研 究

鉄系焼結合金歯車の転造による高精度化・高強度化 —第3報—
修整歯形工具による鉄系焼結合金歯車の歯元曲げ疲労強度向上三浦 秀士^{☆1}, 津守不二夫^{☆1}, 竹増 光家^{☆2}, 河本 浩介^{☆3}, 浜本 昭太^{☆3}, 宇波 繁^{☆4}^{☆1}九州大学大学院工学研究院機械工学部門, 〒819-0395 福岡市西区元岡 744.^{☆2}諏訪東京理科大学システム工学部機械システムデザイン工学科, 〒391-0292 茅野市豊平 5000-1.^{☆3}九州大学大学院工学府知能機械システム専攻, 〒819-0395 福岡市西区元岡 744.^{☆4}JFE スチール株式会社スチール研究所, 〒260-0835 千葉市中央区川崎町 1.Development of High Precision and Strength Sintered Ferrous Alloy Gear by Rolling –3rd Report–
Improvement of Tooth Root Bending Fatigue Strength of Sintered Ferrous Alloy Gear
by Modified ToolHideshi Miura^{☆1}, Fujio Tsumori^{☆1}, Teruie Takemasu^{☆2}, Kosuke Komoto^{☆3},
Shota Hamamoto^{☆3} and Shigeru Unami^{☆4}^{☆1}Dept. Mechanical Engineering, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan.^{☆2}Dept. Mechanical and Systems, Tokyo University of Science, Suwa, 5000-1 Toyohira, Chino 391-0292, Japan.^{☆3}Dept. Intelligent Machinery and Systems, Graduate School of Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan.^{☆4}JFE Steel Corporation, Steel Research Laboratory, 1 Kawasaki-cho, Chuo-ku, Chiba 260-0835, Japan.

Received February 2, 2010

SYNOPSIS

Surface finish rolling experiments were carried out using P/M spur gears of 0.6Mo–0.2Mn pre-alloyed sintered steel and of 0.8Mo–0.2Mn partially alloyed sintered steel with the density of 7.10 Mg/m³. A CNC form rolling machine of axis intersection type was employed, and a modified screw-shaped rolling tool was prepared: the modified concave tooth profile optimized by numerical tooth profile analysis for simultaneous rolling of tooth and fillet surface. Then, porosity distributions in the surface layer of rolled gear teeth were determined and the effects of the amount of tool radial feed R_0 on the selective surface densification behaviors were evaluated. Besides, single tooth bending fatigue test was conducted. Gears with good tooth profiles were obtained by using the modified tools. As a result, the porosities in both the tooth flank and the fillet at the root were reduced to the target level at $R_0 = 600 \mu\text{m}$ in simultaneous rolling process. Furthermore, the single tooth bending fatigue durability was much improved to about 60% of the case hardened wrought steel gears of SCM415.

KEY WORDS

finish rolling, P/M gears, screw-shaped tool, surface densification, fatigue strength

1 緒 言

焼結合金鋼歯車(以下, P/M 歯車と称す)は, 溶製材歯車に比べて安価かつ高能率で製造できるため, 中負荷, 軽負荷の部品は既にほとんどが P/M 歯車に置き換わっている。ただ, 焼結後の P/M 歯車には素材全体に気孔が多数存在するため強度が不足し, 精度も十分ではない。この欠点を解消するために, 実際の生産現場では仕上げ転造が多用されている。転造により歯表面層を局部的に緻密化することで, 高コストパフォーマンスで歯車強度の向上と歯形精度や歯面粗さの改善ができるためであり, この方法を用いれば, 溶製材に匹敵する性能の歯車を従来の 3/4 程度のコストで製造できるとの予測もされている¹⁾。ところで自動車用トランスミッション等

に用いられる歯車の疲労破壊形態としては, 面圧疲労から生じるピッチングやスポーリングのほか, 曲げ疲労から生じる歯の折損等が挙げられている。溶製歯車に対しては, 近年の浸炭焼入れ技術の発展により, 曲げよりも面圧による疲労破壊が問題視されているが, 一方の P/M 歯車においては, 高負荷用としては面圧や曲げの両面で疲労強度が不足しており, これらの強度の向上が求められている。そこで, 歯面・歯元の同時転造により, 両者の強度を大幅に向上させることができれば, 焼結転造という加工プロセスの実用性は一層高まるものと予想される。

