

最近の表面硬化技術および材料の進歩

並木 邦夫*

Kunio NAMIKI

Recent Development of Case Hardening Technology and Materials

1 緒言

この1~2年、自動車業界では低迷が続き生産台数には減少が認められるものの、高出力化、高性能化、燃費の向上、静粛性の向上など、多岐にわたる技術改善がなされ、個性のある自動車が開発されてきた。いっぽう、80年後期から地球規模大気環境問題に端を発し、米国での燃費、および排気ガス規制はより厳しくなる傾向にある。その結果、エンジンの燃焼効率改善は言うまでもなく、自動車の軽量化が重要課題となってきた。

こうした背景にあつて、自動車用素材の軽量化への要求もより厳しいものとなっている。最近の普通および小型乗用車における材料構成比を図1に示す¹⁾。鉄系材料がこの10年で75から70%に減少し、アルミニウムや樹脂などの軽量材料が増加しているのが特徴である。これに対し、特殊鋼は約15%とほとんど変化していないのが特筆される。軽量化のための材料置換がなされつつあるものの、特殊鋼はエンジン部品、駆動系部品、足回り部品、さらには懸架部品

など高応力が負荷され、信頼性の要求される機械構造部品に用いられるため、他材料への置換は必ずしも容易ではないと考えられる。

また、これら部品の性能を支えてきたのは材料のみならず熱処理との組み合わせと言っても過言ではない。とりわけ駆動系部品では、高面圧下での転動応力や、繰り返し曲げ応力を受けるため、耐摩耗性や疲れ強さの高いことが要求され、何等かの表面硬化処理が施される。表面硬化処理とは部品の表層のみを硬化する熱処理であり、浸炭焼入れ、窒化および高周波焼入れなどがこれに相当する。また表面硬化処理部材は硬く耐摩耗性に富む表層部と靱性に富む軟質な心部の複合組織鋼ということもできる。さらに表層では焼入硬化層が内部から拘束されることにより圧縮応力が残留しており、負荷時の引張応力を軽減させ疲れ強さを高めることが知られている。

いっぽう、この数年の自動車部品の高強度化の経緯を見ると表面硬化処理技術と材料開発とがあいまって初めて高強度化が達成されていることがうかがえる。高強度化が進み、ほぼ限界に近い水準にまで達しているため、単なる表面硬化処理の適用や新材料の開発では、もはや目標達成が困難な状況にあるとも言えよう。

そこで本稿では主に自動車用機械構造部品を対象として、最近の表面硬化処理技術および材料の進歩について述べ、今後の課題を整理してみたい。

2 浸炭用鋼および処理技術

2.1 高強度浸炭用鋼

浸炭法は量産性に富み、そのコストも比較的安いことから自動車用部品を初めとした機械構造部品に適用されてきた。浸炭用鋼としてはJISに規定されるSCr420、SCM420およびSNM420などの肌焼鋼が用いられる。これら肌焼鋼の組成が見直されたのは、比較的最近のことであり、その

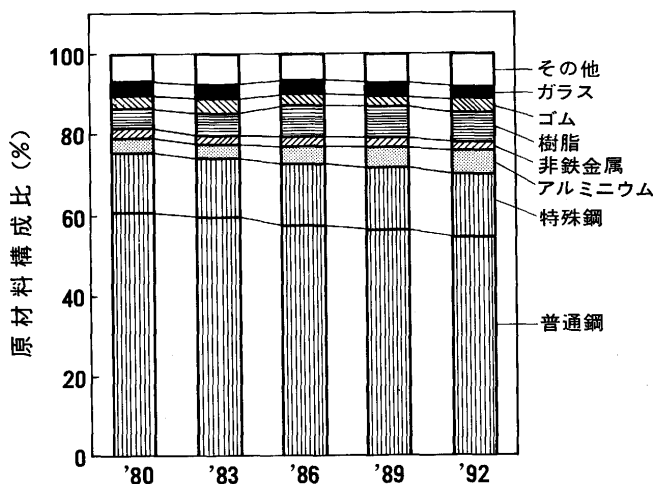


図1 普通および小型乗用車における原材料構成比

平成5年8月2日受付 平成5年9月10日受理 (Received on Aug. 2, 1993; Accepted on Sep. 10, 1993) (依頼解説)

*大同特殊鋼(株)星崎工場技術室長 (Hoshizaki Plant, Daido Steel Co., Ltd., 2-30 Daido-cho Minami-ku Nagoya 457)

Key words : case hardening; carburizing; plasma carburizing; super-carburizing; shot peening; nitriding; carbo-nitriding; induction hardening.

