高濃度浸炭焼入れ歯車の負荷能力に関する研究*

坪倉 公治^{*1}, 小出 隆夫^{*2}, 小田 哲^{*3}

Study on Load Bearing Capacity of Super-Carburized Gears

Koji TSUBOKURA^{*4}, Takao KOIDE and Satoshi ODA^{*4} Matsue National College of Technology,
14-4 Nishiikuma-cho, Matsue-shi, Shimane, 690-8518 Japan

This paper presents a study on the load bearing capacity of super-carburized gears. Test gears and rollers of MAC14 and SCM415 steel were super-carburized or eutectoid-carburized under different carburizing conditions. The bending fatigue and contact fatigue tests were carried out for these test specimens. The effects of case depths on the bending fatigue strength of gears and contact fatigue strength of rollers were determined. The bending fatigue strength of super-carburized gear was found to be almost equal to that of eutectoid-carburized gears. The contact fatigue strength of super-carburized roller becomes larger with an increase of case depth and is larger than that of eutectoid-carburized rollers in the case of larger case depth. The surface failure modes for super- and eutectoid-carburized rollers were spalling. The load bearing capacity of super- and eutectoid-carburized gears was found to become larger by shotpeening.

Key Words: Gear, Roller, Load Bearing Capacity, Super-Carburizing, Eutectoid-Carburizing, Bending Fatigue Strength, Contact Fatigue Strength, Surface Durability, Shot-Peening

1. 結 言

従来、機械部品の多くは浸炭焼入れによってその耐摩耗性や疲労強度を改善させているが、近年これらをさらに向上させる方法として、表面近傍の炭素量を従来の浸炭焼入れ法よりも多くしてマルテンサイトのマトリックスに粒状の炭化物を生成、分散させる高濃度浸炭焼入れ法が開発されている⁽¹⁾。高濃度浸炭焼入れを施した材料の疲労強度については、一般的形状の試験片に対する報告⁽²⁾⁽³⁾はあるが、実際の機械部品に対する研究は極めて少なく⁽⁴⁾、特に高濃度浸炭焼入れにおける硬化層厚さが疲労強度に及ぼす影響についての研究は見当たらない。

本研究では、高濃度浸炭用鋼材と一般の浸炭用鋼材を用いて製作した、硬化層厚さの異なる高濃度浸炭および共析浸炭焼入れ歯車に対して、衝撃および曲げ疲労試験を行って、これらの歯車の衝撃および曲げ疲労強度について明らかにしている。つぎに、これらの歯

車にショットピーニングを施した歯車に対して曲げ疲労試験を行い、曲げ疲労強度に及ぼすショットピーニングの影響についても明らかにしている。さらに、高濃度浸炭焼入れ歯車の面圧強度を調べるための基礎研究として、硬化層厚さの異なる高濃度浸炭および共析浸炭焼入れローラに対して二円筒試験を行い、ローラの面圧強度に及ぼす高濃度浸炭、ショットピーニングの影響などについても検討を加えている。

2. 実験方法および実験装置

2・1 歯車の衝撃および曲げ疲労試験

2・1・1 試験歯車 本実験に用いた歯車材料は、高濃度浸炭用鋼 MAC14⁽⁵⁾と一般の浸炭用鋼 SCM415 で、化学成分を表 1 に示す。試験歯車は、これらの材料をホブ切り加工後、表 2 に示す条件で熱処理を行ったもので、モジュール $m=4$ 、基準圧力角 $\alpha=20^\circ$ 、歯数 $z=18$ 、歯幅 $b=10\text{mm}$ の標準平歯車である。すべての MAC14 歯車と一部の SCM415 歯車 (SH2) に対しては高濃度浸炭を、その他の SCM415 歯車に対しては共析浸炭を

* 原稿受付 2001 年 3 月 26 日。

^{*1} 正員, 松江工業高等専門学校(☎ 690-8518 松江市西生馬町 14-4)。^{*2} 正員, 鳥取大学工学部(☎ 680-8552 鳥取市湖山町南 4-101)。^{*3} 正員, 福山大学工学部(☎ 729-0292 福山市学園町 1 三蔵)。

