくである。

くである。

表 5・3・3 圧着材の機械的強度
(福山郁生, 工業火薬協会誌 Vol. 30 (1969) No. 4, p. 205)

圧 着 材 料		板厚 合材+	引 張 試 験		
合 材	母材	母材 (mm)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	降伏点 (kg/mm ²)
Cu	SS'' 41	2+14	41.2	29.8	28.3
ネーバル・	SS'' 41	2+14	47.7	31.4	30.4
プラス	SS'' 41	2+12	50.8	36.0	31.4
ハステロイ・C	SS'' 41	6+25	51.3	40.0	37.0
SUS 28	SS'' 41	2+10	39.6	33.0	24.1
Al	SS'' 41				

この爆発法による合せ板は、化学プラント用の反応器やタンク類の内張り、管板、圧力容器、トランジションジョイントなどに使用されるほか、特に電気系統では、Al を Fe または Cu とクラッドした板は、強度もあり、電導性も良好なため、導電材料としてブスバーなどに使用されるようになってきた。

合せ板は需要分野における設計の合理化や高価な特殊材料を節約できるので、省資源・低コスト対策ともなり化学工業をはじめとする装置産業、船舶、その他の工業用材料の分野で一層の発展が期待できよう。

5・3・3 鉄鋼分析法

最近 10 年間に粗鋼生産量は飛躍的に増大し、工程的にも連続铸造技術の導入など大幅な変化がみられ、品質的にも製鋼技術における真空脱ガス技術の導入や各種高張力鋼の生産に代表されるように鋼材品質の高級化が進んでいる。これに伴い鉄鋼分析法も逐次変革を求められており、例えば鉄鋼協会共同研究会の中に鉄鋼分析部会が昭和 35 年に設けられて以来、発光分光分析、蛍光 X 線分析、化学分析、介在物の各分科会において精力的に調査検討が進められてきている。

最近 10 年間における主要な進歩として次の諸点が挙げられよう。1) レードル分析に用いられている発光分光分析において、共存元素効果の補正や装置による分析値の変動の自動較正に計算機の on-line 使用が一般化し、これによつて分析精度が著しく向上し、高速発光装置の使用とあいまって分析所要時間も大幅に短縮された。2) 従来、主としてスラグなどの粉体の分析法として用いられた蛍光 X 線分析は、試料調製時の粒度の影響やマトリックス効果などにより分析精度にやや難点があつたが、湿式微粉碎法や融解法の研究の進展にともない分析精度が向上し適用対象も増大し有力な分析手段となつている。3) 化学分析法では原子吸光法が非常に普及し分析の迅速化に大きく寄与している。また省力化の観点からすすめられている化学分析用装置の自動化も目ざましいものがある。4) 鋼材の高級化に対応して鋼中の炭化物、窒化物などの析出物の状態分析の研究が盛んにすすめられ、その成果が日常の管理分析につぎつぎととり入れられ鋼材の品質向上に大きく寄与している。5) 環境問題に対する関心の高まりにこたえて、公害関連分析技術が開発され

スタッフも充実され貴重な諸情報を提供するに至っている。

上記の観点から、最近の鉄鋼分析法について記してみたい。

(1) 発光分光分析

本法は試料をアークまたはスパーク放電によつて気化励起し、励起された試料の放つ光を分光器によつて分光し、それぞれの波長から定性分析、その強度測定によつて定量分析を行なう方法である。直読式発光分光分析装置は従来から製鋼作業をコントロールする貴重な分析情報を提供してきたが、最近の計算機利用技術の発達によつて分析装置に小型計算機を結合させ、試料の冶金履歴の影響、マトリックス効果、共存元素（例えば鋼中イオウの定量におよぼす炭素）の影響をオンライン・リアルタイム方式で補正し、また分析装置の日間変動を自動較正することがひろくおこなわれ、これによつて分析精度が1桁向上したといつても過言ではないであろう。また高速発光装置が広く用いられ、計算機利用によるデータ処理とともに分析の迅速化に大きく貢献している。ちなみに分析試料受取り後、製鋼現場に分析値を報告するまでの分析所要時間は、この10年間で2 min から40 sec へと大幅に短縮され大型転炉による高能率出鋼および高級鋼吹錬を支える陰の立役者として活躍している。

また分析試料採取方法はその試料の分析精度やその分析値の報告までの所要時間に対して決定的な影響をもっている。炉中分析の場合にはさらに、LD 転炉を傾動するため吹錬中断を余儀なくされている。このような問題点解消のためサブランス方式による自動サンプラーを用いる試料採取をはじめとしローリーポップを用いるレードル試料採取など試料採取方法の検討が進められている。試料調製については全自動装置がひろく用いられ操作の迅速化に寄与しているが、新しい試みとして鋼切りくず、銑鉄片を直流アークまたは高周波加熱で融解し溶融ぼたんを作製して発光分光分析に供する検討も進められている。

今後の研究課題としては、高周波プラズマトーチ法やプラズマジェット法あるいはレーザーを用いる試料の気化および励起方法の実用化が期待される。

(2) 蛍光X線分析

本法は試料に一次X線を照射し、試料から発生する特性X線（蛍光X線）の波長を測定して定性分析し、またその強度を測定して定量分析を行なう方法である。

鉄鋼の蛍光X線分析法は、昭和41年に通則およびステンレス鋼についてJISとして制定され、合金成分のさらに少ない銑鉄、鋳鉄、炭素鋼および低合金鋼についても昭和43年にJISとして制定され蛍光X線の鉄鋼分析への適用範囲は著しく拡大された。鉄鋼の蛍光X線分析では試料群の各成分を広い定量範囲にわたつて1本の検量線で分析することが理想であり、そのための検量補正法として鉄鋼共同研究会では実用的見地から二元系あるいは三元系の鉄合金から各元素相互の補正係数を求め、これにその元素の含有率を乗じて補正計算する方法を提案しJISに制定され（JIS-G 1256, 1973）製銑、製鋼作業での分析法として広く用いられるに至っている。

一方、鉄鉱石、焼結鉱、スラグ、フェロアロイ、耐火

物などの粉体試料を粉末ブリケット法によつて分析する場合、試料粒度や結晶状態の違いにより発生X線強度が変化し分析精度にやや難点があつたが、湿式微粉砕法やホウ酸ナトリウムを用いる融解法の検討が進められ、これらの問題点が解決され高炉装入物の塩基度管理による高炉操業の高位安定に大きく貢献しているのをはじめ酸化物系粉体試料の分析法として主要な位置をしめている。また発光分光分析の場合と同様に計算機を利用した共存元素効果の補正も一般に用いられ分析精度の向上に大きく寄与している。

(3) 化学分析

かつてこの分野で重要な位置をしめていた重量法および容量法にかわつて吸光度分析法がその主流となつていたが、最近では原子吸光分析法が著しく普及してきた。後者は装置性能の向上、試料調製法の検討が進んだこととあいまつて高感度、迅速性、簡易性などの点から適用対象や成分範囲が拡大され精度も向上しており、鉄鉱石についてのJIS採用（JIS-M 8204-1970）に続き、鉄鋼についてもJISに採用（JIS-G 1205-1974）され、今後なお一層ひろく用いられよう（表 5・3・4 参照）。また

表 5・3・4 鉄鋼分析元素の検出限界（ppm）の一例
（遠藤，中原：鉄と鋼，57，（1971），No.14，p.2,286）

元 素	分析線(Å)	検出限界	フ レ ー ム*
Si	2,516.1	0.5	N
Mn	2,794.8	0.01	A
Ni	2,320.0	0.02	A
Cr	3,578.7	0.02	A
	3,593.5	0.02	N
Mo	3,132.6	0.05	N
Cu	3,247.5	0.01	A
V	3,184.0	0.1	N
Co	2,407.3	0.02	A
Ti	3,642.7	0.2	N
Al	3,092.7	0.1	N
As	1,937.0	1.0	A
Sn	2,246.1	0.3	N
Pb	2,833.1	0.08	A
Mg	2,852.1	0.002	A
		0.003	N
Ca	4,226.7	0.02	A
		0.01	N