発端は浸炭時の浸炭異常層に注目し、これを抑制した浸炭鋼の開発がなされたことである。従来より、一般的な浸炭ガスである吸熱反応型変成ガス中に含まれる H_2O や CO_2 と鋼が反応することにより粒界酸化が生じ^{2)~6)}、さらにその周囲に不完全焼入層が生じて疲れ強さが低下することは多くの研究者により指摘されてきた^{7)~9)}。また、こうした浸炭異常層の形成を避けるべく真空浸炭の適用なども検討されてきたが¹⁰⁾設備およびランニングコストの制約により量産部品の処理としては必ずしも定着していない。

これに対し、近年の自動車の軽量化志向にあつて、通常のガス浸炭でも高い疲れ強さ、衝撃強さを示す高強度鋼への要望が強くなった。実用浸炭部品の破壊機構を解析した結果、疲れき裂や衝撃破壊き裂が浸炭異常層を起点として発生することが確認されたため¹¹⁾、浸炭異常層の軽減に注目した開発がなされたものである。

一般的に酸化物形成傾向の強い元素Si, Mn, Crなどは浸炭中にオーステナイト粒界に沿って粒界酸化物を形成するが、これらの元素は焼入性向上元素でもあるため、粒界近傍での焼入性が低下し不完全焼入組織が形成される。これが浸炭異常層であるが、これを低減するため高強度鋼においてはこれらの元素を低減しているのが特徴である。例としてSi, Mn, Cr量と粒界酸化層深さの関係を図2に、また粒界酸化層深さと平滑回転曲げ疲れ試験での 10^7 疲れ強さとの関連を図3に示す¹²⁾。合金元素パラメータ値については種々の値が提案されているが¹³⁾、これら3元素量の低減により粒界酸化層深さが低減するとともに、疲れ限度も向上することが明らかである。ここで同一粒界酸化層深さで比較すると通常のSCR420やSCM420に比べ含Ni-Mo鋼の疲れ限度は高く、高強度化にはNi, Moの複合添加が有効であることが示されている。なお浸炭異常層を完全に抑制すべくSiのみならずCrをも無添加としたCr非添加肌焼鋼の検討もなされて

いる¹⁴⁾。

主要元素のみならず細粒化元素や不純物元素の影響も検討されており、例えばV添加により浸炭粒度が微細化し疲れ強さが向上することが認められている¹⁵⁾。またPは浸炭時にオーステナイト粒界に偏析しこれを脆化させるため、Pを低減することにより特に浸炭層の靱性が向上することが確認されている¹⁶⁾¹⁷⁾。さらにBの添加により粒界が強化され、疲れ強さと曲げ靱性が向上するとの報告もある¹⁸⁾。

疲れ強さの向上には合金組成の最適化とともに非金属介在物の低減、すなわち清浄化が必須であることは言うまでもない。浸炭材の場合、表面には圧縮残留応力が存在すること、また最大曲げ応力は表面に負荷されることから表面近傍で非金属介在物を起点としたいわゆるフィッシュアイ破壊が生ずることは稀である。しかしながら硬化層深さが浅い場合などに浸炭層と心部の境界で介在物を起点とした疲れ破壊を生ずることが多い。従来から極めて硬質な Al_2O_3 などの酸化物系介在物を低減する努力がなされており、酸素量を15ppm以下とすることにより疲れ強さが大幅に改善されることが報告されている¹⁹⁾。さらにCaを添加することによりMnSを粒状化し曲げ疲れ強さの異方性を改善することなども行われている²⁰⁾。

以上の組成設計により開発された高強度歯車用鋼の例を表1に示す^{21)~24)}。いずれもSi, Mn, Crを低減し必要に応じてMo, Niを添加している。これらの開発鋼は主に自動車用動力伝達歯車および差動歯車に適用されており、伝達機構のコンパクト化を通して自動車の軽量化に寄与している。いっぽう歯車においてはこうした対策により歯元の疲れ強さが向上した結果、面疲れ強さ、すなわちピittingが

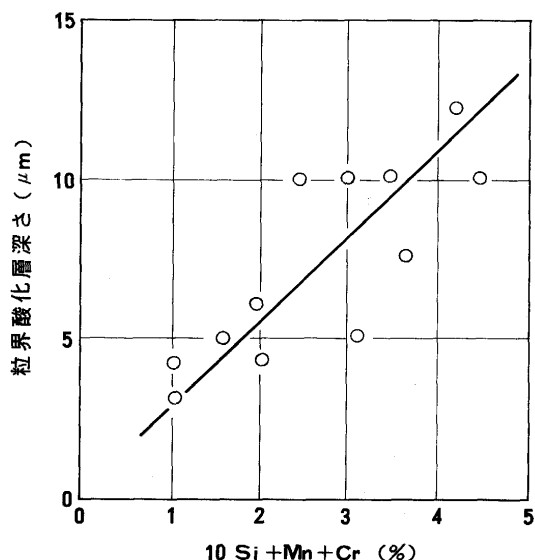


図2 粒界酸化層深さとSi, Mn, Cr量との関係

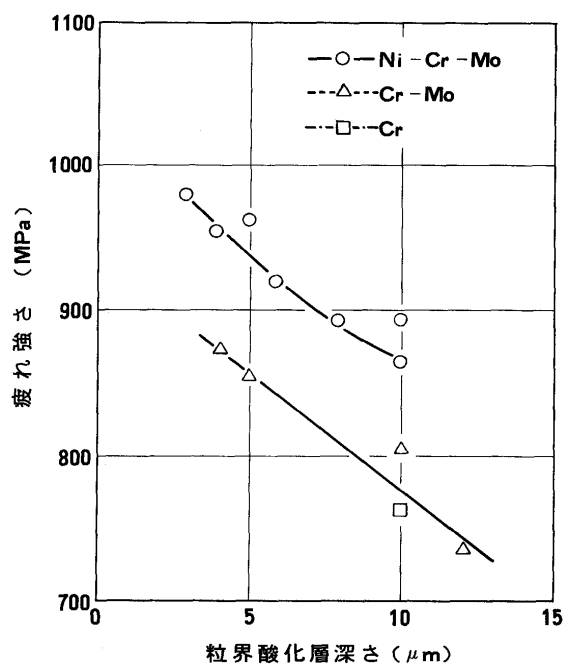


図3 平滑回転曲げ疲れ強さと粒界酸化層深さの関係

表1 高強度歯車用鋼の成分例 (%)

