ねばい材料を得るための方法

須 藤 一*

強 さ と も ろ さ

金属は針金にも箔にも加工することができる。あめや粘土も容易に変形させることができる。しかし後者が非晶質であるのに対して、金属はこれを構成している原子が整然と配列した結晶体であるから、両者の変形のメカニズムは全く異なっている。岩塩などの非金属鉱物も結晶体であるが、これらは延性を示さない。すなわち、金属では原子配列の密な特定の面で非常にすべりやすい性質があって、これが金属の代表的な特徴である延性の原因となっている。

冷間加工、合金元素の添加、焼入れや時効などの熱処理によって金属は強くなる。強さとは変形に対する抵抗力のことである。金属がいろいろの手段によって強くなるのは、前述の特定の結晶面がゆがんだり、大きさの異なる原子や、硬い析出物がばらまかれたりして、原子面のすべりが困難になったからである。このようにすべての強化手段は原子面がすべりやすいという金属の本性に逆らうものであるから、強くするほどにもろくなることは一般的には避けられないことである。しかしながら、(強さ) × (延性) = (ねばさ)は、強化の手段によって大いに異なる。技術文明発展の舞台で金属材料技術者の活躍がもっとも期待される場面の1つは、よりねばい材料を得るための手段を見

出していくところである。その際の1つの粗筋として愚見を述べさせていただく。

弱点をいやし、ストレスの集中を避ける

体を鍛える際に弱点にストレスが集中しないように注意しなければならない。単純明快なこの原則を材料にあてはめてみよう。

鋼の熱処理の意味

焼ならした構造用鋼は(硬くてもろいパーライト)と(弱くて延性のあるフェライト)の粗い混合

図1 もろいパーライト・フェライト複合材の性質。

* 東北大学教授；工学部金属材料工学科
Toward Improved Toughness ; Hajime Suto (Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai)
1976年11月8日受理

組織の鋼である。図1 (a)は両相が直列に並んで応力を受けた状態を示すが、このときの強度はフェライトのそれにほぼ等しい。(b)は両相が並列の場合で、その伸びはもろいパーライトによって決ってしまう。実際の鋼は(a)と(b)の両方を含むが、外力を受けるとそれぞれの弱点にストレスが集中して、ねばさが十分上らない。一般に組織の粗い混合組織合金のねばさは構成相のねばさの算術平均よりも低下する。このことは近年脚光をあびている複合材料を考える場合に重要なことである。これに対して焼入れ焼もどし材はフェライト基地に粒状の Fe_3C が均一にばらまかれているから、材料全体が一樣に力を受け、一樣に変形してねばい挙動を示す。

結晶粒を細かくしよう

原子密度の高い結晶面に大きな引張り力がかかると、この面でへき開破壊が起ることがある。多結晶体に外力 σ が加かったとき、粒径 d のある結晶粒内にへき開割れが起ったとする。この割れの先端の曲率半径を ρ とすると、割れ先端には $\sigma\sqrt{d/\rho}$ 程度のストレスの集中が起る。すなわち、結晶粒径が大きいほど割れは拡大しやすい。すべり変形の場合も同様で、方位がそれぞれ異なる結晶粒を単位にすべりが起り、結晶粒界には $\sqrt{d}$ に比例するストレスの集中が起る。これは強さと延性の低下をまねく。図2⁽¹⁾は Ni·Cr·Mo 鋼の降伏

点、伸びと組織の関係を示す。パーライトやベイナイトを含む鋼では旧オーステナイト結晶粒径を微細化することによって降伏点も伸びも上昇する。焼入れ焼もどし材はもともと均一微細な組織でねばい材料であるから、細粒化によって伸びはあまり変わらないけれども、降伏点は上昇し、強靱となる。

しかし、このような焼もどし鋼を 773 K (500°C) 付近で再度焼もどしたときに起る焼もどし脆性 (P などの不純物が粒界に集まり、粒界にストレスがかかると粒界で割れる) に対しては図3⁽²⁾に示すように細粒化は効果を示す。高張力鋼などでは、衝撃遷移温度 (νT_s) は粒径 d (mm) とともに $-20 d^{-1/2}$ (K) の割合で低下する。