（条件） 装置：日本 Jarrell Ash AA-1 型

バーナー：(A) 0.7×100 mm スロットの予混合バーナー

(N) 0.5×50 mm スロットの予混合バーナー

検出限界：S/N=2 が得られる元素溶液濃度

* A: Air-C₂H₂ N: N₂O-C₂H₂

最近、炎を用いずシールドセルによる微量金属の分析も試みられ、フレイムレスアトマイザーやレーザー光の応用などの新技術の開発と現場分析への適用が今後期待される。

吸光光度分析法においても鋼中のけい素、りん、ほう素などの分析で発色および吸光度測定を自動化する試みがみられ、鉄鋼試料の溶液化操作の自動化とともに現場分析への適用および適用対象の拡大が期待される。さらにこの分野で発展完成が期待される技術として、将来の理想的分析技術ともいえる溶液中に電極を浸漬して直ちに溶液中の特定元素のイオン濃度を知るイオン電極による測定法があげられる。

鉄鋼中の炭素・いおうの燃焼法による定量法においてもその定量に電導度滴定、電量滴定、あるいは赤外線吸収測定を用いてより正確により迅速に定量できるような装置が提供され、鋼材の性質に重要な影響をおよぼすこれらの元素に関して出鋼量の増加に伴う分析件数の増加をよく支えている。

また製品の高級化に伴って、C, S, N, B, Se, Te, などについて ppm オーダーの微量含有率を正確に定量することが必要とされており、化学分析法がこの期待によく応えている。

(4) 状態分析および表面分析

鋼中介在物、析出物の状態分析については湿式分析と X 線マイクロアナライザーを主として用いる機器によるアプローチがなされている。

前者は介在物分科会における基礎的検討を中心に、よう素メタノール溶解法、くえん酸系中性電解液電解法、非水溶媒電解法、EDTA を用いる電解法、酸溶解法あるいはこれらに超音波振動をかける溶解法などを用いる鋼中介在物、析出物の抽出分離が研究され、また抽出分離残渣に超音波をかけて分散させて粒度別に分離定量する方法、あるいは溶液中に分散させた抽出残渣を細いガラス管の電極部に通しその電流変化で介在物の粒度分布を知る Coulter カウンターによる研究も進められている。

これらの化学平衡論的抽出分離法に対して析出物の種類あるいは粒度による化学反応速度のちがいに着目した冷硝酸溶解法、水素中加熱による鋼中窒素の状態別分析法 (図 5・3・6 参照) などのいわばダイナミック分析の研究も進められている。

これらは単に実験室的研究にとどまらず析出硬化型高張力鋼の炭化物・窒化物の分析に代表されるように高級鋼の開発研究の評価手段として非常に重要な役割を果たし、また深絞り用アルミニウムキルド鋼の sol Al 分析のように生産管理のための必須の技術として現場の分析においてもひろく用いられている。

これらの湿式化学的手段とならんで鉄鋼研究の広い分野において、介在物・析出物の同定や分布状態に関して有益な情報を提供する装置として X 線マイクロアナライザーがあげられよう。この装置は約 $1\mu\text{m}$ まで絞る電子線を試料上に照射し、そこに含まれる元素により発生した特性 X 線を分光結晶によつて波長分析しその強度を測定して定性定量分析をおこなうもので、最近の装置では B, N, O などの軽元素についても分析可能となり酸化物系介在物をはじめとし介在物析出物に関して貴重な知見を提供している。

状態分析の分野は化学的手段と X 線マイクロアナライザーや X 線回折や熱中性子による (n, α) 反応による α -トラック法などの物理的測定を組合せた総合的アプ

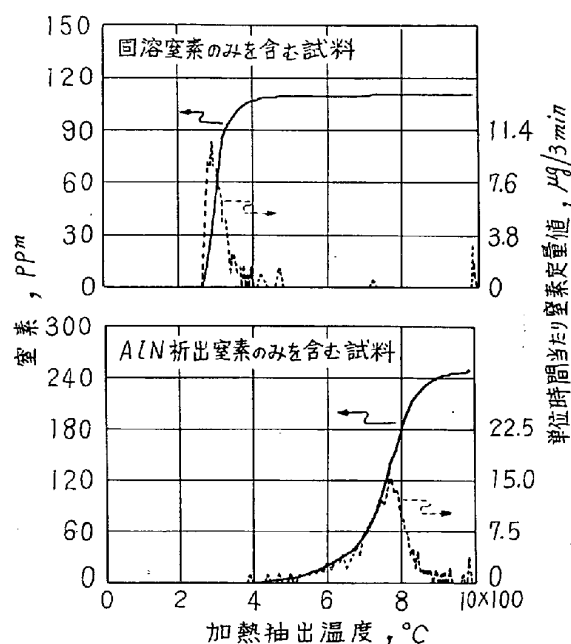


図 5・3・6 水素中加熱抽出法による鋼中窒素の状態分析結果

(川村, 大坪, 森: 鉄と鋼, 60 (1974), No. 1, P. 108)

ローチに移行していきつつあり、例えば溶接材料の示性分析において上述の方法が日常的に用いられ構造解析のための貴重な情報を提供するに至っているが、今後特に発展が期待されるものとしては前述のダイナミック分析の他に、X 線マイクロアナライザー分析において結合原子価により X 線の波長が移動する、いわゆるケミカルシフトが比較的顕著に現われることを利用する状態分析、発光分光分析においてマトリックス中の元素の結合状態によつて発光パルスのエネルギーが異なることを利用する状態分析などがあげられる。

また最近、状態分析に有力な知見を提供するイオン・マイクロプローブ・マス・アナライザー (IMMA) が数台設置された。この装置は約 $2\mu\text{m}$ まで絞ることのできる一次イオンビームによつて試料を衝撃し、発生する二次イオンを質量分析計で定量するもので、スパッタリングによる深さ方向分析など鉄鋼の表面分析への応用や析出物、粒界などの微小部の高感度分析、マイクロアナライザーで従来検出不可能だった元素の分析などに特徴をもち、次の試験分析法で述べられるオージェ分析, ESCA などとともに今後の発展が期待される。

(5) ガス分析その他

鉄鋼中のガス分析については溶鋼の脱ガス装置の導入に伴って、従来より一層低濃度まで精度よく定量することが期待されている。これに対応して、サンプリング法、試料研磨法をはじめとして定量方法についても多くの検討がかさねられ、最近では、酸素、窒素、水素ともに不活性ガス送気融解—ガスクロマトグラフ法あるいは電量滴定法による装置がその簡便性、迅速性からひろく用いられている。また速中性子放射化分析法は製鋼現場での鋼浴中酸素の迅速定量法として脱酸調整などの管理分析用に用いられているが、最近では鋼中の抽出分離残

離残渣や酸化物粉末の分析にも応用されている。

溶鋼中の酸素については固体電解質による酸素濃淡電池を用いる方法が迅速性にとくにすぐれさらに製鋼反応の研究にも有用な情報を提供できるので注目されているが、最近では現場操業に利用する場合の問題点もほぼ解決され製鋼現場への応用の成果が期待されている(図5-3-7 参照)。

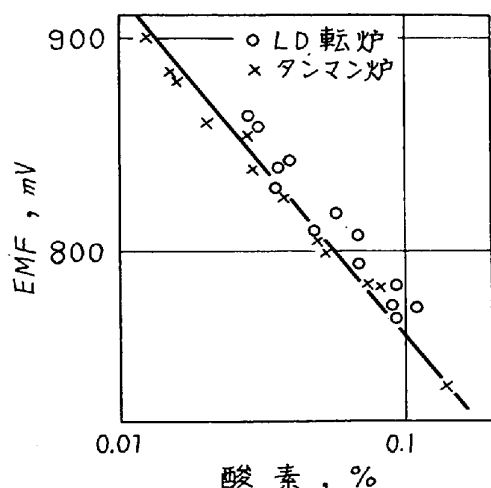


図 5-3-7 LD 炉内鋼浴起電力と酸素量との関係
(井樋田, 河井: 鉄と鋼 58 (1972) P. 1, 477)