成分系	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	その他	文献
Cr-Mo系	0.20	≦0.15	0.70	≦0.015	0.015	—	1.00	0.40		21)
	0.14	≦0.15	0.75	—	—	—	1.00	0.40		22)
	0.20	≦0.15	0.75	—	—	—	1.00	0.80		22)
	0.20	低減	0.60	—	0.015	—	0.50	0.75	0.10V, Ca	23)
	0.20	0.10	0.50	≦0.020	≦0.030	—	1.00	0.50	V添加	22)
Ni-Cr-Mo系	0.20	≦0.15	0.60	≦0.015	0.015	1.00	0.80	0.30		21)
	0.20	≦0.15	0.30	≦0.015	0.015	2.00	0.30	0.75		21)
	0.20	0.10	0.30	≦0.020	≦0.030	2.25	0.50	0.50	V, Nb添加	22)
	0.15	0.18	0.55	0.013	0.012	1.57	0.52	0.58		24)

文献中で特に記載のない成分については一で示した

寿命の要因となりつつあり、耐ピitting性の向上が今後の課題となっている。

2・2 ショットピーニング技術

浸炭のような表面硬化鋼においては表層近傍に圧縮応力が付与され、これが疲れ強さの向上に大きく寄与しているが、さらに機械的に圧縮応力を付与し、これを積極的に活用する手法にショットピーニングが挙げられる。ショットピーニングとは噴霧法によって作られるキャスト・スチールショットや、線材を微細に切断したカットワイヤーと呼ばれる鋼製粒子を被加工材表面に高速で衝突させ表面を加工硬化させるとともに圧縮応力を付与する技術であり、古くよりばねを初めとした機械構造部品に適用されてきた^{25)~27)}。効果的に圧縮応力を付与するためには種々の制御因子、例えばサイズ、硬さ、形状などのショット粒子や、速度、投射エネルギー、カバレッジなどの投射条件の適正化が必要である²⁸⁾。

近年、歯車を主体とした浸炭部品の高強度化の一手法としても検討がなされ、実用化が図られてきた²⁹⁾。浸炭歯車の場合、歯元に均一にショット粒子を投射し、ばらつきのない疲れ強さを得ることが最大の課題である。このため、被加工材の自転と公転を組み合わせたり、ショット粒子サイズの最適化などがなされている³⁰⁾。

もう一つの最近の動向として投射エネルギーを高めた、いわゆるハードショットピーニングの適用が挙げられる。通常のショットピーニングはアークハイト0.4A程度の投射エネルギーでなされるが、これを2倍以上に高めたものを一般的にハードショットピーニングと呼んでいる。このためにはショットサイズを増大させるか、投射速度を高める必要があるが、歯車の歯底のようにショットサイズが限定される場合には速度を高めざるを得ない。この場合、被加工材の表面粗さが劣化し、かえって疲れ強さが低下する場合もあるので注意が必要となる。軟質の浸炭異常層が表層に存在すれば、表面粗さはより劣化する傾向にあるため、耐粒界酸化鋼ともいえる前述した高強度浸炭用鋼にハード

ピーニングを組み合わせることにより50%以上の疲れ強さの向上が図られている³¹⁾。またMoを0.8%添加することにより浸炭焼入れ後の残留オーステナイト量を40%まで増大させ、これをショットピーニングでマルテンサイト化させることにより、圧縮応力を高め、疲れ強さを向上させた例も報告されている³²⁾。

さらに、投射エネルギーが増大すれば、ショットの寿命が著しく低下する。このため、靱性向上を目的としたハードピーニング用のキャスト・スチール・ショットの組成検討、カットワイヤーの優位性なども研究がなされている³³⁾。また圧縮応力を安定して付与させるため、投射条件のコンピュータ制御も活用されるようになった。このように、40年以上の歴史を持つショットピーニング技術がこの数年で浸炭鋼の高強度化の手法としても著しい進歩を遂げ、定着した感がある³⁴⁾。

2・3 高濃度浸炭

通常の浸炭では表面炭素濃度は0.8%前後に設定される。これ以上の炭素濃度になると残留オーステナイト量が増大したり網目状炭化物が析出したりする過剰浸炭組織となるためである。いっぽう表面近傍に積極的に微細炭化物を析出させ表面層の改質を図ろうとする処理を過剰浸炭と区別して高濃度浸炭と呼ぶことにする。当処理は従来からも内部浸炭³⁵⁾³⁶⁾あるいは過剰浸炭³⁷⁾と呼んで通常のガス浸炭法で実施されてきたが、部品や炉内に煤が堆積し浸炭むらが生じたり、処理コストが多くなるなどの問題があり、定着したとは言い難い。