E-mail: tsubo@me.matsue-ct.ac.jp

Table1 Chemical composition

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
MAC14	0.14	0.27	0.50	0.017	0.024	0.08	0.12	2.49	0.38
SCM415	0.16	0.30	0.79	0.20	0.16	0.17	0.08	1.14	0.17

施した。表 2 中の S2P1, M2P1 はショットピーニング条件 1 (ショット粒径 0.30mm), S2P2, M2P2 は条件 2 (粒径 0.60mm) のショットピーニングを施したものである。ショット粒の硬さは $H_{RC}=60$ である。アークハイト値は、条件 1, 2 に対してそれぞれ 0.31mmA, 0.72mmA (アルメンストリップ A スケール) である。ショットピーニング後の歯車の加工は行っていない。M2, S2 に対しては表面を電解研磨した場合 (それぞれ M2EP, S2EP と表す) についても曲げ疲労試験を行った。図 1 は、試験歯車の硬さ分布を示す。図 1 より、高濃度浸炭歯車 (M1~M3) の表面硬さは、共析浸炭歯車 (S1~S3) の場合より 13% 程度増加することおよびいずれの歯車においてもショットピーニングを施すことにより、表面硬さがそれぞれ 4~15% 程度増加することがわかる。

図 2 は、試験歯車の表面近傍の断面 SEM 写真を示す。図 2 より、高濃度、共析浸炭いずれの場合も表面から約 15 μ m までの範囲に粒界酸化による異常層が認められることおよび高濃度浸炭焼入れを施した場合 (M2, SH2) は、表面近傍に微細な炭化物が析出していることがわかる。

2.1.2 衝撃試験 衝撃試験は、重りを所定の高さまで持ち上げ、自然落下させ、負荷伝達棒を介して歯車の歯に衝撃荷重を作用させる歯車衝撃試験装置⁽⁶⁾を用いて行った。

2.1.3 曲げ疲労試験 曲げ疲労試験は、ディーゼル機関用燃料噴射ポンプを利用した油圧式曲げ疲労試験機⁽⁷⁾を用いて、片振り応力条件下 (最小応力: 零) で行った。荷重繰返し速度は毎分 700 回である。

2.2 二円筒試験

2.2.1 試験ローラ 試験ローラの形状・寸法を

図 3 に示す。材料、熱処理条件およびショットピーニング条件は、歯車の場合と同様で、表 2 に示すとおりである。ローラは、いずれも浸炭焼入れ後研削仕上げを行っているが、ショットピーニング後は研削は行っていない。軸方向表面粗さ R_a は、ローラ RS2P2, RM2P2 が 2 μ m 程度、その他のローラでは 1.5 μ m 程度である。また、ローラの硬さ分布は、歯車の場合とほぼ同様である。

2.2.2 面圧疲労試験 面圧疲労試験は、油圧式

(a) MAC14

(b) SCM415

Fig.1 Hardness distributions of test gears

Table2 Heat treatment condition

Gear (Roller) sign	Material	Heat treatment	Carburizing Time t_c	Effective case depth d mm	Surface Hardness Hv
M1 (RM1)	MAC14		2 h 50 min	0.60 (0.50)	835 (800)
M2 (RM2)			4 h 30 min	1.10 (1.04)	840 (810)
M2P1 (RM2P1)*				1.23 (1.03)	875 (860)
M2P2 (RM2P2)**				1.13 (0.98)	890 (870)
M3 (RM3)			7 h 40 min	1.48 (1.38)	820 (824)
SH2 (RSH2)	SCM415		4 h 30 min	1.05 (0.93)	730 (700)
S1 (RS1)			2 h 40 min	0.68 (0.68)	740 (760)
S2 (RS2)			5 h	0.99 (0.85)	745 (760)
S2P1 (RS2P1)*				0.98 (0.84)	820 (860)
S2P2 (RS2P2)**				0.90 (0.82)	850 (880)
S3 (RS3)			8 h	1.49 (1.26)	735 (765)

(): Roller, *: Shot-peened (arc hight 0.31 mmA), **: Shot-peened (0.72 mmA)

