

第4回 金属の強化機構

東京工業大学
材料工学専攻
准教授 安田公一

1. はじめに

元来、金属の強化（高強度化と高靱性化）は、合金元素の添加と熱処理によって行われてきたが、最近では、熱処理と塑性加工を組み合わせる加工熱処理という手法も提案されている。第2回の転位論の講義でも説明したが、金属が塑性変形しないようにするためには、転位を完全に除去するか、あるいは、転位が運動しにくくすればよい。前者については、直径数 μm 、長さ数 cm のひげ結晶（whisker）で完全結晶を実現させることができるが、それよりも大きくなると、転位が入ってしまい、強度は急激に減少してしまう。一方、転位を動きにくくするための方法には、いくつかの方法があり、それらを組み合わせると、3~3.5GPa という高強度鋼も開発されている。

今回は、このような金属の強化メカニズムについて解説する。すなわち、加工硬化、結晶粒微細化による強化、固溶強化、析出強化である。また、複合材料の範疇であるが、分散強化と繊維強化についても簡単に説明する。分散強化や繊維強化は、金属と同様に延性を示すポリマー材料にも適用できる。

2. 加工硬化

金属を塑性加工すると、転位密度が増加して、転位同士が相互作用をする結果、他の転位の運動を妨げ、さらに、転位の集積が起こって硬化することを言う。

3. 結晶粒微細化による強化

図6に示すように、転位の運動は粒界で妨げられ、また、粒界に転位が堆積することにより転位がお互いに反発することから、単結晶に比べて多結晶では降伏しにくく、また、粒径が小さくなるほど降伏しにくくなる。図7は、下降伏応力と結晶粒径の関係を示したものである。これらは、Hall-Petchの関係式で表すことができる。

4. 固溶強化

図8に $\alpha\text{-Fe}$ の引張り強度に及ぼす固溶元素の影響を示す。これより、固溶量の増加と共に強度が増加していることがわかる。これを固溶強化という。固溶強化のメカニズムとしては、

- ①C,N等の侵入型固溶原子が転位の直下に集まって（侵入型固溶原子は、引張り応力が働いているところにある方がエネルギー的に安定だから）、転位をエネルギー的に安定な状態にさせるコットレル効果
- ②固溶原子の原子半径や剛性率の差、あるいは電子構造の差によって発生した内部ひずみによって、転位の運動が妨げられる効果

③FCC 金属では、1つの転位が2つの部分転位に分かれて積層欠陥ができ、周囲のマトリックスとの間に溶質原子の偏析を生じるための化学的相互作用（鈴木効果）

などで説明されている。

5. 析出強化

図9に示すように、固溶体 α の固溶域が低温で縮小している場合を考える。まず、 α 固溶体の合金を温度 T_1 で十分焼きなましをする（これを溶体化焼きなましという）次に、温度 T_2 まで急冷すると、第2相の析出が抑制されて（過冷却状態になって）、過飽和固溶体が得られる。このようにできるのも、図10に示したT-T-T線図から分かるように、 β 固溶体粒子の析出開始時間よりも冷却時間が短いからである。最後に、温度を T_3 にして保持すると（このことを、時効(aging)するという）、しばしば著しい硬化が起こり、この現象を時効硬化（age hardening）と言う。また、この現象は、第2相を析出しようとして起こることから、析出強化とも言う。

一般的には、固溶強化よりも析出強化の方が倍以上大きな強度を得ることができるが、その材料の使用温度が高いと、析出物が再固溶して析出強化の影響が消失したり、あるいは、拡散が進行して、析出物が粗大化することが起こって、強化が消失することもある。そのような場合には、次に述べる分散強化を行うことになる。

6. 分散強化

高温でも溶解度が小さく、粗大化せず、かつ、マトリックスよりも強度の大きな粒子を分散させる方法である。通常、 Al_2O_3 、 ThO_2 、 SiO_2 などの酸化物粒子を粉末冶金法で金属や合金中に分散させて製造される。強化メカニズムは、析出強化と同様であるが、粒子の強度が大きいことから、分散粒子による変形抵抗 F_m が $2T$ （ T は転位の線張力）よりも大きいため、転位が上昇運動を起こすような高温でもない限りは、転位が分散粒子を乗り越えるのは、オロワンのバイパス過程によって支配される。オロワンループが残るので、著しい加工硬化を示す。転位の上昇運動が起こるような高温になると、図16に示すように、転位は上昇運動によって分散粒子を通り抜けるようになるため、変形応力はオロワン応力の半分程度まで減少する。

7. 繊維強化

繊維強化は、金属の強化メカニズムだけでなく、ポリマーやセラミックスにも適用されており、さらに、粒子分散強化も含めて、複合材料として扱うことが多い。ここでは、繊維強化を中心に、複合材料の分類と強化メカニズムの基本的な考え方について整理する。なお、繊維強化の力学的取り扱いについては、セラミックスの高靱化のところでもまとめて解説することにする。

複合材料は、次のように分類される。

①強化相の種類

を適度に調整することにより，図 18 に示すように，繊維／マトリックス界面で剥離を起こさせ，その結果，繊維が弾性変形することによる摩擦散逸を起こさせ，さらに，応力が増えて繊維自身が破断し，その後，繊維が引き抜けて，これによっても摩擦散逸を起こさせるようにしないと，靱性が向上しないことになる。