ところが、最近のプラズマ浸炭炉の開発により³⁸⁾高濃度浸炭が比較的容易に処理できるようになった。プラズマ浸炭とはイオン浸炭とも呼ばれ減圧雰囲気中でプラズマ放電現象を利用して浸炭を行うものである。炉の構造図の例を図4に示す³⁹⁾。まず真空チャンバー内に炭化水素系ガスを導入し、減圧状態(1~10Torr)で処理品を陰極として陽極(通常は炉殻)との間に直流・高電圧を印加して直流グロー放電によりプラズマを発生させる。ここで陰極すなわち処理

品の近傍では急激に電位が低下するのが特徴である。これは陰極降下と呼ばれるがプラズマ中のCイオンはこれにより加速され、処理品に衝突するため表面近傍での浸炭速度増大に寄与している。したがって、高濃度浸炭に適する浸炭炉であるといえる。

高濃度浸炭に当たっては炭化物の析出を容易とするためCr量を高めた浸炭鋼が用いられるが、ここでは0.18C-0.5Si-2.25Cr-0.4Mo鋼の例をあげる⁴⁰⁾。Crは析出するセメンタイト中に分配されるため、炭化物近傍の焼入性が劣化して不完全焼入組織が生じやすい。これを防止するためMoを添加した。またSi量の増加は炭化物の微細化を狙ったものである。1193Kで10.8ksの浸炭を実施した際の表面近傍の炭化物析出状況を写真1に示す。炭化物形状制御、すなわち網目状炭化物を分断し炭化物を微細化するため、浸炭途中に923Kへの降温過程を入れてある。数 μm 程度の炭化物が微細に分散した組織が得られている。また表面近傍のC濃度は2%であり、表面硬さはHV900~1000である。

このような微細炭化物を析出させた高濃度浸炭材は通常浸炭材に比べて回転曲げ疲れ強さが15%以上向上すること、転動寿命がおよそ10倍に延長すること、さらにすべりと面圧を受ける転動部品に発生するピittingに対して著しくその寿命が延長することが確認されている。

また高Cr鋼を用いれば析出炭化物を M_7C_3 型等に制御することも可能であり、SUS420J2への適用なども検討されている。

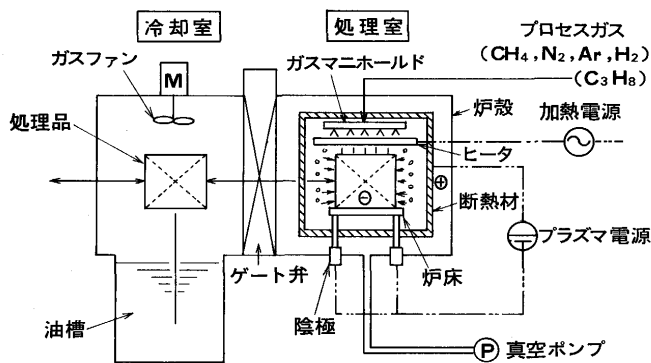


図4 プラズマ浸炭炉の構造図

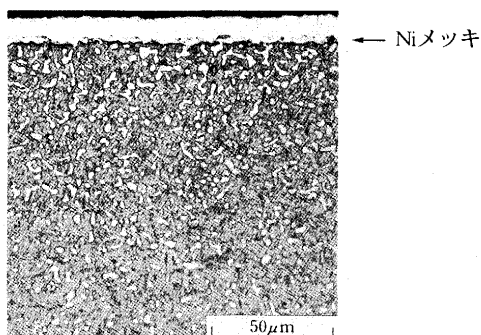


写真1 プラズマ高濃度浸炭材のマイクロ組織
(0.18C-0.5Si-2.25Cr-0.4Mo鋼)

今後の課題としては、炭化物形状制御のための時間短縮技術や、析出炭化物を十分活用するための部品加工精度の向上などが挙げられる。

2・4 オーステナイト結晶粒制御鋼

自動車部品の製造に当たりチップレス化、すなわち冷間および温間鍛造の普及には目覚ましいものがある。これに対応して冷間鍛造性に優れる材料の開発がなされてきたが、もう一つの課題として結晶粒の粗大化対策が挙げられる。冷間鍛造や温間鍛造材の場合、浸炭時にオーステナイト結晶粒の粗大化が生じやすい⁴¹⁾。これは冷間鍛造前の球状化焼なましや温間鍛造時に結晶粒のピンギング効果をねらって添加した微細析出物粒子が粗大化して、ピンギング効果を失うことや、鍛造により初期結晶粒度が微細化してオーステナイト結晶粒成長の駆動力を高めていることなどが原因である。

また、浸炭時間の短縮のため浸炭温度を高める傾向にあり、結晶粒が粗大化しにくい浸炭用鋼の開発が要望されている。

従来より結晶粒成長を抑止するための微細析出物としてはAlNが用いられてきたが、NbやTiなどの炭化物系析出物をピンギング粒子として用いる検討がなされており⁴²⁾⁴³⁾、通常の浸炭鋼に比べて粗大化抵抗の大きいことが確認されている。なおVを1.5%添加し2相鋼とし、結晶粒の微細化とともに高濃度浸炭で疲れ強さを高める検討もなされている⁴⁴⁾。