二円筒試験機⁸⁾を用いて行った。回転速度、すべり率は、低速 (L) ローラでそれぞれ 1000rpm, -23.8%, 高速 (H) ローラで 1238rpm, +19.2% である。潤滑は軸受油を用い、油温 313K, 油量 0.4L/min で強制潤滑した。

2・2・3 摩耗試験 摩耗試験は、面圧疲労試験と同じ試験機を用いて押付荷重 $P=15\text{kN}$ の下で行い、適当な繰返し数 N において試験ローラの質量を測定し、密度を用いて摩耗体積を求めた。

3. 実験結果および考察

3・1 衝撃および曲げ疲労強度に及ぼす硬化層厚さと高濃度浸炭焼入れの影響 図 4 は、試験歯車に対して衝撃試験を行ったときの衝撃破壊限度エネルギー⁶⁾と有効硬化層厚さとの関係を示す。衝撃破壊限度エネルギーは、1回の衝撃荷重によって歯車が破壊しない最大の衝撃エネルギーである。図 4 より、衝撃破壊限度エネルギーは、いずれの有効硬化層厚さの場合も、高濃度浸炭歯車のほうが共析浸炭歯車の場合より

も 15% 程度大きいことがわかる。このことから、高濃度浸炭歯車は、共析浸炭歯車よりもじん性が大きいものと考えられる。また、衝撃破壊限度エネルギーは、いずれの歯車の場合も、有効硬化層厚さの増加につれて直線的に減少する。これは、歯車のぜい性が硬化層厚さの増加につれて増加することによって考えられる。

図 5 は、硬化層厚さが異なる MAC14 高濃度浸炭歯車 (M1~M3) および SCM415 共析浸炭歯車 (S1~S3) に対する曲げ疲労試験結果を、図 6 は、曲げ疲労限度荷重 P_b , 表面硬さ H_v と有効硬化層厚さ d の関係を示す。図 5, 6 より、高濃度および共析浸炭歯車の曲げ疲労限度は、 d が 1mm 付近でともに最大値を示し、曲げ疲労強度に対してはいずれの処理においても最適硬化層厚が存在することがわかる。また、高濃度浸炭歯車と共析浸炭歯車の曲げ疲労限度はほぼ同じである。このように高濃度浸炭焼入れを施しても歯車の曲げ疲労強度が増大しないのは、次のような理由によって考えられる。高濃度浸炭焼入れによって歯車の表面近傍に析出炭化物が形成され、この炭化物は残留オー

Fig.2 Photographs of critical cross section of gear tooth by SEM

Fig.3 Shapes and dimension of test rollers

Fig.4 Relation between impact breaking limit energy and effective case depth

ステナイトの機械的安定化に作用する⁽⁹⁾ため、この析出炭化物周辺の基地組織中に安定化した残留オーステナイトが存在すると考えられる。この安定化した残留オーステナイトがき裂の起点となるため、高濃度浸炭焼入れを施しても曲げ疲労強度が増大しないものと考えられる⁽³⁾。

一般に浸炭焼入れ処理では表面に異常層を生じ、この異常層は機械的性質が劣るので曲げ疲労強度を低下させると考えられ、共析浸炭歯車においてはこの表面異常層を除去することによって疲労強度を向上できることが知られている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

図7は、歯元危険断面付近を電解研磨することによって表面異常層を削除したM2EP, S2EP(図2参照)に対する曲げ疲労試験結果を示す。図7より、高濃度浸炭、共析浸炭歯車ともに異常層を削除した場合の曲げ疲労限度が、異常層がある場合より10%程度増大していることがわかる。このことから、高濃度浸炭歯車

に対しても表面の異常層が疲労限度低下要因となることがわかる。

図8は、歯車S2, SH2, M2の P_n と N の関係を示す。図8より、SCM415高濃度浸炭歯車(SH2)の P_u は、SCM415共析浸炭歯車(S2)、MAC14高濃度浸炭歯車(M2)の場合より10%程度小さくなっている。これより、一般の浸炭用鋼に高濃度浸炭焼入れを施しても曲げ疲労強度に対しては、効果がないものと考えられる。高濃度浸炭焼入れを施した場合の疲労強度は、炭化物間距離の影響を受け、炭化物間距離の増加につれ