一方、最近の環境問題に対する内外の関心の高まりにこたえて「きれいな製鉄所への生まれかわり」を指向して、排水中の各種イオン、浮遊物質の定量、pH 測定や排ガス中の NO_x 、亜硫酸ガスなど有害成分の定量など、この分野での分析が急増しており、平行して一層正確で迅速な分析法の検討も進められている。またたとえば水銀化合物を使用しない鉄鉱石中の Fe 分析法の開発のように分析方法の無公害化についても積極的に研究が進められている。

最後に、以上のべたような鉄鋼分析の各分野における着実な検討の進展を支えるものとして鉄鋼標準試料委員会による広範な標準試料の作成があげられる。

5-3-4 試験検査法

(1) 概況

ここ10年間ににおける試験検査法の分野での進歩はめざましいものがある。これはわが国の経済成長と相まって、構造物の大形化、それにともなう基礎資材としての各種鋼材の開発および製造、そして最近ではとくにエネルギーに関連して、原子力発電、LNG 関係の鋼材とその試験、さらに公害問題と、あらゆる分野で安全性を保証するための試験、検査法が必要となり、その開発、研究が精力的に行なわれてきたためである。

これと平行して、各企業における合理化の努力は、とくに試験、検査法の自動化、省力化を押し進め、さらにコンピューターと直結したデーター処理への努力が続けられている。

試験、検査の自動化の究極の目的は、単に試験室での自動化、無人化にあるのではなく、試験、検査そのもの

を工業プロセスにおける生産のオンラインにとけこませることで、このためには材料試験機あるいは検査装置の自動化と、そこから得られる情報の収集と処理を、コンピューターの応用によつて自動化し、さらにフィードバックまでもつていくという、一貫したシステムとなることが重要で、ある程度の成果の得られている分野もうかがわれる現状といえよう。

鋼材の性質を調べる物理試験としては多くの方法があるが、最も直観性があり信頼がおける方法として早くから用いられている視覚に頼る顕微鏡についても自動定量化が進められている。また電子顕微鏡も、さらに透過電顕、超高圧電顕、あるいは走査型電顕などますます進歩を見たが、従来なおざりにされてきた聴覚(音)を利用する研究手段としてのアコースティック・エミッション(以下 A.E. と記す)技術の芽生えは特筆すべきものであろう。また集合組織解析としての X 線回析法の自動化、コンピューターを用いたデーター処理の進歩によるルーチン化あるいは物理的アプローチによる状態分析法の発展などもあげられる。

機械試験法についてみると、進歩で特徴的な点は、破壊力学の進歩とこれによつて裏付けられた試験が主となつてきたことで、これにはわが国の研究者も大きく寄与していること、試験機の大形化とこれに伴い、環境の効果を調べたり、実際の構造物にかかるような、いわゆる実動荷重の負荷が可能になつたことで、これにより今までより一段と試験の信頼度、すなわち実際構造物の信頼性、安全性が高まつたことである。

一方造船を主体として始まつた溶接は、建築構造物の鋼構造化の普及に伴い、試験、検査の面に大きな影響をおよぼしてきた。すなわち溶接施行技術あるいは使用鋼材の溶接性を評価するための各種の溶接性試験の検討と開発、そして品質保証としての非破壊検査である。

とくに非破壊試験分野についてみると、ここ10年間の発展と普及は目を見張らせるものがあり、とくにここ数年来の、公害および安全性を中心とした社会状況の変化は、非破壊試験の重要性をさらに認識させてきている。

非破壊試験発展の代表的なものの第一は、素材の品質管理の武器としての非破壊試験技術が、鋼材の生産ラインに続々と導入されると同時に、省力化の問題が検査の自動化を急速に推進させたこと、第二は超高層ビルを中心とした大形の溶接鋼構造物の普及が、溶接部の品質管理としての非破壊検査を不可欠のものとしたこと、第三として検査そのものの合理化の一環および全く新しい材料研究の道具としての A.E. 技術の芽生えと普及があげられる。

また新しい技術としては、赤外線やレーザーあるいは液晶を利用した計測、検査が進んでおり今後の発展が期待できる。このほか地味ではあるが、欠陥の検出ということから発展してきた非破壊試験の技術を、引張試験や硬さ試験などの破壊試験の代用として使用しようという材質試験分野の開拓があげられる。また検出された欠陥の有害性をどのように考えていけばよいかという問題についての破壊グループと非破壊グループの情報交換が真剣に論じられる機運になつてきた。

(2) 物理試験法

(a) 介在物、組織の自動映像解析装置

鉄鋼材料などを構成する微細組織あるいは非金属介在物を分類し、定量化することは大変重要な測定手段であるが、また手数のかかる仕事である。これらを高能率・高精度で処理するために、近年テレビの走査技術を巧妙に利用した自動映像解析装置が主として米、英、独などで開発され実用に供されるようになった。

この装置は光学顕微鏡あるいは投影器による組織からの反射あるいは透過光の強弱を映像管（ヴィディコン、プラムビコン）で電気信号の強弱に変え、目的の組織を区別し、デジタル計測する。通常は一視野を十数万点から数十万点に分けて測定する一種のポイントカウント法であり1%以下の測定精度を持つている。基本の測定は被測定組織の数、面積および走査方向への投影長さであり、組織の面積や大きさによつて分類集計することが可能である。これらの基本測定値はさらに別に附属された計算機で二次的にそうとう複雑な計算も行なえるようになっている。

自動映像解析装置は多数視野の連続測定が必要となるため、その間精度を保ちながら迅速に測定できるように種々の附属機構が考えられており、例えば顕微鏡光源むらの補正、視野の自動送り、自動焦点追従機構、また複数因子の同時測定のためのプログラム機構などがある。さらに非金属介在物のB系のように多数の集合を一群として計測する方法も開発されている。また異なつた組織でも微妙な光学的差異しかないものは上の原理では本来区別できないが、形態が違えばそれを利用して区別する方法も最近利用できるようになった。

この装置の利用にあつては、被測定組織を他のそれからできるだけ明確に識別できるようにすることが必要で、そのためには光源、フィルター、映像管の条件あるいは測定因子の選択が問題となるが、さらに重要なことは試料中の組織をできるだけ明確に現出させることである。したがつて試料の研磨、エッチング法など十分注意する必要がある。

最近コンピューターを利用して映像中の被測定因子を修正補遺する画像処理技術が検討されており、これらの手法が今後とり入れられれば測定因子の拡大とさらに高精度、高能率化が期待される。

(b) 電子顕微鏡

鉄鋼材料研究の分野における最近10年間の電子顕微鏡（以下電顕と略す）観察の発展はめざましく、透過電顕観察（直接観察）法の普及、超高圧電顕、走査型電顕（SEM）、あるいは走査型透過電顕（STEM）などの利用により鉄鋼材料の組織に関する知見は著しく深くなつた。

イ) 透過電子顕微鏡観察（直接観察）

鉄鋼材料の直接観察は昭和31年に始まり、1960年代に入つてしだいに普及してきた。わが国においても1960年頃から西山らを中心に炭素鋼、Fe-Ni合金などの直接観察が行なわれている。1960年代後半になると各種鉄鋼組織の観察、変態挙動の解析、合金炭化物の析出挙動の観察、あるいはマルエージ鋼、オースフォーム鋼、TRIP鋼など新しく開発された超高張力鋼の微細組織の直接観察が精力的に行なわれるようになり、今日ではレプリカ

や抽出レプリカ観察の地位を迫越して鉄鋼組織観察の主流になつた感がある。

直接観察法が普及した理由として、薄膜試料作製技術の進歩、電顕の性能の向上、加速電圧の増加、各種付属装置の発達などが挙げられる。初期の頃は薄膜作製のために20mm角、厚さ0.3mm以下の素材を必要としたが、その後技術の進歩にともない引張試験片や衝撃試験片から容易に薄膜を作ることが可能になり、電顕組織と機械的性質の対応づけが正しく行なえるようになった。最近では直径約2mmの線材から薄膜を作ることでもできる。また電解研磨法を適用しえない材料に対してはイオン研磨法を利用するなど観察対象範囲が広がっている。