3 窒化鋼および処理技術

3・1 窒化処理技術の動向

ガス窒化法は1920年代に工業化された古い技術である。 A_1 変態点以下で処理できるため熱処理変形が小さく、そのばらつきも小さいこと、表面に硬質な窒化層が形成されるため耐摩耗性、耐食性に優れること、硬化層の軟化抵抗が大きいことなどの特徴がある。いっぽう、低温での処理のため所定の硬化層深さを得るには処理時間が長くなるなどの短所がある。

窒化法はガス窒化、塩浴軟窒化、ガス軟窒化、イオン窒化に分類される。後者の3方法を総称して軟窒化と呼んでおり、窒素または窒素と炭素を拡散させ耐摩耗性、耐疲れ性を向上させる熱処理と定義されている。現在ではガス軟窒化法が主流であり、各社で特徴のある処理方法を開発、実用化している。例えば、窒素ベース軟窒化法、酸素窒化法、浸硫窒化法、真空軟窒化法等が挙げられるが詳細は割愛する⁴⁵⁾。

近年、自動車の軽量化、低騒音化のニーズにあって自動車業界でも、窒化法を再見直しの傾向にある。これは熱処理歪みが小さいことによる騒音低減と、硬化層の軟化抵抗が大きいことにより部品表面温度の上昇に対応ができる

ためである。疲れ強さや耐摩耗性向上のため、コネクティングロッド、ドライブシャフト、クランクシャフト、カムシャフト、ベベルギア、インターナルギアさらにはピストンリング、バルブシートなどの自動車部品に用いられている⁴⁶⁾。

3・2 新しい窒化鋼

JISで規定されている窒化鋼はCr-Mo-Al系のSACM645：0.40/0.50C-1.30/1.70Cr-0.10/0.30Mo-0.70/1.20Alのみであるが、この他に各国の規格にCr-Mo系、Cr-Mo-V系およびNi-Cr-Al系などがある。ここでAl、Cr、Vは窒化層での高硬さを得るため含有しており、窒化温度が焼もどし脆化域に相当するため、脆化を避ける目的でMoが添加されている。

1960年代は塩浴軟窒化の導入時期であったが、1970年代には自動車産業の発展にともない、軟窒化に合った専用鋼が開発されるようになった。

853Kで18ksecのガス軟窒化を行った際にSACM645に比べて2倍の有効硬化層深さの得られる軟窒化鋼として0.23C-0.6Si-1Mn-1Cr-0.2Al鋼が開発されたが、浸炭材とほぼ同等の疲れ強さと有するため、2輪車用ドリブングアやクランクシャフトに用いられている⁴⁷⁾。

また前組織をベイナイトとして内部の硬さを高めるとともに硬化層深さを増大した軟窒化鋼が開発され、4輪車のステーションナリギアとインターナルギアにイオン窒化を施して実用化されている⁴⁸⁾。主要組成は0.25C-1Cr-0.2Mo-0.1Vから成り、焼ならし後、幅広い冷却速度で安定したベイナイト組織を得ることができる。図5にイオン窒化した歯車での疲れ試験結果を示すが、浸炭材と同等以上の疲れ強さが得られている。なお当該ギアは厳しい寸法精度が要求される部品である。ガス軟窒化でも寸法精度は不十分であったため、インターナルギアの内径側のみを選択イオン窒化することにより寸法精度を確保している。

処理時間が長いことが窒化処理の欠点の一つであるがこ

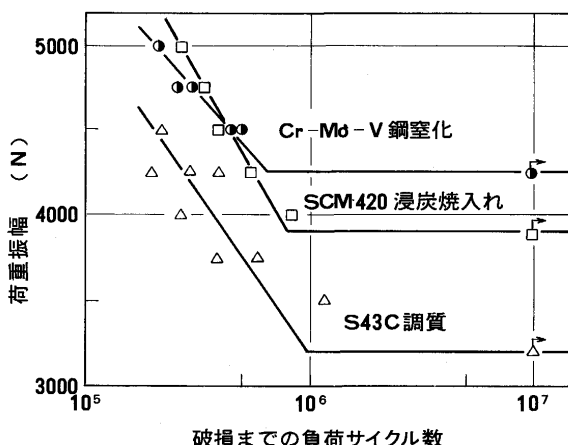


図5 イオン窒化したCr-Mo-V鋼の歯車疲れ試験結果

れを改善した迅速窒化鋼が開発されている⁴⁵⁾。主要組成は0.27C-0.90Mn-1.6Cr-0.2Mo-0.12Vから成る。深い窒化層が容易に得られ、例えば803~823Kでのガス窒化処理において有効硬化層深さ0.4mmを得るのにSACM645では50hを要するのに対し、開発鋼では15hで済み、窒化時間を1/3に短縮することが可能となった。また回転曲げ疲れ強さはCr-Mo系強靱鋼SCM445Hと同等であり、表面硬さが高いことからピitting寿命はSCM445に比べ10倍に延長することが確認されている。