(a) MAC14

(b) SCM415

Fig.5 Bending fatigue test results

Fig.6 Effect of effective case depth on bending fatigue limit load

Fig.7 Bending fatigue test results (M2, M2EP, S2, S2EP)

Fig.8 Bending fatigue test results (M2, S2, SH2)

(a) MAC14

(b) SCM415

Fig.9 Contact fatigue test results

て低下すると考えられており⁽³⁾, SH2 の表面近傍における炭化物の析出状態は M2 よりも粗であるため (図 2 参照), SH2 の曲げ疲労強度が低下したものと考えられる。

3.2 面圧疲労強度に及ぼす硬化層厚さと高濃度浸炭の影響 図 9 は, 硬化層厚さの異なる MAC14 高濃度浸炭ローラ (RM1~RM3) および SCM415 共析浸炭ローラ (RS1~RS3) に対するヘルツ応力 σ_H と繰返し数 N の関係を, 図 10 は, 面圧疲労限度 σ_{Hu} と有効硬化層厚さ d の関係を示す。損傷は, いずれのローラも幅の狭い L ローラのほうに生じ, スポーリングが支配的であった。図 9, 10 より, 高濃度浸炭および共析浸炭ローラのいずれにおいても, σ_{Hu} は d の増加につれて増大する傾向を示すが, その程度は RS よりも RM のほうが大きく, $d \leq 1\text{mm}$ の場合には, RS と RM の差は小さいが, $d=1.5\text{mm}$ 程度になると RM のほうが 15% 程度高くなる。これは, RM の表面にある微細な炭化

物が, d の増加につれて増大することによると考えられる。これらのことから, 曲げ疲労強度に対しては高濃度浸炭の効果は認められなかったが, 面圧疲労強度に対しては硬化層厚さが大きい場合には, かなりの効果が期待できるものと考えられる。

図 11 は, ローラ RS2, RSH2, RM2 の σ_H と N の関係を示す。SCM415 高濃度浸炭ローラ RSH2 の σ_{Hu} は, 曲げ疲労限度の場合と同様に, MAC14 高濃度浸炭ローラ RM2, SCM415 共析浸炭ローラ RS2 の場合よりも小さい。これらのことより, 面圧疲労強度の場合においても, 曲げ疲労強度の場合と同様に, 一般の浸炭用鋼に高濃度浸炭焼入れを施しても効果があまり期待できないものと考えられる。したがって, 面圧疲労強度においても高濃度浸炭焼入れの効果を十分に得るためには, 一般の浸炭用鋼ではなく, 高濃度浸炭用鋼を用い, さらに適切な硬化層厚さ ($d \geq 1.5\text{mm}$) を選択する必要がある。

3.3 曲げ・面圧疲労強度に及ぼすショットピーニングの影響 図 12, 13 は, ショットピーニングを施した歯車およびローラに対するアークハイト h と曲げ疲労限度荷重 P_u , 面圧疲労限度 σ_{Hu} , 表面硬さ H_v の関係を, 縦軸に P_u/P_{u0} , σ_{Hu}/σ_{Hu0} (P_{u0} , σ_{Hu0} : ショットピーニングを施さない場合の曲げ, 面圧疲労限度) と H_v をとって示す。図 12 より, 高濃度, 共析浸炭歯車のいずれの場合も, P_u は h の増加につれて増大する傾向を示し, 適切なショットピーニングを施すことに

Fig.10 Effect of effective case depth on surface durability

Fig.11 Contact fatigue test results (RM2, RS2, RSH2)

Fig.12 Effect of arc height on bending fatigue limit load

Fig.13 Effect of arc height on surface durability

Fig.14 Relation between amount of wear and number of load cycles

より、 P_u を20%程度増大させることが可能であることがわかる。また、図13より、高濃度、共析浸炭ローラのいずれにおいても、 σ_{Hu} は h の増加につれて増大する傾向を示し、ショットピーニングにより σ_{Hu} を5~10%程度増大させることが可能であることがわかる。