分解能については10年前でもすでに2Åに達していたが、当時の電顕ではフェライト系鉄鋼材料を挿入すると磁場が乱れるため鮮明な像の得られない場合が多かつた。しかしその後ポールピースが改良され、これらフェライト系鉄鋼材料の観察も容易に行なえるようになった。

加速電圧に関しては1965年頃は100kV級のものが一般に使用される最高電圧であつたが、今日では200kV級電顕が普及型として使用されている。またこの10年間に於ける超高圧電顕の普及もめざましく、現在わが国だけでも500kV以上のものが13台（うち5台は1,000kV以上）が稼動中であり、近い将来さらに数台が稼動する予定である。世界的にも1960年代の後半から1,000kV時代に入つたといえる。なお世界最大の加速電圧を誇るものにフランスおよび大阪大学の3,000kV電顕がある。

超高圧電顕の最大のメリットは透過可能な試料厚みが増加することであり、2,000kVを用いると鉄鋼材料でも約5μまでの厚さの試料が観察可能であると報告されている。これはたんに試料作製が容易になるという利点だけでなく、電顕組織、とくに鏡体内における試料の加熱、冷却、引張りなどによる動的組織変化とバルク材における組織変化を正しく対応づける可能性が生じたことを意味している。さらに、電子線の透過能が大きいことを利用して鏡体内に適当なカプセルを装着し、酸化、腐食など従来直接観察が不可能だつた現象を観察する方法も検討されており、今後の発展が期待される。なおこれらの動的変化の記録にはVTRが広く使用されている。また超高圧電顕では極微小領域（250~500Å）の制限視野回折が可能であり、微細析出物の同定や結晶方位決定に威力を発揮している。さらにもう1つの応用として高エネルギー電子線の照射による格子欠陥の発生および成長過程の連続観察があり、鉄鋼材料でも二、三報告されている。

ロ) 走査型電子顕微鏡（SEM）

走査型電子顕微鏡（SEM）が実用化されたのは昭和40年であるが、その後表面観察のための有力な研究手段として急速に利用されるようになった。SEMは焦点深度が大なるため凹凸のはげしい試料の観察に適しており、鉄鋼材料では破面観察にもつと多く使用されている。また鉄鉱石などの粉末状試料、腐食生成物、高温酸化生成物の観察も行なわれている。最近のSEMには非分散式X線分光器が設置されており、破面あるいは表面の元

素分析ができるようになった。また単結晶表面から得られる擬菊池像を用いて局所変形にともなう結晶方位の変化、再結晶における集合組織の形成過程、結晶粒相互の方位関係の決定などに応用されている。

ハ) 走査型透過電子顕微鏡 (STEM)

昭和43年に CREWE は電界放射型の電子銃を SEM に取付け、非常に微小な電子線束を用いて試料上を走査させながら透過観察する新しいタイプの走査型透過電顕 (STEM) を開発した。STEM とふつうの電顕では結像方式が異なるが、通常の電顕で観察されるものとまったく同様な波動光学像が得られ、分解能も $10 \text{ \AA}$ 以下に達している。また STEM の場合は通常の透過電顕に比べて同じ加速電圧で観察可能な試料厚みが遙かに大きく (6~8 倍)、まわり込みのない直接的な極微小領域 ($\sim 100 \text{ \AA}$) の回折が可能であり、さらに透過した信号を磁気テープに記録させ、画像処理を施すこともできるなど数多くの特徴をもっている。現在すでに 100 kV 級の通常型電顕に組込むだけで走査透過像を撮影することのできる付属装置が市販されており、将来は超高压電顕への組込みも検討されている。なお透過電子線のエネルギー分析により元素分析や状態分析を行なえる可能性もあり、今後の発展が期待される。

(c) X線回折法

X線回折法は集合組織解析、応力測定、相の同定・定量などに広く応用されて、有用な知見をもたらしている。またこの数年間にX線回折装置の自動化、電算機によるデータ処理が著しく進んだため、測定もルーチン化して、広く普及、活用されるようになってきた。

結晶集合組織は深絞り加工用鋼板の重要な材質支配因子として注目され、精力的な研究が進められた。集合組織を測定、表示する手段である正極点図は本来あいまいさをともなうものであり、鋼板の結晶粒方位分布を一義的に示すことができない。このような難点を解消するための方法として三次元結晶方位分布解析法が開発された。この方法は正極点図を数値解析するもので、極点図測定の自動化と組合せて、電算機の有効活用に適している。この解析により鋼板の圧延、焼鈍による集合組織発達に関する理解が深まり、一方材質に対する集合組織の寄与が明らかにされつつある。本解析は部分的な、たとえば反射法のみで測定された正極点図でも行なえるようになってきており、より広い応用が期待される。

X線応力測定法は1930年代から始まっているが、実験室規模の測定から、大型の材料、構造物などの残留応力測定へと発展したのはここ10年のことである。この背景には測定材の形状制約が少なく、セッティングが容易である平行ビーム法の開発があり、その利点を生かしたX線応力測定専用装置がフィールド用にも広く使用されるようになった。その結果熱処理の適否を判定する熱処理管理や、圧延ロールの品質管理など生産現場の検定手段としても使われてきている。一方微視的な結晶格子ひずみ解析ができるX線回折図形解析法は、その対象が従来の粉末試料から実用材料へと拡がり、疲労、クリープ、水素吸蔵などによる材料の変形・破壊過程の観測が行なわれている。また薄鋼板の冷延、焼鈍にともなう結晶格子ひずみの蓄積、解放過程の観測から、再結晶集合組織

形成に関する理解が得られている。

微小焦点X線を用いた回折技術の鉄鋼材料研究への応用はまだ進んでいない。しかしとくに発散X線を用いて得られる擬コッセル像は有用な情報を秘めており、今後その応用の拡がることが期待される。

X線回折法による鋼中の第二相の同定は、抽出技術の進歩、X線発生源の強力化とあいまつて、検出精度が高められた。さらに相同定が容易に行なえるように電算機による検索システムも整備されてきている。

今後のX線回折法の進歩に大きな影響をおよぼすものは半導体検出器であろう。蛍光X線分析にはすでに広く使用されているが、回折法には最近ようやく応用され始めて、残留オーステナイトの定量、逆極点図測定などに使われている。エネルギー分解能のよい半導体検出器は、従来の検出器と異なり、多数の回折線を同時に、迅速に計測できる。このような特徴はX線回折法の新しい活用の道を拓くものとして期待される。

(d) その他

最近著しく進歩し、鉄鋼材料の材質に関する知見を深めるのに役立つ二、三の物理的アプローチによる状態分析法をとりあげる。

イ) オージェ分光法 オージェ効果は古くから知られている現象であるが、最近高性能のエネルギー分析器の実用化とともに、新しい物理分析法として普及してきた。この方法の特徴は固体表面下数原子層の部分と、とくに軽元素について効率よく分析できることである。またイオン衝撃で表面を剥ぎ取りながら表面から内部への成分変動を測定することもできる。このような特徴から材料の表面分析、破断面近傍の薄い偏析層の観測などに適している。真空中で材料を破断させて、その場でオージェ分光分析が行なえる装置も開発されていて、焼もどし脆化にともなう有害元素の粒界への偏析の状態などがわかってきている。

ロ) 電界イオン顕微鏡 (FIM) FIM は簡単な装置でありながら個々の原子像を観察できる特異な方法である。鉄原子は電界内で容易に蒸発してしまうために鮮明な像を従来得がたかったが、結像ガスの調整、像増強法の改良により鉄鋼材料への応用が可能となってきた。結晶粒界構造のような原子的規模での金属組織観察手段としてばかりでなく、FIM 像においては異種原子は輝度の差として検出できるので、鋼材の材質に大きな影響をおよぼすが電子顕微鏡では観察できないような微細な析出物、偏析元素の分布も観察できる。さらにこのようなFIM 像上の異種原子を分析・同定することができるアトム・プローブ FIM も開発されていて、すでに鋼中の析出物、粒界偏析元素の分析に活用されている。