図3 Ni·Cr 鋼 (0.3 C, 3 Ni, 1 Cr, 0.03 P) の
衝撃遷移温度と結晶粒径の関係。(船越, 他)

図2 Ni·Cr·Mo 鋼のオーステナイト粒径と
降伏点、伸びの関係。(Grange)

少量の第2相を微細に分散させること

剛性率 G , すべり方向の原子間距離 b の基地に硬い粒子を間隔 λ でばらまくと、その降伏点は大體 Gb/λ だけ上昇する。一方図4⁽³⁾のごとく、材料の延性は第2相の体積率にほぼ逆比例して減少する。この傾向は基地とのなじみの悪い非金属介在物で著しい。したがって強靱化のためにはなるべく基地とよくなじむ少量の第2相をできるだけ微細にばらまくと非金属介在物を極力減らすことである。

固溶強化だけで材料を強くする方法はどうであろう。この場合すべり面に強固な障害物がないか

図4 鉄の延性に及ぼす第2相の影響。
(Pickering)

ら、降伏点以上の応力がかかるとすべりは一挙に結晶粒界まで進んでここに大きなストレスが集中する。したがって固溶強化だけであまり硬くした合金はもろくなる。

図5⁽⁴⁾はAl-1.5%Si合金の例であるが、453 K (180°C) と 473 K (220°C) で時効したときの性質を較べてみると強度が等しく、延性は前者の方が優れている。このことは、前者は時効析出がまだ不十分のため、Siの一部は固溶して、残部のSiが微細に析出している。このように、固溶強化と析出強化を複合して使用することは大変意味がある⁽⁴⁾。

多数の核を微細に発生させるには基地と析出物

図5 Al-1.5%Si合金の時効による引張り強さ、
伸びの変化：3.6 ks (1 hr) 時効。(須藤)

の原子面が連続している（整合）ことが好都合である。整合析出物にはストレスが集中する界面がないから延性を損わないように思われる。しかしこのような合金では、固溶体合金の場合と同様に過大応力がかかるとすべりは一挙に粒界まで進み、材料を破壊に導く。たとえばFe-30%Cr合金は748K (475°C) で時効するとFe側固溶体とCr側固溶体に分解するが、両相は全く整合である。そして脆化する(475°C脆性)⁽⁴⁾。

図6⁽⁵⁾は12%Ni-6%Mn鋼マルテンサイトの時効に伴う性質の変化を示す。この場合NiMn整合相の析出により硬化されるが、粒界で脆性破壊が起る。粒界にMn, Niがとくに富化されることが粒界破壊に役買っている⁽⁶⁾⁽⁷⁾かも知れないが、粒内のNiMnがすべり切られないように20 nm (200 Å)以上に大きくして、つまり過時効によりすべりが粒界まで一挙に走らないようにして靱性を得ることができる。

粒界は原子配列が乱れているので、エネルギーが高い。このために析出核が粒内よりも粒界に発生しやすい。かくして粗大な粒界析出物が形成されると、粒界であるためのストレスの集中と異相が存在するためのストレスの集中が重なって材料はもろくなる。粒界近傍の溶質原子が集合して粗

図6 12%Ni-6%Mn鋼マルテンサイトの時効
に伴う機械的性質の変化。(田中, 他)

大な粒界析出物を形成するのに伴って、無析出帯 (PFZ) が粒界のまわりにできることが多い。このような軟質相が粒界のストレスを緩和して靱性の向上に役立つであろうか。工具鋼や極低温の衝撃試験で鋼がへき開破壊をするような非常にもろい破壊の場合は、延性に富む微細な残留オーステナイトによってき裂の先端が鈍化して脆性き裂の伝ばがここで止められる場合はある。しかし延性材料においてはき裂の先端はもともと鋭くはないので、このような効果は期待できない。