3・4 摩耗試験結果 図14は、試験ローラ RM2, RSH2, RS2 における摩耗量 v (mm³)と繰返し数 N の関係を示したものである。図14より、摩耗量はRM2が最も小さく、RSH2, RS2の順に大きくなることがわかる。このことから、高濃度浸炭ローラの耐摩耗性は共析浸炭ローラよりも高いことおよび一般浸炭用鋼材に高濃度浸炭を施しても、曲げおよび面圧疲労強度には効果が期待できないが、摩耗に対しては多少効果があることがわかる。

4. 結 言

本研究で明らかになった諸点を要約すると次のようになる。

- (1) 衝撃破壊限度エネルギーは、いずれの有効硬化層厚さの場合も、高濃度浸炭歯車のほうが共析浸炭歯車の場合よりも15%程度大きい。
- (2) MAC14 高濃度浸炭歯車の曲げ疲労強度は、SCM415 共析浸炭歯車の場合とほぼ同じになり、曲げ疲労強度に対する高濃度浸炭焼入れの効果は小さい。
- (3) 高濃度および共析浸炭歯車のいずれにおいても、曲げ疲労強度に対しては最適硬化層厚さ(1mm程度)が存在するが、面圧疲労強度については存在せず、硬化層厚さの増加につれて単調に増大する。
- (4) MAC14 高濃度浸炭ローラの面圧疲労限度は、有効硬化層厚さが小さい場合には、SCM415 共析浸炭ローラの場合とあまり変わらないが、有効硬化層厚さが大きい場合には高濃度浸炭ローラのほうが高くなる。
- (5) 曲げ疲労、面圧疲労強度のいずれに対しても、高濃度浸炭焼入れの効果を得るためには高濃度浸炭用鋼材を用いる必要がある。
- (6) 高濃度および共析浸炭歯車の曲げ疲労および面圧疲労限度は、適切なショットピーニング条件を選ぶことによりそれぞれ20, 5~10%程度増大する。

(7) 高濃度浸炭ローラの耐摩耗性は、共析浸炭の場合よりも高い。

最後に、本研究を行うに当たり実験および資料整理に熱心に協力された鳥取大学文部科学技官・難波千秋氏、試料作製にご協力いただいた元 同和鋳業(株)・岩野利彦氏ならびに三菱製鋼(株)・岡部 功氏に対し厚くお礼申し上げる。

文 献

- (1) 内藤武志・木林靖忠・中村浩三, 高濃度浸炭の技術, 熱処理, 26-2, (1986), 157-162.
- (2) 秋葉義明・原田昭治・岩野利彦・山田修司・松岡秀樹, 疲労強度に及ぼす浸炭条件の影響, 機論, 59-564, C(1993), 1827-1833.
- (3) 瓜生英樹・黒島義人・原田昭治, 高濃度浸炭鋼の疲労特性に及ぼす析出炭化物の影響, 機論, 61-590, A(1995), 2109-2114.
- (4) 永村和照・池条清隆・志賀 隆・岩野利彦, 高濃度浸炭鋼歯車の曲げ強度, 機構論, No.965-1(1996), 231-232.
- (5) 三菱製鋼(株), 三菱製鋼の特殊用途鋼 MAC14 カタログ.
- (6) 坪倉公治・小田 哲・小出隆夫, 低温化における浸炭焼入れ歯車の曲げ疲労強度に及ぼす衝撃荷重の影響, 機論, 63-609, C(1997), 1783-1787.
- (7) 会田俊夫・小田 哲・中島利勝, 歯車の曲げ疲れ強さに関する研究(第1報, 疲れ過程における歯元すみ肉部の組織と残留応力変化), 機論, 32-233, (1966), 137-142.
- (8) 小田 哲・小出隆夫・安藤順一, 調質鋼ローラの面圧強度に及ぼす荷重変動の影響, 機論, 50-457, C(1984), 1639-1646.
- (9) H. J. Neuhauser and W. Pitsch, Acta. Met, 19(1971), 337.
- (10) 柳晟基・井上克巳・加藤正名・大西昌澄・下田健二, 浸炭歯車の曲げ疲労強度に及ぼす表面処理の影響, 機論, 60-572, C(1994), 1391-1396.
- (11) 小田 哲・小出隆夫・松井光次・山本 謙, 浸炭焼入れ歯車の曲げ疲労強度に及ぼす粒界酸化の影響, 機論, 54-501, C(1988), 1135-1139.