ハ) メスバウア分光法 この方法によれば原子の結合状態を分析することができ、析出相、残留オーステナイトのような残留相の検出、酸化や腐食による生成物の分析などに有効な手段として普及し始めてきた。本法がさらにその活用性を高めるために、反射法の効果的な技術が確立され、反射してくる γ 線だけでなく、X線や電子線からも情報がとれるようになることが期待される。

(3) 機械試験法

(a) ぜい性試験

構造物のぜい性破壊は、第2次大戦で溶接船の例のようなき裂の急速な伝播による破壊が因となつたことは記憶に新しい。しかし精力的な研究の結果、ぜい性破壊の研究は一段落したかに見えたが、近年構造物の大型化、低温タンクの建設などで、ぜい性破壊の問題が再び注目されるようになってきた。鋼構造物のぜい性破壊に対する強度設計は、ぜい性破壊に影響する因子を見つけ、これを定量化し、寸法効果を無くした量を求めることによつてなされるわけであるが、近年破壊力学を使つて、機械試験で得た鋼材の特性値（靱性、強度）と破壊の基点である構造物の構造の不連続部、溶接部、および工作誤差などの影響を考慮した設計がなされるようになってきた。この破壊力学の基礎となる破壊条件は、(1) IRWIN による線形破壊力学で、き裂の先端の応力集中度を表わす K (応力拡大係数)、と K_{Ic} (破壊靱性) の間に $K = K_{Ic}$ 、(2) COTTRELL, WELLS によつて指適されたき裂先端の開口変位 (ϕ) がある限界値 (ϕ_c) になつたとき、すなわち $\phi = \phi_c$ 、および (3) き裂先端での引張応力による塑性域の大きさ (ρ^+) がある限界値 (ρ_c^+) に達するときすなわち $\rho^+ = \rho_c^+$ の三つがおもなものである。以上のパラメーターを求める方法のうちでわが国で開発されたぜい性破壊の発生特性を調べるディープノッチ試験、またき裂の伝播停止の試験としての二重引張試験が有名である。これらの試験で求めた特性値は世界に先がけて鋼板の判定規格として適用されており、さらにこれらをベースとして溶接による材質変化、拘束、残留応力、溶接欠陥、角変形の影響などを含めた特性値の検討が続々となされ、構造物の安全性、信頼性向上に役立っている。80 kg/mm² 級高張力鋼について溶接による角変形付突合せ溶接継手の広幅試験片でマクロな欠陥が溶接部になくとも溶接融合線に沿つて、低応力破壊を生ずることを見出された。これは実際の構造物の溶接継手で生ずる角変形および融合線近傍のぜい化によるぜい性破壊発生特性を調べるために考案されたものである。また溶接金属のわれなどの表面欠陥をモデル化して、非貫通切欠付試験片でぜい性破壊の発生が行なわれた。引続き切欠半径、切欠長さの変化による影響の研究も行なわれた。さらに 80 kg/mm² 級鋼に対する表面切欠からの破壊に対する種々の因子の検討が行なわれ、またマクロな欠陥のない溶接継手についても K_{Ic} 値を精度よく推定できるようになつた。最近これ以前で用いられている K_{Ic} 値が実験によつて演繹したもので物理的な意味付けを行なうために、A. KOBAYASHI による数値解を用いて K をもとめ、これによつて実験結果を整理して K_{Ic} を求め、この値がより妥当な値であるとした報告がでている。

以上のように日本で開発したディープノッチ試験、二重引張試験から発展した一連の試験によつて破壊力学を用いたぜい性破壊特性の検討が、鋼板および実際溶接構造物に精度よく適用でき、世界に先がけて進められた。これに基づいて大型タンク、大型橋梁など近年の工業の発展に大きく寄与している。

(b) 疲れ試験

疲れ試験の近年のおもな傾向は、材料面では高張力化、低温および高温用鋼の開発が進み、これらの母材お

よび溶接継手の疲れ強さ、疲れき裂の伝播特性が問題となつている。特に後者については、“Leak before Failure”の考えで LNG 船などが設計されるようになり、初期欠陥寸法、欠陥と応力の関係など破壊力学的な検討が盛んに行なわれている。

次にこれらの疲れ強さ、き裂の伝播特性に対する単純な規則波による試験から実際構造物に働く、実働荷重を考慮した設計が要求されるものが多くなりつつあることから、プログラムロード、あるいは実働荷重（ランダムロード）の試験が行なわれている。したがつてこのような要望に答える試験機として閉ループの電気油圧式の疲れ試験機が急速に普及してきた。もう一つの傾向は、試験体の大型化、実物試験化（モデル試験化）であり、これについては (e) 項で詳述する。

疲れ強さの問題については、ノルウェーの船級協会の VEDELER が昭和42年に船舶の損傷事故が、ほとんど応力集中部の低サイクル疲労であると発表したこと、原子炉の建設が計画されるようになってから、従来の高サイクル疲労とともに歪制御による低サイクル疲労試験および研究が、中立機関、製鉄メーカー、造船メーカーなどで盛んに行なわれた。また疲れ強さ、また疲れき裂の伝播特性に共通の問題として環境因子の影響を考えた疲れ試験が活発に行なわれている。特に海洋構造物、船舶に係して海水に対する腐食疲れの問題が大きく取上げられ、従来、回転曲げ疲れ試験機を用いて、おもに高繰返し速度で行なわれたデータが多かつたが、実際波浪の周期、軸力の負荷による実際に近い状態で試験が行なわれつつある。

以上のように疲れ試験の分野での近年の発展は、大型化、実物モデル化、および電気油圧試験機の普及によつて、試験荷重のプログラム化および実働化の方向へと高度化しつつある。また LNG などの低温容器、原子炉などの高温容器などの試験温度のコントロール、環境の影響など実際の使用状態に近い状態で試験できるような体制が整えられつつあり、ますます多様化する社会の要望に答えるよう努力が行なわれている。そしてすでにこれらの試験結果が新幹線、原子炉、大型船、クレーン、長大橋、海洋構造物の安全保証に役立っているが、今後さらに進歩させねばならない。

(c) 環境下の試験

おくれ破壊は古くから問題とされているが、近年溶接構造物での低温われと関連して盛んに研究されている。これについては (d) 項で詳述する。また構造物に高張力ボルトが使用されるようになり、JIS でも 13 T (引張強さ 130 kg/mm² 以上) のものまで規定されるようになったが、現在でも 13 T については、成分系、熱処理の面などからおくれ破壊特性の検討が行なわれている。一方学振でも普通鋼から超高張力までにわたつて遅れ破壊の研究を行なつており、おくれ破壊のよい試験法、促進法が見つけられることが期待される。

次に硫化水素によるわれについては、LPG 容器、石油精製装置などでわれが起こり、溶接協会の化学機械研究委員会で 50~80 kg/mm² 級鋼およびその溶接継手について広範な研究が行なわれ、われ発生の限界応力が得られている。

応力腐食われについては、電気化学的および金属学的な研究が行なわれており、後者については設計に有効に役立てるために、破壊力学的に整理しやすい、すなわち K 値の出しやすい形状の試験片を用いて、各種の環境で、最近特に深海艇や海洋構造物用の材料について、海水中で応力腐食われの生じない K 値すなわち K_{ISCC} 値を精力的に求めている。またこのき裂の追跡に A. E. が使用され、モニターとして、研究用として活用されつつある。このようにわれの局所的变化に対応する信号の精密な測定と微視的なわれ挙動の追跡との対応によつて、応力腐食われ現象がより明確になりつつある。