筆者らはねじ状工具を用いる仕上げ転造法により, P/M 歯車の高精度化と高強度化に取り組んできた²⁻⁸⁾。第1報⁷⁾およ

び第2報⁸⁾に示したように, 独自に開発した数値歯形解析法を用いて修整工具歯形を最適化することにより, 転造後の歯形精度は新JIS3~4級程度まで改善でき, 熱処理を施していない段階では歯元曲げ疲労強度も70%向上した. これらの研究成果をもとに, 前報⁸⁾で用いた高強度用素材のMo-Mn系完全合金化粉, およびさらなる高強度化を目指して開発されたハイブリッド型部分拡散合金化粉⁹⁾から作られたP/M歯車の転造材に浸炭焼入れを施し, それぞれ歯元曲げ疲労試験および破壊形態の評価を行ったので, それらの結果を以下に示す.

2 試料及び実験方法

2.1 試料

本実験で用いた2種類の焼結素材(素材Aおよび素材Bと呼ぶ)の組成をTable 1に, それらの特性をTable 2に各々示す. また, それらの素材から作られたP/M歯車の諸元をTable 3に, 歯車素材の外観写真をFig.1に示す. 素材Aの原料粉末はFe-0.60Mo-0.20Mn[mass%]完全合金化粉, 素材Bの原料粉末は素材Aの合金粉末に0.20Mo[mass%]を拡散付着させたハイブリッド型部分拡散合金化粉である. それぞれ冷間成形, 焼結により, 密度7.1 Mg/m³, 炭素量0.4 mass%の円盤状焼結体を製造し, ブランク材を削り出した後に非修整歯形ホブによるホブ切りで歯車(Fig.1)を製作した.

2.2 実験方法

歯車転造の方式は, 工具の形状によって主にラック形, ピニオン形, ねじ形の3種類¹⁰⁾, 工具や素材の相対運動によって主にプランジ式とスルーフィード式の2種類に大別される¹¹⁾. 本報ではねじ状工具を用い, プランジ式とスルーフィード式の組み合わせ方式である軸交差式仕上げ転造法を前報^{7,8)}に引き続き採用した. 実験に用いた軸交差式CNC転造盤の模式図をFig.2に, 転造加工中のねじ状工具とP/M歯車のかみ合い状態をFig.3に各々示す. この方式の特徴として, ねじ状工具

Table 3 Dimensions of PM spur gears.

Module [mm]	m	3
Pressure angle [deg]	α	20
Number of teeth	z	26
Face width [mm]	b	10

Fig.1 A sample of P/M spur gear preform.

Fig.2 Schematic of experimental apparatus.

Table 1 Compositions of PM materials.

Material	Compositions [mass%]				
	Prealloy			Partially alloy	
	Fe	Mo	Mn		
A	Bal.	0.60	0.20	—	0.40
B	Bal.	0.60	0.20	0.20	0.38

Table 2 Properties of PM materials.

Material	Compaction pressure [MPa]	Sintering condition	Carbon content [mass%]	Mean density [Mg/m ³]	Porosity [%]	Young's modulus [GPa]	Hardness [HRB]
A	608	1473 K	0.40	7.10	10	145	60.2
B	580	×2.7 ks	0.38				68.0

を用いることで加工力が比較的小さく、剛性が高められるため精度を向上できること、工具の取り付け角を変えることで任意のねじれ角の歯車を転造できること、転造可能な歯幅の範囲が広いことなどが挙げられる。

ねじ状工具は数値歯形解析により最適化された中凹歯形をもつ修整工具(QE13と称す)を用いた。その工具歯形をFig.4に示す。この修整は歯面だけでなく、Hoferの30°接線に基づく歯元フィレット部の危険断面付近の緻密化も1回の転造工程で行い、曲げ疲労強度の改善を同時に図るためである。また、QE13の修整歯形はP/M 歯車の転造歯形が歯先から歯元までほぼ平坦になるよう設計されている。いずれも右ねじ一条工具であり、材質はSKH51、耐焼付き性を高めるためにTiNコーティングを施している。なお、工具の半径方向押込み量は、標準の非修整歯形をもつP/M 歯車に対して最大約750 μm である。