たとえば過時効状態のマルエージング鋼は粒界にオーステナイトが存在するけれども、これは靱性に役立たない⁽⁸⁾。これに関して TiC などの粒界析出が起るためとする考えもある。ともかく粒界析出物と PFZ が共存する場合は粒界に限定された小さな伸びを含む粒界破壊が起る⁽⁹⁾。図 7⁽¹⁰⁾はこのような粒界延性破壊を起す Al-6% Zn-1.5% Mg 合金が、時効前の冷間加工により、析出物の核発生が粒内でも容易となり、粒界析出と PFZ の発達が抑制され、粒界破壊しなくなって靱性が向上することを示す。

図 7 Al-6% Zn-1.5% Mg 合金の 393 K (120°C)

時効による降伏点、伸びの変化。

実線：普通時効、鎖線：ひずみ時効

以上要するに、少量の強い粒子を粒内に均一微細にばらまき、粒界析出を防ぎ、結晶粒径を小さくしてストレスの集中を避けながら、固溶強化や整合相を補助的に用いることにより、強靱材料が得られる場合が多い。

原則を理解し、これを 超越すること

たとえば混合組織合金の延性は低いという概念をうのみにしてはいけない。2 相合金を加熱したときの粒成長を考える。各結晶粒は組成の大きく異なる別の相で包囲されているので、単相合金の場合よりも粒界移動が困難で、粒成長が起りにくい。このために多くの Ti 合金 (α/β)、4・6 黄銅 (α/β)、2 相ステンレス鋼 (α/γ) などの混合組織合金は焼なまし状態でも結晶粒が微細であり、粒界にストレスが集中する程度が低い。これらの実用合金では両相がともに延性をもち、強さに大きな差がないという点も、粒界にストレスを集中させないための大切な因子となっている。では軟かいフェライトと硬い Fe_3C の混合組織の場合はどうであろうか。共析鋼を 823 K (550°C) 付近で恒温変態させ (バテンティング)、強く冷間引抜きをして Fe_3C とフェライトが繊維状に配列した超微細組織とする。フェライトは冷間加工と Fe_3C から C 原子の供給を受けて、その強度は低炭素マルテンサイトほどに達し⁽¹¹⁾、 Fe_3C との強度差が縮まる。このようにして工業用材料として、最も強靱なピアノ線ができあがるのである。ストレスの集中は疲れ破壊の場合にとくに問題になる。マルテンサイトとオーステナイトの混合組織合金の疲れ強さは、オーステナイトのみの場合と同程度に低いけれども、冷間加工によりオーステナイトを強化してやれば耐久比が向上⁽¹²⁾ することも同様な考えで理解できる。

機械構造用鋼をまず通常焼入れを行ない、次に A_{c1} と A_{c3} の中間の温度から焼入れる。この熱処理は一樣な組織をつくるという原則から外れた方法であるが、これによってオーステナイト粒径が微細になり、焼もどし脆化が起りにくくなる。この方法は 9% Ni 低温用鋼の代用鋼である 6% Ni-Cr-Mo 鋼に適用して成功を納めている⁽¹³⁾。

あらかじめ深く鋭い切欠きを付した試験片を破断させ、その破断荷重と試験片形状から脆性き裂の「伝ば」に対する抵抗のパラメーター K_{IC} を求めることがある。図 8⁽¹⁴⁾ の Ni-Cr-Mo 鋼の結果で

図 8 0.4C-1.8Ni-0.6Cr-0.2Mo 鋼
(473 K (200°C) 焼もどし) の靱性
に及ぼす焼入れ温度の影響。
(Zackey, 他)

は高温から焼入れて結晶粒径を大きくしたほうが K_{IC} が大きい。これは極めて鋭い切欠きの先端でのそ性変形が粗粒鋼ほど起きやすいことが関与している。しかし、粒界でのストレスの集中が脆性き裂の「発生」に関与し、これが結果に反映するシャルピー試験では常識通りに粗粒のほうがもろくなる。このように靱性の評価方法によって組織の効果が異なってくることを留意すべきである。