腐食疲れは応力腐食とともに問題になつている。その理由は疲れ強さに対する腐食の効果がいちじるしく、思わぬ事故が起こつたことなどから、海水の例では海洋構造物および船舶などの設計に腐食疲れを考慮せざるをえなくなつたためである。したがつて試験も、実際構造物に働く応力の種類、繰返し速度が採用されている。それは軸力のデーターが少なかつたこと、腐食疲れで荷重繰返し速度を波浪の周期の近くの 10 c.p.m. のデーターがほとんどなかつたためである。これらの試験は鉄鋼メーカーをはじめ中立機関、造船メーカーで着々に行なわれている。造船研究協会第 128 研究部会でいろいろな角度から検討されている。この中で取上げられているものは鋼種、外力、寸法形状、温度、防食、海水の性状などであり、外力としては電気油圧式疲れ試験機を使つて低サイクル疲れ試験から、多段重複荷重によるプログラム試験も行なわれている。以上のように複雑な因子を考慮し、速度効果のため 10 c.p.m. 前後のデーターが要求されるので、試験機も台数を増さないと従来の方式では要求に答えられず、多くの試験片が同時に一台の試験機でできるような工夫もされている。また今後の海洋構造物の係留技術の一環として、チェーンおよびロープの腐食疲れも問題となつているが、係留力の変動を正しく評価することは現状では困難であり、これらの研究とも関連して今後の問題である。また疲れ現象共通の問題である大型化については、他の疲れ試験同様実物あるいはモデルによる試験が行なわれ、実物の信頼性、安全性の向上に役立つているが、今後一層の発展が望まれる分野である。

(d) 溶接性試験

低合金高張力鋼が近年さかんに使用されるようにな

り、わが国で大型橋梁として初めて堺の港大橋に 60～80 kg/mm² 級鋼が使用された。しかしこれには他の試験法とともに溶接性の試験がこれに大きく寄与している。溶接性は大きく分ると溶接われ感受性、切欠じん性、おくれわれ性などに分類されるが、溶接性の代表的なわれ感受性について信頼できる試験法がなく、鉄研式 Y 型拘束われ試験が最も一般的に用いられてきた。しかしこの方法はわれに影響する因子を定量的に捉えておらず、ある構造物では厳し過ぎたり、甘かったり普遍性に欠けている。この点に着目して、引張拘束われ試験（略称、T.R.C. 試験）が開発され、また定標点距離形式拘束われ試験（略称、R.R.C. 試験）が開発された。

TRC 試験は図 5-3-8 に示すように 12 本のボルトでしめつけた 2 枚の突合せ溶接試験片を抵抗線ひずみ計で検力した丸棒軸で引張るようにしたもので、荷重はモーターで定変位速度で引張ることができる装置で、次のことが明らかにされた。限界引張応力以上では、ルートわれはある期間を経てから発生すること、またこのおくれわれは拘束力が問題で拘束時期は限界値に影響しないこと、限界引張応力値は予熱温度の上昇、溶接入熱の増加により上昇し、水素量の増加とともに低下することなどで、これにもとづいて限界引張応力を表わす式も導き、水素量、板の初温と変数として含めた。その他スリット型拘束割れ試験結果との対応性についても検討したものである。

一方ほぼ同時期に、この方法とは異なり、溶接後の冷却中に収縮が起こり、拘束力の増加を生ずることに着目して、定標点距離拘束われ試験法が開発された。これは与えられた溶接入熱、母材の板厚および材料について、拘束距離を変化させた場合に、拘束距離が小さい場合に大きな拘束力が発生してわれる、この拘束距離の大小によつて限界拘束度をしらべ、鋼材および溶接材料の溶接われ感受性を定量的に評価するものである。

以上のわが国で開発された二つの試験は、溶接部で生ずるわれを限界引張応力と限界拘束度の型で定量的に検討しているが、これらの機能をあわせて持ち、さらに高温われの試験も小型試験でできる装置が開発され、市販されている。この装置では熱、応力、ひずみのそれぞれプログラムコントロールできるようになっており、前述の溶接性の試験機として非常にすぐれた機能をもっており、多くの用途に使用されている。

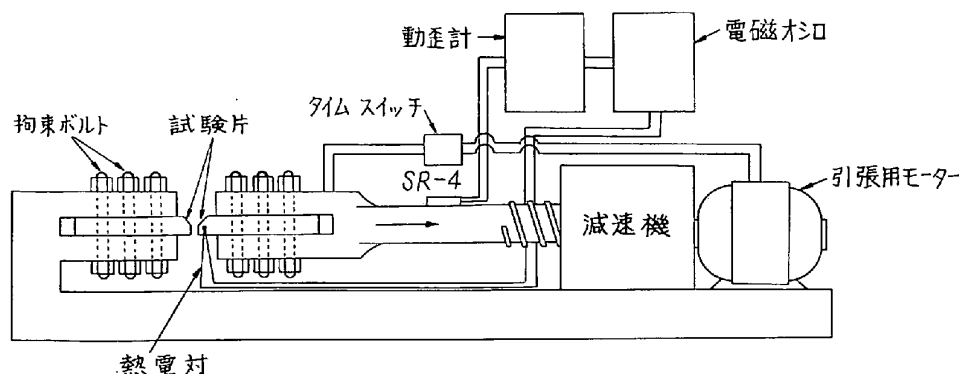


図 5-3-8 引張拘束われ試験機略図

(e) 大型試験

近年の構造物の大型化および高強度化に対して、その構造物の安全性の保証は、小型試験のみでは現時点ではまだ十分とはいえない。現在の技術レベルで考えられる因子を入れて検討したつもりでも、まだ予測できない問題が生じたり、あるいは小さな因子と考えていたものが実物では大きな因子となる場合がある。したがって設計も今までの経験だけでは大型化に対処できなくなっている。もちろん新しい用途のものの設計も考えると、使用状態に近い規模の構造物および部材で試験することが最も近道である場合がある。しかし経済的にはモデルの作成、試験機の大型化など問題があり、今後の努力によつて、小型との相関がつけられ、一方有限要素法などの理論値の精度の一層の向上によつて、将来は大型試験は非常に限定された試験にのみとどめなければならない。以下に近年日本で行なわれている大型試験の代表的と思われる幾つかの例を記した。

イ) 横型引張試験機

鋼板のぜい性破壊特性の試験に使用されてきたテストリグは、10年前の 2,000 t 台から最近の A 社の 5,000 t, B 社の 8,000 t と飛躍的に大型化し、チェコの 8,000 t と並んで世界のトップに立つに至った。さらにこれらの大型機は 300~600 mm と大きな変形の試験、繰返し応力の負荷ができるように設計されたところが特徴である。したがってこれらの試験機は単に超厚鋼板のぜい性破壊試験のみならず、構造部材の種々の試験にも活躍することになった。

ロ) 縦型の試験機

横型と同様に縦型の試験機も 200~500 t 級から最近の 1,000 t 級のものが製鉄メーカーおよび建設業者で相継いで建設され、建設省土木研究所では 3,000 t のものが設置中であり、さらに昭和43年には、鋼構造試験センター設立計画の一環として 5,000 t の試験機が計画された。この目的は、圧縮部材の座屈、圧縮テスト、桁の曲げ、溶接継手、超厚板、ワイヤストランドの引張り、各種構造物の塑性域での試験および破壊テストおよび地震時の構造物の性状を明らかにすることで、やはり繰返し荷重やプログラム荷重による試験ができるようになっていく。

ハ) パイプの大型試験

近年ソ連、米国、カナダ、英国などで天然ガスが多量に発見され、この運搬に高圧ガスラインパイプがさかんに使われつつある。これらのパイプは特別な不安定延性破壊が起こることがわかり、米国および英国などで実管テストが行なわれているが、実験室的に再現することは困難とされていた。しかし曲率のついたディープノッチ試験片で不安定延性破壊を再現させる方法が見出され、不安定延性破壊の発生、伝播と材料特性との関連をつけ、設計、使用上に非常に役立つ。

ニ) 厚肉円筒および容器の静的および動的試験

厚肉円筒の内圧疲れによる事故、ASME の規程の適用されたタンクのき裂の発生などから各国で、この種の試験がかなり行なわれている。わが国でも公立研究所を始め製鉄メーカーおよび加工業者でさかんに行なわれている。最近 C 社では世界で最大級の超厚板を使つたタンク(内径 1,500, 長さ 5,000, 板厚 150 mm) による静的お

