

随 想

超強力鋼はどこまで強くできるか

河部 義邦*

編集委員会から大変難しい題目を与えられた。しかし、高強度化は材料研究の永遠の課題であり、限界強度を正しく把握することは材料研究者の責務ともいえる。一方、“限界”に対する考え方はそれぞれの立場に応じて種々な理解のしかたがある。そのため、最高は鉄の理論強度から最低は特定の環境中で実用に供し得る強度まで限界強度には大きなスペクトラムがあり得ると思われる。この小文のなかでそれらのすべてに触れることはできないので、ここでは超強力鋼の引張強さをどこまで高められるという点にしばって、私達の研究の基本的な考え方を示し、この分野の研究者としての責務の一端を果たすことにしたい。

技術予測

一般には、超強力鋼はどこまで強くできると考えられているのだろうか。この点を判断するのに2つの資料がある。1つは、科学技術庁が昭和45年ごろ実施した技術予測の中に、「引張強さ 500 kgf/mm²の超強力鋼が実用化される」という課題がある。この技術予測は専門家を対象としてデルファイ法によつて行われたものであるが、約100人の回答者中90%弱が1985~1995年にこの課題は実現すると答えている。いま1つは、日本金属学会が昭和48年に一般会員を対象として行つた「金属学の未来像」アンケート調査がある。「鋼の引張強さが500 kgf/mm²を越える(実験室的)」という質問に対して、86名の回答者中90%強が1985年ごろに実現すると回答している。このような調査に回答を寄せる層は多少なりとも超強力鋼に関心を持つ人と思われるが、上記の資料からそれらの方々は超強力鋼を500 kgf/mm²程度まで強くできるとの見通し、または願望を持っていると理解することができよう。

私達が超強力鋼の研究を開始したのは前者の技術予測が行われたところで、この技術予測に対する次のような疑問が私達の研究の一つの動機になった。

1) これらの予測は、現在の技術的進歩の延長上に沿つて強度は上昇するという考えに基づくと思われるが、その根拠はあるのか。また、延長上の上昇をストップさせる臨界条件があるのではないのか。

2) どのような大きさの材料を想定しているのか。寄せられたコメントから判断すると、ミクロンオーダーのホイスキーからバルクの溶接構造材料まで広い幅があるが、破壊挙動は材料の寸法に強く依存するので、材料の大きさによつて限界強度はかなり違うのではなからう

表1 各種強化機構による最大強化量 (kgf/mm²)

固溶強化	50
析出強化	300
粒界強化	60
加工強化	90
(参考) ピアノ線の強度	~1400 400

か。

そこで私達は、ピアノ線のような細線ではなく、バルクの構造材料を対象として強靱性の向上を図り、多少なりとも実験的根拠に基づいて限界強度を推定したいという気持ちから研究を進めてきた。

各種強化機構による強化量

まず、各種の強化機構により鉄をどこまで強くできるかを表1に示した。この強化量は合金の組成、組織の限界を考慮して算出した値である。粒界強化の場合は、1 μ までの細粒化を想定し控え目に見積つたが、さらに1 μ 桁細粒にできれば強化量は140 kgf/mm²上積みできる。超強力鋼はこれらの強化機構を組み合わせて高強度化を図つているので、強化量の観点からは500 kgf/mm²の強度を得ることは決して難しいことではなく、また強度を高めるには析出強化を利用するのが最も有利であることがわかる。

そこで、私達はマルエージ鋼を対象として、組成と組織を制御して極限強度の追求を試みた。その結果、引張強さが300 kgf/mm²を超えると強度を高めることは非常に難しくなること、これは巨視的変形が起こる以前に破壊が生じる、すなわち低応力破壊によつて強度上昇が制限を受けるためであることがわかつた。この現象は従来からよく知られてきたことではある。それにもかかわらず、従来の限界強度の予測には低応力破壊の発生にほとんど考慮が払われていない。そこで、私達は低応力破壊の発生によつて高強度化の限界が支配されるという観点から限界強度を考えることにした。

低応力破壊の発生条件

平滑試験片で低応力破壊が生じる現象は一般にはなじみが薄いだが、この現象は材料の強度水準が高いほど、靱性が低いほど、さらに結晶粒径の粗いものほど起こりやすい。そこで、これらの3因子を広範囲に変化させ、低応力破壊が発生する臨界条件の把握を試みた。これは結晶粒径の大きさのき裂が生成した場合、降伏点以下の応力で破断するか否かという条件から3因子間の関係を導出し、その関係を実験的に確認したものである。その結果、一定の組成においてはある臨界の大きさより粒径が大きくなると低応力破壊が発生すること、また組成が変わつて強度と靱性が変化する場合、その臨界粒径は0.2 (K_{IC}/σ_u)² (K_{IC} :破壊靱性, σ_u :引張強さ) で表されることを示した。当然、粒径以外の組織因子が変わつても臨界粒径は変化するはずであるが、その影響は破壊靱性