4 高周波焼入用鋼および処理技術

4・1 冷鍛および高周波焼入用鋼

近年、高周波焼入れ技術の精度向上もあいまって、自動車用動力伝達部品への適用が増加しつつある。これらの部品には一般に浸炭材が用いられているが、高周波焼入れへの変更により下記の利点が見られる。すなわち低合金鋼から炭素鋼への代替により省資源化が図れること、機械加工と直結したインライン熱処理が可能となりリードタイムの短縮に寄与できるなどである。さらに高周波焼入れは自動化に適することやクリーンな職場環境を維持するにも利点がある。また冷間鍛造は、ニアネットシェイプ化により切削工程の簡略化、歩留まりの向上が図れることや生産性の向上に寄与できる。ところが表面硬さ確保のために例えば0.48%以上のCを有する中炭素鋼が用いられる場合、球状化焼なまし状態でも冷間鍛造はなかなか困難であった。これに対し最近、冷鍛性と高周波焼入性を兼備した冷鍛・高周波焼入用鋼が開発され、自動車部品に適用されるようになった。

この一例として0.53C(0.48C)-0.05Si-0.25Mn-0.15Cr-B鋼が挙げられる⁴⁹⁾。高周波焼入性(高周波焼入時の硬化層深さ)⁵⁰⁾と冷鍛性(変形抵抗と変形能)に及ぼす合金元素の影響を検討し両者のバランスから設定されている。まず球状化焼なまし時の変形抵抗はCr>Mn=Si>Mo>Bの順で合金元素の影響を受けるため、Cr、Mn、Si量を低減した。またCr、Mnは焼入性向上元素であるが焼なまし時に炭化物中に分配されるため、高周波焼入れのような急速加熱時には炭化物の固溶が不十分となり、焼入性への寄与は必ずしも大きくない。そこで、焼入性向上元素としてBが添加されている。Bは変形抵抗を増大させることなく、著しく高周波焼入性を高める唯一の元素である。10ppm以上の添加で効果が飽和し、過剰の添加はかえって有害であるため、10~20ppmの範囲で添加している。

球状化焼なましを施した直径25mmの丸棒を高周波焼入れした場合の硬さ分布と球状化焼なまし材の圧縮試験による変形抵抗と歪みの関係を図6、7に示す。開発鋼としてC量が0.48と0.53%の2鋼種、比較鋼としてS48CとS53Cの結果

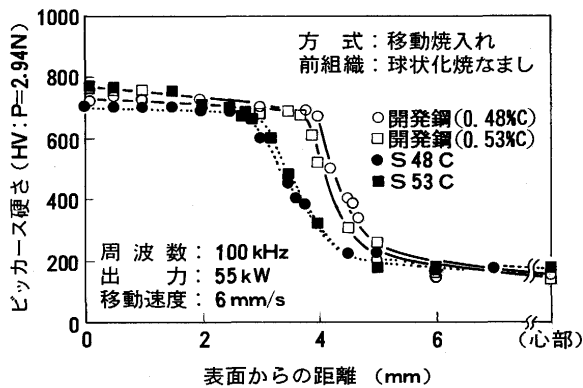


図6 冷鍛-高周波焼入用鋼の高周波焼入性

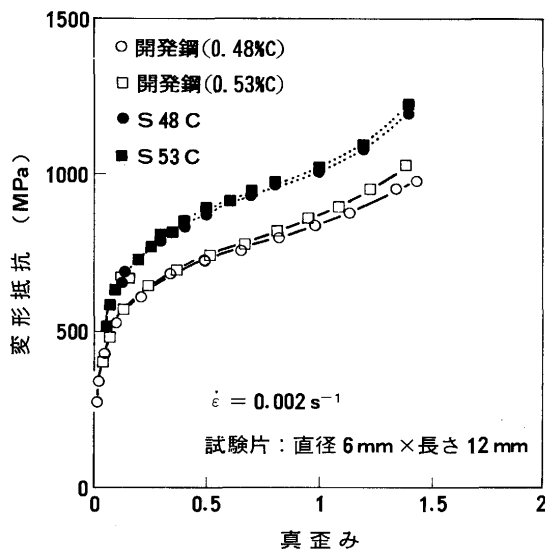


図7 冷鍛-高周波焼入用鋼の圧縮試験結果

を示してある。JIS鋼に比べHV450の得られる有効硬化層深さが深いとともに、変形抵抗は例えば真歪み0.8において約15%低下することがわかる。本鋼は等速ジョイント・アウトレースなどに実用化され、冷鍛後そのまま機械加工を施し、最後に高周波焼入れを行って製造されている⁵¹⁾。また同様に焼入性を補完する元素としてMoを使用した鋼種も開発され実用化された⁵²⁾⁵³⁾。