よび内圧疲れ試験がなされようとしている。この試験はノズルコーナ部、溶接線に沿つた部分などに人工切欠をつけ、疲れき裂の伝播挙動と設計上有効な破壊力学の特性値との関連、理論値(有限要素法による)との関連、き裂の進展に対する超音波および A.E. の適用など、設計のみならず安全性保証のためのモニターの面でも重要な検討が行なわれる。

また地震国であるわが国では、昭和47年より科学技術庁の国立防災科学技術センターにおいて、内容積 15 m³ の球形タンクによる耐震実験が進められており、高張力鋼を用いた球殻板と支柱およびその溶接部の検討が進められている。このようにタンクについても鋼材、溶接性を含めた構造物としての総合的な検討がなされている。

その他揚水発電の大容量の水車ケーシングに 80 kg/mm² 級鋼を適用するために実物の 1/4 モデルケーシングを用い水圧による内圧疲れ試験を行ない、安全性を確認するとともに、小型試験とよく対応つけられることを見出した報告もある。

ホ) 船体構造部材

船体は波浪、積荷、振動などによる複雑な変動応力を受け、溶接部や応力集中部にき裂の生ずることがある。これがぜい性破壊に連なるとして、その対策が問題となり、小型試験と並行して船体局部モデル(コーナーモデル)の研究が盛んである。線型破壊力学の立場から疲れき裂の伝播をコーナーモデルで調べられ、荷重も重複荷重、荷重順序の影響まで検討し、PARIS らの伝播式が適用できること、実働荷重の研究の必要性などを記した報告がある。また、船舶技術研究所での船体強度の静的および動的試験設備は世界的なものである。

ヘ) 海洋構造物

海洋開発は原子力開発とともに、わが国を始め世界各国で注目されてきたが、独特の構造であるほかに、海水の環境で波浪による疲れの問題があることから、幾つかの事故も起こり、研究がさかんになつている。これらの研究にもとづいて海洋鋼構造物設計指針(案)が土木学会から出された。この試験としておもなものはパイプ構造での格点部の静的および動的な研究で、今後の設計に大いに参考になると考えられる。しかしこの研究も海水の効果を含めたものでなく、この影響を考慮したパイプの研究はまだ緒についたばかりであるが、この分野でも今後なお一層研究を進めねばならない。

(4) 非破壊試験法

(a) 探傷の自動化

非破壊試験の種類と方法はかなりの数があげられるが、鉄鋼について現在利用されているものを大別すると、放射線(X線, RI), 超音波, 電磁気(磁粉探傷, 渦流)の3つにわけられる。そしてそれぞれについての進歩があげられるが、その主体はやはりいずれの場合も自動化にある。しかしながら自動化は、同じ方法を用いても検査の対象物によつてかなり異なつたものとなつてくる。そこで対象物にわけて記すと。

イ) 厚板

厚板の品質保証として超音波が有用であることが認められ、昭和35年頃に製品についての統一的な探傷基準が取り決められたが、ここでは板を 30 cm 間隔の基盤目と

してけがき、その交点をそれぞれ手で探傷するという、莫大な手間を要する方式であつた。そして自動化に対して、1, 2のところで実験的な検討が進められていたが、わが国の取組み方は諸外国に比して遅れていた。当時西ドイツでは2社が厚板のオンライン自動探傷装置を発表しており、一部の鋼板工場の導入計画をきつかけとして、昭和40年に日本学術振興会製鋼第19委員会超音波探傷法協議会において、厚板の超音波探傷の自動化に関する共同研究の提案が行なわれた。これに対し鉄鋼メーカー7社、装置メーカー4社、中立委員7名が参加して共同実験が開始され、友好のうちに大規模かつ綿密な成果が短時日で挙げられたことは、この種の経験のないわが国では特筆に値しよう。そしてこの成果をベースとして、厚板の自動探傷装置が国内の数ラインに導入され、輸入装置は一基にとどまつたことは、その成果の大きかつたことを示す証拠でもあろう。

この方式は、超音波を直径約10mmの水ジェットを介して鋼板に伝播させ、対向側で同じく水ジェットで受信して探傷して行なう非接触のパルス透過法で、必要とする探傷間隔だけこのペアーを並べ、予備冷却を行なうことによつて300°Cまでの鋼板を、最大60m/minの速度で探傷できるものである。

そしてこれは、一応、オンラインでの品質管理を目的とした装置であるが、同時に製品検査の合理化としての検討も続けられた。すなわち従来の交点探傷を線探傷、さらには全面探傷も可能としたもので、精密探傷あるいはオフライン探傷装置と呼ばれている。このためには従来のパルス反射一探触子の点探傷を基とした探傷基準の考え方自体を変える必要が生じ、超音波探傷規格の改訂あるいは新規格制定の努力も続けられ成果をみた。

精密探傷での技術的問題について述べると、鋼板の高張力化に伴つて板厚が薄肉化してくるのに対し、一探触子法では近距離分解能が悪く、10数mm以上でないと安定して使用できなかったものを、6mm厚以上から使用できる2分割探触子が開発されたことである。そしてこの探触子を複数個組合せ配置して、板周辺あるいは溶接開先予定線となるようなところは密に探傷できる機構にするなど、各社の実情に応じた自動化の装置が開発され稼働している。

ロ) 中、薄板

中、薄板については、厚板のように購入仕様書の中に超音波探傷の規定もなく、また探傷自体も従来のパルス反射縦波法では不可能で、新しい技術としての板波法を採用しなければならないこともあつて、ごく一部を除き10年前頃のわが国鉄鋼界では放置状態にあつたといつてよい。しかし昭和35年に東京で開催された第3回国際NDT会議において、ドイツでの板波探傷実用の状況が明確になつたのを機会に、板波探傷法を研究するグループが、日本非破壊検査協会の中に結成され、活動を開始した。一方、国内状況としても薄板を大量に使用する自動車工業においては、プレス成品の品質要求が厳しくなり、その対策として鋼板メーカーも超音波探傷を真剣に考えざるをえなくなつてきた。そして昭和40年頃、高速度で移動する冷延板への探触子の接触機構に、アメリカで開発されたタイヤ探触子を利用して行なうことに成功

し、オンライン探傷の道を開いた。その後この方式は探傷を必要とするわが国のほとんどすべての冷延、熱延工場に導入され、その設置台数は数10台にも達し、完全に諸外国を凌駕した現状にある。すなわち設置場所は各所の実情に応じ、シャー、スリッタ、リコイラーラインあるいは酸洗の出側、入側などさまざまで、探傷速度は最高400m/min、板厚範囲は0.5~6.3mmである。また、遠隔操作による入射角度の変換、記録表示の方式などにいろいろと工夫がこらされている。

しかしながら板波の本質がまだ解明されてはおらず、設置はしてみたが問題点も多いという現状にある。すなわち「最適の探傷条件(探傷モードおよび感度設定)とは何か、そして板厚ごとに何を基準にして決めればよいか」という基本、あるいは得られた欠陥エコーの有害性が明確にできないことである。これに対して諸外国では、同時に多くのモードを出して探傷する周波数変調方式や音響レンズを用いる方法、さらに20数mmまでを板波で探傷する方式など研究が進められているので、さらに一步を進めるためには、新たな観点にたつた研究開発が望まれる。

つぎに、薄板の自動探傷の進展として、表面疵の検査があげられる。とくに外観を重視される冷延板については、各所とも検査員の肉眼を頼りに進められてきたが、この分野でも省力化、自動化の研究が進められ、一部の工場には光の反射を利用した装置が導入されているが、パターン認識は自動化の中で最も困難なものの一つであり、どこまでを肉眼検査とおきかえてよいかの割り切り方の問題であらう。