* 金属材料技術研究所筑波支所 工博

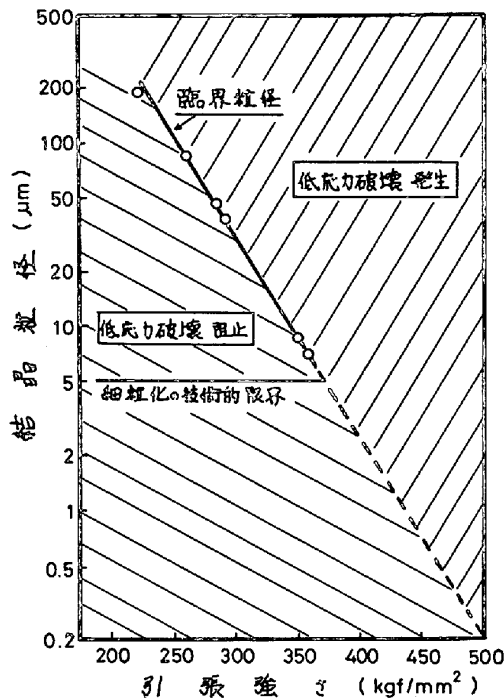


図1 低応力破壊が発生する臨界粒径 (マルエージ鋼)

や強度の変化としてあらわれ、その変化を介して臨界粒径に影響を及ぼすと考えることができる。

この関係から、低応力破壊を阻止するための組織制御の指針は、 $0.2(K_{IC}/\sigma_u)^2$ で表される臨界粒径以下に材料の結晶粒を微細化することである。それでは、この臨界粒径はどの程度の値になるのだろうか。図1は、現在実験的に求められている臨界粒径を丸印で示し、さらに強度と破壊靱性の上限の実験結果を用いて線引きしたものである。なお、点線の部分は破壊靱性の実験値が無いので、低強度側での関係を単純に外挿した。この図から、強度水準の上昇に伴い臨界粒径は急激に小さくなる、したがって低応力破壊の発生を阻止して高強度化を図るには、結晶粒をますます微細化しなければならないことがよくわかる。

現在の技術的限界

図1の関係から、500 kgf/mm²の引張強さを得るには結晶粒を0.2 μ以下に微細化しなければならない。そこで、現在どの程度まで結晶粒を微細化できるのか、その技術水準を概観しよう。現在最も細かい粒径が得られ

るのは溶融状態から10⁴°C/s程度で急冷する処理で、0.2 μ粒径が報告されている。この処理では当然厚い試料を得るのは難しい。固体内反応を利用する方法の中では、2相組織に特殊熱処理を適用すると最も細かい粒径が得られる。これは2相組織の結晶粒径成長速度が著しく遅いことを利用したものであるが、2相組織は強化量に限界があり、また2相間の塑性挙動の違いによりその界面で破壊が起こりやすい難点があるので、著しい高強度化を指向する組織には適さない。したがって、単相組織に加工熱処理を適用するのが最も有望と思われるが、現在この処理で得られる最小粒径は約5 μ、亜粒径でも1 μ以下に微細化するのは難しい段階である。図1にも示したように、現在この技術的限界に支配されて得られる最高強度は350~370 kgf/mm²である。

さらに留意すべき点は、上記の考え方は結晶粒径よりも大きな欠陥を含まないことを前提としている。しかし、結晶粒径が5 μ程度まで微細化されると、特殊溶解を行った鋼材中の非金属介在物の大きさが粒径と同じオーダーになる。したがって、結晶粒の微細化だけでは不十分で、同時に介在物の低減と微細化を図らないとこの限界強度を高めることはできない。特に、現在得られる最小粒径以下の範囲まで細粒化しようとする、介在物の方がキャスティングボードをにぎり、その低減と微細に分散させる処理技術の開発が不可欠になる。

結論的には、結晶粒径と介在物制御の技術的限界を考慮すると、超強力鋼を500 kgf/mm²まで強くすることはバルクの構造材料を対象とした場合は実験室的にも実現できないと考えている。ただし、ピアノ線のような細線または極薄板材としてならば、そう遠くない将来実現されるであろう。

最後に強調したいことは、今まで述べたことは超強力鋼の平滑材の引張強さをどこまで強くできるかを述べたにすぎない。当然、切り欠きやき裂が存在する場合、また環境の影響を受ける場合はこの限界強度は大幅に低下する。その値こそが実用化を考慮した場合の限界強度であり、その強度を正しく把握しその向上を図ることが最も重要な課題である。その意味からは、現在超強力鋼は引張強さ240 kgf/mm²材までが実用化されているが、当面は250~280 kgf/mm²、その次は300~350 kgf/mm²の鋼種の開発を目標にすべきものと考えられる。