このように自動車の動力伝達部品としての適用が増加しているため、高周波焼入れ材の振り強さを向上させるための研究開発が活発となっている^{54)~56)}。

4・2 高周波焼入れ歯車

高周波焼入れは浸炭焼入れに比べ素材費を含んだトータルコストが安いこと、熱処理ひずみが小さいことなどの特徴があり、大型の建設機械、運搬機械等の歯車に用いられてきた。ところが品質の安定性や信頼性に欠けることから自動車用動力伝達部品にはほとんど適用されていない。特に歯車の場合、歯形に沿った焼入れ、いわゆるプロファイル焼入れが困難であるため歯車の衝撃強さが低下する難点

があった。これに対して、近年では二重周波数を用いた誘導加熱焼入れが開発され⁵⁷⁾、高負荷用歯車にも適用が可能になりつつある。二重周波誘導焼入れの方法としては、最初に低周波で、次に100~250kHzの高い周波数で加熱を行う方法と同一のコイルに異なる周波数の電圧を交互に連続あるいは断続的に印加して加熱する方法がある。

従来の全歯焼入れと比較して歯面と歯底の温度分布がより均一となること、加熱制御が容易であること、その結果、熱処理歪みが小さくなること等の特徴があり、プロファイル焼入れは精度良く達成できる水準にある。

ただし浸炭材と同等の性能を有するには一定の心部硬さを維持する必要があるため、歯車加工時の被削性が大幅に劣化するという難点がある。歯車の加工を含めてトータルのプロセス開発が今後の課題である。

5 結言

以上、自動車部品の表面硬化処理技術を中心に最近の処理技術と表面処理用鋼の動向について述べてきた。高強度化が進み、ほぼ限界に近い水準にまで達しているため、今まで以上に材料と表面硬化処理技術の組み合わせ技術が重要になると考えられる。また複合表面硬化処理技術や素材成形技術との組み合わせも必要となろう。

例えば、軟窒化と高周波焼入れの複合熱処理もその一つである。これは表層の化合物層を高周波焼入れにより固溶させ、より硬い表面層を得るとともにより深い硬化層が得られ、個々の表面硬化処理では得られない硬さプロファイルが得られるという特徴がある。

また浸炭後鍛造焼入れを行ったり、浸炭硬化層をより精密に制御した歯車の製造技術の検討も行われ、疲れ強さや衝撃強さを高める試みがなされている^{58)~60)}。

なお、新しい表面硬化処理技術の場合、大幅な材料変更も可能であり、その結果、大幅な性能向上が期待できる。前述した高Cr鋼のプラズマ高濃度浸炭などはその例である。

いっぽう表面硬化処理技術を支える種々制御技術の進歩も特筆される。技術そのものは決して新しくないショットピーニングが自動車部品の高強度化の手法として定着したのも投射技術のコンピュータ制御によるところが大きい。高周波焼入れにおいてもその温度制御システムや⁶¹⁾硬化層深さの非破壊検査技術などが開発されている⁶²⁾。これらの制御技術は単に表面硬化処理による高強度化に寄与するのみならず部品の信頼性向上に大きく貢献している。

本稿では浸炭、軟窒化など、元素の拡散、浸透をとまう処理および高周波焼入れなどの格子変態をとまう処理などについて言及してきたがCVD、PVD、イオンプレATINGなどの異種材質積層化やレーザー焼入れなどの表面改質も広い意味では表面硬化処理に含まれると考えてもよ

