



PART 2

析出強化を活用した超強力鋼 マルエージング鋼

析出物による析出強化を最大限に生かしたマルエージング鋼は、現在、工業的に用いられている実用鋼の中で、最も高強度な材料の一つである。現在、このマルエージング鋼の優れた特性を、用途に合わせてさらに高める研究開発が積極的に行われている。

急速に搭載車が増加しているCVT（無段変速機）。このCVTの金属ベルトリング材にはマルエージング鋼が使用されている。写真の薄板が積層された二対のものがリング材（写真提供：本田技研工業（株））

ひときわ優れた特性を持つ超強力鋼

マルエージング鋼は1960年代に、航空・宇宙分野向に開発された。その名前が示すように、マルテンサイト（焼入れ組織）に時効硬化処理（エージング）を施した鋼のことであるが、現在では、18%Ni、Co、Mo、Tiを添加した、18%Niマルエージング鋼が一般的となっている。

マルエージング鋼の特徴は、なんといっても2000MPa前後のきわめて高い引張強度を持ち、さらに靱性、延性も大きいことである。その他にも固溶化処理後はやわらかく加工硬化も少ないため冷間加工性に優れている事、熱処理が比較的低温で容易である事、極低炭素で溶接性に優れる事など、製造、加工工程等で扱いやすく、ひときわ優れた特性を備えた材料といえる（下表：代表的なマルエージング鋼の化学成分および特性参照）。

その強化機構は、固溶化処理によって得られる極低炭素高Niのマルテンサイト組織を時効硬化処理し、Ni₃Mo、Ni₃Ti等の金属間化合物を析出させる。Coは金属間化合物の析出を促進する役割を担い、強度レベルは、Co、Ti、Moの添加量に依存する。

マルエージング鋼はNiやCo、Moなどの合金元素を30%以上含むため非常に高価で、用途が限られているのが現状である。現在では、ロケットのモーターケース、プラスチック精密金型に実用化されている。また最近ではジェットエンジンのシャフト、自動車

のCVT（無段変速機）の金属ベルトリング、ゴルフクラブのヘッド等に採用されている。

さらなる性能向上をめざして

マルエージング鋼は非常に優れた特性を持つが、用途に合わせてその性能をさらに高める研究開発が行われている。例えばマルエージング鋼は非常に高い強度レベルでの延性が大きいことが特徴であるが、結晶粒の微細化によって延性がさらに向上することがわかっており、冷間加工と熱処理の組み合わせを最適化することにより、微細化が行われている。B（ホウ素）の微量添加で微細化を図る場合もある。

また、優れた靱性をさらに高めるには、不純物元素の低減が効果的であることから、真空誘導溶解と真空アーク再溶解の二重溶解法が多く採用されている。

そして現在、マルエージング鋼で大きな課題となっているのが疲労強度の向上である。疲労強度は一般的に引張強度、硬度に比例して上昇する傾向にあるが、引張強度1200MPa以上、硬度400HV以上の高強度鋼材になると、上昇しなくなる。そのため特に高サイクル域での使用用途では、マルエージング鋼の疲労強度向上が要求されている。

これまでの研究では、低サイクル域での疲労破壊は、表面を

■代表的なマルエージング鋼の化学成分および特性（AMS 6514F、101.60mm厚、L方向の場合）

化学成分（%）													0.2%耐力 MPa	引張強さ MPa	伸び %	絞り %
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr	Cu				
min						18.00	8.50	4.60	0.50	0.05	—	—	1862	1930	5	30
max	0.03	0.10	0.10	0.010	0.010	19.00	9.50	5.20	0.80	0.15	0.50	0.50				



起点としたき裂発生、伝播によって起こることがわかっている。 10^7 回を超える超高サイクル域においては、内部の介在物を起点として起こることが報告されている。表面を起点とした疲労破壊に対しては、表面に窒化処理を施すこと等で改善が可能となっている。

課題となる内部起点の疲労破壊は、介在物の微細化が疲労強度向上に効果的であると考えられている。介在物のなかでも特にTiN(またはTiC)が起点となることが知られている。これらの介在物は比較的サイズが大きく、しかも多数生成されるため制御が難しい。そのためTiN(またはTiC)の低減や微細化をめざした研究開発が積極的に進められている。