基本的加工条件として、工具の半径方向押込み量は1回の転造工程で50~150 μm 、工具回転数180rpm、送り速度6mm/minで一定とした。潤滑油には鋼板用プレス加工油(出光興産㈱製冷間圧延用鋇油ダフニープレスドロ―LF7)を用いた。転造後の歯形及び歯すじ形状は歯車試験機(浜井産業㈱製5LD)により測定した。また、転造後に歯を切り出して樹脂埋めをし、光学顕微鏡写真から画像解析により転造面付近の気孔率測定を行い、転造条件による気孔率分布の違いを比較検討した。

Fig.3 Configuration of tool and gear installed in apparatus.

Fig.4 Tooth profile of screw-shaped tool QE13.

さらにFig.5に示す歯元曲げ疲労試験機を用いて、素材A,Bの工具QE13で転造した歯元曲げ疲労強度を評価し、破壊形態の観察を行った。試験は日本歯車工業会規格(JGMA 4101-01)に準拠した方法で行った。

3 実験結果及び考察

3.1 表面層緻密化特性

転造後の歯面近傍の気孔率に関しては、Fig.6に示す両歯面のピッチ点付近ならびにHoferの30°接線付近を測定した。ここで、加工時にねじ状工具の噛み込む駆動側となる歯面はドリブン、反対の連れ回り従動側歯面はフォローと定義されており¹²⁾、また気孔率が2%以下となっている表面からの深さを一般に緻密深さと定義されているため¹³⁾、これらの定義を用いて評価を行った。

Fig.5 View of the tooth root bending fatigue testing machine.

Fig.6 Polosity measuring areas.

前報⁸⁾でドリブン・フォロワでの気孔率の差異が少ないことを既に確認しているため、Fig.7にはフォロワ側の気孔率のみを示す。気孔率は素材A, Bについてそれぞれ転造時の工具半径方向押込み量 R_0 が $450\mu\text{m}$, $600\mu\text{m}$ の2条件について評価した。結果として、素材による緻密化度合いの違いはあまり見られなかった。いずれの素材においても、 R_0 が $450\mu\text{m}$ のとき、ピッチ点の緻密化深さが 0.4mm 、歯元の緻密化は不十分

であり、 R_0 が $600\mu\text{m}$ のとき、ピッチ点付近は 0.6mm 、歯元は 0.3mm の緻密化深さが得られた。このことから、 R_0 が $600\mu\text{m}$ の転造材について特に歯元曲げ疲労強度の向上が見込まれるため、次節3.3では未転造材と $R_0=600\mu\text{m}$ の転造材について歯元曲げ疲労試験を実施した。

3.2 転造歯形

Fig.8に素材Bのホブ切り直後の未転造歯車の歯形・歯すじ

Fig.7 Distributions of porosity in surface layers.

Fig.8 Tooth profile and lead deviation of as-hobbed and rolled gears.

曲線、および工具 QE13 により $R_0 = 450\mu\text{m}$, $600\mu\text{m}$ で転造した場合の歯形・歯すじ曲線を示す。なお、前報⁸⁾に示した通り素材 A の場合もほとんど同様の結果となった。まず転造後の素材の歯形について、狙いどおりドリブン側では R_0 に関わらず非常に平坦で正しいインボリュートに近い歯形に、フォロー側はピッチ点付近が $5\mu\text{m}$ 程度局部的に中凸であるが、全体的にはほぼ平坦となった。これは工具修正量が若干大きすぎたためである。歯形精度はドリブンでいずれの R_0 でも新 JIS3 級、フォローで $R_0 = 450\mu\text{m}$ のとき新 JIS4 級、 $R_0 = 600\mu\text{m}$ のとき新 JIS6 級と目標精度をほぼ満足している。歯すじに関しては両歯面とも問題となるような大きなダレはなく、両歯面にほぼ同等な $20\mu\text{m}$ 程度のクラウニングライクな丸みはあるものの、全体的には平坦で目標精度を満足している。以上の結果より、修整工具を用いることにより歯形精度を向上させることができることが示された。また、さらなる高精度化と十分な緻密化を同時に達成するためには、工具形状の最適化が必要であると考えられる。