いであろう。今後、鉄系材料の究極の性能発掘をめざして、こうした表面硬化処理技術-材料-制御技術の複合技術開発がますます盛んとなることを期待したい。

文 献

- 1) 自動車と鋼材改訂版(鉄鋼製品普及委員会編), (1992), p.23 [鋼材倶楽部]
- 2) 内藤武志: 浸炭焼入れの実際, (1979), [日刊工業新聞社]
- 3) 市原睦夫, 各和誠市: 日本金属学会誌, **30** (1966), p.307
- 4) 市原睦夫, 各和誠市: 日本金属学会誌, **32** (1968), p.745
- 5) H.Schenck, E.Schmidmann and H.Huller: Arch. Eisenhüttenwes., **31** (1960), p.121
- 6) R.Chatterjee-Fischer: Metall. Trans. A, **9** (1978), p.1533
- 7) 中西英介, 植田秀夫, 梶浦豪二: 材料, **26** (1977) 280, p.68
- 8) T.B.Cameron, D.E.Diesburg and C.Kim: J. Met., July (1983), p.37
- 9) T.Naito, H.Ueda and M.Kikuchi: Metall. Trans. A, (1984), p.1431
- 10) 磯川憲二, 高田勝典, 加藤哲男: 熱処理, **22** (1982), p.163
- 11) 並木邦夫, 杉浦三朗, 梅垣俊造, 岡田義男, 谷意公夫: 電気製鋼, **61** (1990), p.5
- 12) 磯川憲二, 並木邦夫: 電気製鋼, **57** (1986), p.13
- 13) 石井伸幸: 熱処理, **30** (1990), p.240
- 14) 宇野光男, 平井学, 中里福和: 住友金属, **41** (1989) 2, p.35
- 15) 蟹沢秀夫, 森俊道, 奥野嘉雄: 材料とプロセス, **2** (1989), p.1981
- 16) 並木邦夫, 磯川憲二: 鉄と鋼, **72** (1986), p.2117
- 17) 並木邦夫, 飯久保知人, 斎藤誠: 鉄と鋼, **27** (1987), A175
- 18) 村井暢宏, 相原賢治: 材料とプロセス, **3** (1990), p.861
- 19) 坪田一一, 小林一博, 坂上高志: 熱処理, **23** (1983), p.193
- 20) 蟹沢秀夫, 子安善郎, 森俊道: 材料とプロセス, **4** (1991), p.1860
- 21) 並木邦夫, 磯川憲二: 日本金属学会誌, **29** (1990), p.262
- 22) 「特集/構造用鋼の現状(3)-高強度鋼」: 特殊鋼, **38** (1989) 6, p.51
- 23) 子安善郎, 蟹沢秀雄, 越智達朗, 柳瀬雅人, 高田啓督, 内藤賢一郎, 石川房雄: 日鉄技報, (1992) 343, p.30
- 24) 鈴木征四郎, 坂本和夫, 岡部功, 福住達雄, 上野英生: 三菱製鋼技報, **23** (1989) 1, 2, p.1
- 25) D.P.Townsent and E.V.Zaretsky: NASA Technical Paper, **2047** (1982)
- 26) M.D.Lawerenz: SAE Technical Paper Series, **841090** (1984)
- 27) N.K.Burrell: SAE Technical Paper Series, **850365** (1985)
- 28) Shot Peening Applications, 7th Edition, (1989), [Metal Improvement Co., Inc.]
- 29) Y.Miwa, M.Suzawa, Y.Arimi, Y.Kojima and K.Nishimura: SAE Technical Paper Series, **880666** (1988)
- 30) 久松定典: 電気製鋼, **57** (1986), p.45
- 31) 秦野敦臣, 並木邦夫: 電気製鋼, **63** (1992), p.22
- 32) 中村守文, 松島義武, 長谷川豊文, 中谷良行: R&D神戸製鋼技報, **42** (1992) 1, p.11
- 33) A.Hatano and K.Namiki: SAE Technical Paper Series, **920760** (1992)
- 34) The Proc. The Fourth International Conference on Shot Peening (The Japan Society of Precision Engineering), (1990)
- 35) 千葉昂, 藤田敬太郎, 桜木彰彦: 日本金属学会誌, **45** (1981), p.1151
- 36) 郝士明, 高山武盛, 西沢泰二: 日本金属学会誌, **45** (1981), p.1195
- 37) 阿部吉彦: 金属材料, **16** (1976), p.77
- 38) 阿久津幸一: 特殊鋼, **38** (1989), No.6, p.45
- 39) 製品紹介: 電気製鋼, **58** (1987), p.210
- 40) 木村利光, 並木邦夫: 電気製鋼, **63** (1992), p.4
- 41) 津村輝隆, 鎌田芳彦, 田ノ上修二, 大谷泰夫: 鉄と鋼, **70** (1984), p.1993
- 42) 三野匡之, 津村輝隆, 中里福和: 住友金属, **41** (1989) 4, p.35
- 43) 瓜田龍実, 飯久保知人: 鉄と鋼, **73** (1987), S458
- 44) 中村守文, 長谷川豊文, 阿部聡, 細木康博: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1871
- 45) 「特集/窒化用鋼(構造用鋼系のおすすめ)」: 特殊鋼, **41** (1992), No.6
- 46) 鈴木信一, 谷健二: 熱処理, **32** (1992), p.262
- 47) 磯川憲二, 渡辺敏幸: 日本金属学会報, **18** (1979), p.214
- 48) 三輪能久, 柴田伸成, 岡崎健, 相原賢治, 神原進: 日本金属学会報, **31** (1992), p.339
- 49) 瓜田龍実, 並木邦夫: 電気製鋼, **63** (1992), p.59
- 50) 瓜田龍実, 並木邦夫: 電気製鋼, **61** (1990), p.14
- 51) K.Namiki, T.Urita, I.Machida and T.Takagi: SAE Technical Paper Series, **930965** (1993)
- 52) 星野俊幸, 天野虔一, 中野昭三郎, 田畑綿久: 材料とプロセス, **4** (1990), p.817
- 53) 星野俊幸, 天野虔一, 田畑綿久, 町田功, 高木武, 嵯峨正芳: 材料とプロセス, **5** (1992), p.845
- 54) 越智達朗, 子安善郎: 材料とプロセス, **5** (1992), p.844
- 55) 越智達朗, 子安善郎: 材料とプロセス, **5** (1992), p.1971
- 56) 城戸弘, 白神哲夫, 平坂正人: 材料とプロセス, **5** (1992), p.1970
- 57) 松原洋一, 熊川誠, 渡辺康男: 熱処理, **29** (1989), 92
- 58) 伏見慎二, 島村三郎: 鉄と鋼, **78** (1992), p.109
- 59) 伏見慎二, 谷意公男, 吉岡英夫, 小林正敏: 鉄と鋼, **78** (1992), p.1721
- 60) 伏見慎二, 谷意公夫: 熱処理, **30** (1990), p.259
- 61) 渡辺敏幸, 樋口鐵也: 熱処理技術協会第31回講演大会概要(1990), p.69
- 62) 遠藤敏夫, 八木富一, 高田健一: 日本金属学会報, **30** (1991), p.442