過酷な環境で活躍するマルエージング鋼

研究開発により性能が高められたマルエージング鋼は、その特性を生かして、過酷な環境で活躍している。

ジェットエンジンのシャフトは、超高速で回転し続けるため高い疲労強度が求められる。先ごろ、シャフト向けに開発されたマルエージング鋼は、Tiを添加しないことで破壊起点となりやすいTiNをなくし、高い疲労強度を実現している。Tiはマルエージング鋼の強化元素であり、単純にTiをなくすと強度が大きく低下するが、開発鋼は金属間化合物の析出強化に加えて、破壊起点になりくい炭窒化物による析出強化を行い、二重の強化機構を付与して引張強度を向上させている。

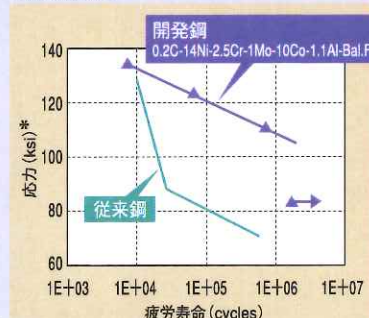
また、現在マルエージング鋼の用途として需要が高まっているのが、

■ジェットエンジンシャフト材開発の例



開発鋼はTiNフリーで、優れた疲労強度と引張強度を備え、航空機のジェットエンジンのシャフトに採用されている。

●疲労特性



資料提供:大同特殊鋼(株)

自動車の無段変速機(CVT, Continuously Variable Transmission)の金属ベルトリング材である。CVTは歯車を用いず摩擦力によって動力を伝達し、スムーズな変速や燃費向上等が図れることから、近年搭載車が増加している。現在実用化が進んでいるベルト式CVTは、2つのプーリー(滑車)にベルトを通し、プーリーの径を変化させ、連続的な変速を可能とする。このベルトは、数百枚のエレメントと二対のリングにより構成されている。

リング材は、一枚の厚さが0.2mm程度で、これをプーリーに巻きつけるため積層して用いる。極めて薄い板でありながら、張力に対して降伏しない高い強度が要求され、高強度なマルエージング鋼が使用されている。最近では繰り返し屈曲に対するマルエージング鋼の疲労強度の向上が進められており、例えば、疲労破壊に影響を与えない介在物のサイズを明らかにし、製造プロセスで介在物径を制御し、さらに熱処理条件を最適化することで疲労強度を向上させた例もある。

現在、CVTは小中型車を中心に搭載されているが、今後は大型車への適用も検討されている。そのためにはマルエージング鋼のいっそうの性能向上が必要といわれており、組織制御技術の役割がますます重要となっていくだろう。

●取材協力 大同特殊鋼(株) ●文 藤井美穂

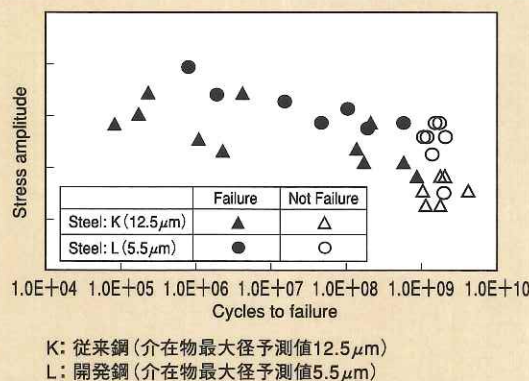
■CVT金属ベルトリング材の疲労特性向上を目指した研究開発の例



疲労破壊起点となるTi(C,N)介在物(SEM観察像)

●超音波疲労試験によるS-N線図

鋼材Lの方がKよりも疲労強度が優れていることがわかった。



出典:矢ヶ崎徹、青山英明、斎藤俊博、石井和夫、岡田善成、有川守:
Honda R&D Technical Review Vol.14 No.1 (April 2002), P.181
資料提供:本田技研工業(株)