ねばり強く進歩しよう

靱性という大問題をストレスの集中の一因子で割り切って述べたが、納得できない事例がつぎつぎにでてくるであろう。その都度それらをまな板にのせて考えを深め、細部の研究におぼれず、原理・原則に縛られることなく自由な発想を実行に移すところに進歩が期待できよう。

文 献

- (1) R.A.Granger: Trans. ASM, **59**(1966), 26.
- (2) 船越督己, 榎並禎一: 材料研究委員会報告, 鋼の焼もどし脆性に関する研究, 日本鉄鋼協会材料研究委員会, (1976), 3月, 9.
- (3) F.B.Pickering: 鋼の強靱性, Climax Mo Dev. Co. (Japan), (1971), 9.
- (4) 須藤 一, 大貫 仁: 金属学会誌, **39**(1975), 792.
- (5) 田中 実, 山本 襄: 文献(3), 196.
- (6) D. R. Squires and E. A. Wilson: Met. Trans., **3**(1972), 575.
- (7) H. C. Feng, E. A. Wilson and C. J. McMahon: Proc. 3rd Int. Conf. of Strength of Met. & Alloys, (1973), 129.
- (8) C. A. Pampillo and D. W. Paxton: Met. Trans., **3**(1972), 2895.
- (8) W. C. Johnson and D. F. Stein: Met. Trans., **5**(1974), 549.
- (10) 宇野照生, 馬場義雄: 金属学会講演概要, (1976-10月), 60.
- (11) 須藤 一, 工藤利博: 金属学会誌, **36**(1972), 693.
- (12) 須藤 一, 加賀 寿: 金属学会誌, **37**(1973), 1185.
- (13) 須藤 一: 金属学会会報, **14**(1975), 681.
- (14) V. F. Zackey, E. R. Parker and W. F. Wood: 文献(7), 176.

<新 刊 案 内>

Boron Reinforced Aluminum Systems (Materials Technology Series, vol.6)

Carlos J. Hilado 編

繊維強化型金属系複合材料が注目されてから大分たつが、実用化へ大きく踏み出した例を余り聞かないが、中でも実用化へもっとも近い位置にあると見られるのが、ボロン繊維強化型アルミニウム系で、この系特有の高い比強度、比弾性率から主に航空宇宙関係への応用が試みられている。本書はこの系の材料に関する論文を、1971~73年の Journal of Composite Materials から集めたものであるが、論文執筆者の大部分はアメリカの航空宇宙および軍関係の研究者であって、アルミニウム系複合材料にとって最近何が問題になっていたかを本書から伺い知ることができる。この方面の具体的情報に疎い我国の研究者にとって有効な情報源の一つであろう。

さて内容であるが、複合材料内の応力分布についての、有限要素法と Prandtl-Reuss 関係式を用いた弾塑性解析および、Boundary Point Least Squares (BPLS) 法による解析、強度、特に破壊強度の繊維方

向依存性についての試験結果、材料の振動特性の有限要素法解析と実験結果、圧縮荷重下の繊維の挫屈挙動、設計思想からの材料の信頼性評価などが含まれている。

情報量が多すぎるためにかえって特定材料に関する情報が分散しがちな現在、本書のような集録は利用者にとって便利なものである。しかしこの系の材料に関する研究は日進月歩しており、その歩みから見れば本書の内容は最新とはいえない。たとえば、構造用複合材料の応用に当って遭遇している主要問題の一つは衝撃抵抗であって、特に本系のような航空宇宙用(ジェット・エンジンのファンおよびコムプレッサー・ブレード)材料にとって問題なのは FOD (foreign object damage) であること [J. Composite Materials, **10** (1976), 231] などは複合材料の研究者にとって見逃せないことであろう。(M.S.)

[B5判 124頁 1974年 5,980円 Technomic Pub.Co.]