ハ) 管

鋼管の非破壊検査は、早くからAPI(アメリカ石油協会)の仕様書が整備され、これに準拠して製造されることが多いため、鋼素材の中でも最も発達した分野で、X線、超音波、渦流、磁粉探傷と、ほとんどすべての技術が導入されている。そして鋼管は、その製管方法(シームレス、高周波、スパイラル、UO)と、管径および肉厚によつて探傷方式がかなり異なつてくる。とくに超音波探傷では、非常に多くの方法と装置が開発され稼働している。溶接管は溶接部のみを探傷することが多いが、シームレス管など全面探傷を行なう必要があるものは、複数個のプロブを収納したケースを高速で回転させるか、管を回転させる方法で、超音波では水柱ジェットなどによるカップリング方式がとられている。超音波探傷でとくに重要なカップリング方式として一般には、管の一部を水につける方法、プロブ近辺のみを囲んで行なう方法、シューを用いる方法などがとられている。最近の装置ではカップリング状況を自動的にチェックできる機構や、感度変化を自動的に補正する回路が組込まれるなど、日進月歩の状況である。ただ大径管の分野では、ほとんどがドイツから輸入の探傷機器と機構に頼っているのが現状である。

ニ) 条鋼

中間製品としてのビレットの品質管理は重要な問題であり、このためいろいろな方法が検討され一部では実用化されている。すなわち表面欠陥検出としての渦流法、磁粉探傷の問題である判定の自動化について、録音テー

プを利用して記録判別するマグネトグラフィー法 (録磁法), インディケーションを直接光電管で読取り判定する方法, あるいは漏洩磁束を半導体で検出判別する装置などが開発され, 内部欠陥検出には超音波探傷装置が利用されている。

なお, 中間製品の非破壊試験では, 温度の問題が重要であり, 渦流探傷については線材, 管など熱間探傷が実用化され, 超音波探傷では非接触で超音波を試験材に伝播させる方法が検討されているが, まだ実用化までに至っておらず, 今後の発展が最も望まれる分野である。

(b) 溶接部の探傷

造船業においては比較的早くから溶接が使用されてきたが, 今日見られるように一般化したのは, 需要の多い建築構造物, とくに超高層ビルへの溶接構造の採用が盛んになったことが大きな要因と思われる。そしてとくに溶接部の品質保証としての超音波探傷の普及と発展はここに負うところが大きい。すなわち, 従来の溶接部の非破壊検査は, もつぱら放射線に頼ってきたが, 高層建築でみられる極厚鋼のすみ肉溶接部を放射線で管理することは, 技術的および環境の上から不可能となってきた。また放射線は溶接欠陥として強度上, 最も悪い影響を与えるわれや, 溶込不足に対しての欠陥検出能が劣るのに対し, 超音波はこれらの欠陥に強いこともあり, 建築構造物を対象とした超音波探傷基準がいち早く決められた。他方造船業においても, 欠陥船や沈没などの事故

の発生もあり, 検査の合理化の上からX線を超音波に切りかえあるいは併用していく方向に進んできている。この動きは, わが国でもしだいに普及しつつあるパイプラインについても同じく, 超音波が真剣に考えられる状況になつてきた。しかしながら超音波探傷の大きな問題点として, 現状では結果の信頼性がうすいという問題がある。これは結果が探傷技術者の経験と技倆に左右され, 客観的な記録が得られがたいからで, その対策としては自動探傷記録装置の開発が不可欠である。ただ試験対象物の変動 (板厚, 開先形状, 溶接法など) が非常に大きい溶接構造物で, どの程度まで実現しうるかは今後の大きな問題であろう。しかし, 溶接が比較的一定している造船所の大きな板継手に対しては, すでにオンライン化しているところもあり, またパイプラインの現場円周継手あるいは建築構造の一部への適用など, 解決への大きな努力がはらわれている。

なお, 放射線の分野でも自動化は進んでおり, たとえばパイプライン現場での自走式検査機あるいは製管工場でのX線透視法の普及, さらに新しい技術としてのフィルム自動判別法の開発などがあげられる。

(c) アコースティック・エミッション法

金属, 非金属を問わず, 物が破壊するときにはいわゆる音が聞こえる (可聴周波数 30Hz~20kHz) ことは, 日常の経験として誰もが知っていることであつた。この現象を材料の研究に利用しようという試みが報告されたの

5.3.5 Acoustic emission法の適用の現状および分類

A. 塑性変形

- 1) 試験片が受けた荷重の判定
- 2) 弾性限と Piobert-Lüders 帯
- 3) 転位の機構
- 4) 変形挙動との関係 (応力-ひずみ曲線との関係)

- 5) バウシinger効果
- 6) 複合材料 (非金属)
- 7) 接着の良否判定

B. 破壊力学

- 1) 割れの成長速度
- 2) 疲れ試験
- 3) K_{Ic} (応力拡大係数) との関係
- 4) 水素脆化 (おくれ破壊試験など)
- 5) 応力腐食
- 6) 放射線脆化

D. 溶接試験およびモニター

- 1) 溶接割れの検出および評価
- 2) スポット溶接のナゲット径, ビード形状の解析
- 3) 溶接技量の検定

E. 耐力試験

- 1) ロケット, ミサイルケース試験のモニター
- 2) 水圧試験 (圧力容器, パイプライン) での欠陥検出
- 3) 核リアクターの保守検査

F. 構造物試験

- 1) 航空機および航空機部品
- 2) 橋 梁
- 3) 建 築
- 4) ケーブルの破断予知 (ワイヤー切断の検出)

G. 冶金研究 (材料の評価)

- 1) 相変態 (マルテンサイト変態)
- 2) 熱 分 析
- 3) 鋼の組織との関係 (材質の差などとの関係)
- 4) 時効現象
- 5) 板の絞り加工

H. 地震学, 地質学

- 1) 岩石の圧縮試験
- 2) コンクリート
- 3) 地下ガス貯蔵タンク

I. そ の 他

- 1) セラミックスの割れのモニター
- 2) 陽極酸化被膜の厚み測定
- 3) めつきの管理
- 4) 衝撃荷重の測定
- 5) 工作工具の摩耗管理
- 6) 軸受の初期割れの検出と管理
- 7) 製鋼転炉作業でのスラグ形成時期の判定
- 8) 溶接アーク現象の解析

Sonic Signature
Analysis

は、昭和25年の初め頃ドイツにおいてであつた。しかしこの利用が真剣に取上げられたのは、昭和35年初頭のアメリカにおける宇宙開発に関連した、ロケットモータケースの耐圧試験時の不測の事故を未然に防ぐ方法としての検討であつた。そしてわが国でこの方法が一般に注目されてきたのは、昭和45年に入ってからと極めて新しい。

固体が変形する過程で解放されるエネルギーによつて、弾性波または応力波を発生する現象を acoustic emission (以下 AE と記す、訳せば音響放射となるが、原語を使用することが一応決められている。なお stress wave を使用するグループもある) と呼び、これを適当な検出端(センサー)とアンプを用いることによつて取出して解析する方法を AE 法または AE 技術と定義している。

AE 法の特色は、従来の非破壊試験法がすでに発生、形成されてしまつた欠陥の有無を検出したり、材質試験に使用したりするのは本質的に異なつた、いわば動的非破壊試験法とも称すべき、全く新しい技術であるということにある。そしてこの方法は、小は試験片による実験室的な研究から、大は圧力容器のような大形構造での、また金属非金属の別なく使用でき、欠陥の発生や伝

播の状況、そしてその発生位置までを、リアルタイムに測定できるなど、従来の非破壊試験法では不可能であつたことを可能にした。したがつてこの技術が確立されれば、たとえば圧力容器のように安全性が重視されるものの、従来の検査法が素材の検査から始まつて、最終製品の溶接線全線にわたつて放射線あるいは超音波、さらに磁粉、浸透探傷など多くの手間と時間、したがつて莫大な検査費を費しているのを、耐圧試験時にこの AE 法を併用すると、AE を発するような疑わしい場所のみを重点的に従来の方法で調べることによつて、検査の合理化が期待できるという可能性がでてきたことである。

かなり遅れて出発したわが国の AE 研究も、ここ1、2年で進展目覚しく、すでに32チャンネルの大型システムが完成され、圧力容器の水圧テストに併用されてデータが集積されつつある。

上述したように、AE 法は極めて広い分野にわたつて利用が可能であり、すでに報告されたものを分類してみると表5・3・5のように整理でき、まだ解決すべき多くの問題点が残されてはいるが、今後ますます適用分野が広がることが期待できる。