3.3 歯元曲げ疲労強度

素材 A, B の未転造材を AS (As-Sintered), QE13 で $600\mu\text{m}$ 押し込み転造した素材を SD (Surface Densified) とし、それらの未熱処理材と浸炭焼入れを施した素材の歯元曲げ疲労強度を比

較した。浸炭処理を施した素材は、全硬化層深さ (TCD: Total Case Depth) を 0.6 mm としたものを CD0.6 (Case Depth 0.6 mm), 1.2 mm としたものを CD1.2 とした。さらに、比較のため SCM415 溶製材に浸炭焼入れを施した素材の試験も行った。浸炭処理条件については Fig.9 に示す。Pattern A は TCD 0.6 mm , Pattern B は TCD 1.2 mm の条件である。硬さ分布は素材 A, B で違いはほとんどなかったため、素材 B の硬さ分布を Fig.10 に示す。歯元曲げ疲労試験は日本歯車工業会規格 (JGMA 4101-01) に準拠した Table 4 に示す条件で行っている。但し、試験を行ったのは歯元曲げ疲労強度が比較的劣っていたフォロー側歯面のみである。

歯元曲げ疲労試験結果を Fig.11 に示す。まず SCM415 浸炭溶製材の曲げ疲労強度が 1500 MPa であるのに対し、素材 B の未転造材では 370 MPa と大きく劣っていることがわかる。しかし QE13 で転造を施すことによって、素材 A, B とも 580 MPa と約 1.6 倍に疲労強度が向上、未転造材に浸炭処理を施した素材では 730 MPa と約 2 倍に、さらに転造と浸炭処理を施した素材では 920 MPa と約 2.5 倍にまで向上しており、浸炭溶製材の約 60% の疲労強度を示した。本実験で用いた SCM415 浸炭材には及ばなかったが、従来の浸炭溶製材の $0.9\sim 1.2\text{ GPa}$

Fig.9 Heat patterns of case hardening.

Fig.10 Hardness profiles of case hardened P/M steels and SCM415.

Table 4 Tooth root bending fatigue test conditions.

Number of stride teeth	4
loading position	1.0mm from tooth tip
wave pattern	Sine wave
Vibration frequency	30Hz
Minimum load (Pre-loading)	0.5% of Maximum load
Spoilage determination	Breakage
Close out cycle	3×10^6

Fig.11 Tooth root bending fatigue test results.

と同程度の疲労強度を得ることができた。ところでFig.11には示していないが、P/M材の浸炭処理は素材A、Bの転造材おののに対してTCD 0.6 mm, 1.2 mmの両条件で施し、疲労試験を実施したが、いずれの場合においてもS-N線図はほぼ一致した。浸炭溶製歯車については、歯元曲げ疲労強度が心部硬さ、表面硬さ、圧縮残留応力ではほぼ決まることが知られており¹⁴⁾、焼結材においても同様に、硬化層深さが変わっても内部・表面の硬さと転造による圧縮残留応力が同等であれば疲労強度は変わらないことが示された。また低サイクル衝撃疲労特性に関しては、有効硬化層深さが浅い方が良いことが知られており¹⁵⁾、その面では本実験で用いた素材ではTCD 0.6 mmの素材の方が適していると考えられる。

3.3 歯元曲げ疲労破壊特性

歯元曲げ疲労試験にて折損した部分の破断面の形状を測定し、破壊起点の評価を行った。素材Bについて破面形状をFig.12に示す。素材Aについては同様の傾向であったため省略した。破壊起点は図中のCI (Crack Initiation)で示している。これより、ほとんどの条件でHoferの30°接線付近から求められる危険断面付近で折損していることがわかるが、TCD 1.2 mmの条件のみ危険断面からかなり歯先側に起点が移動している。この素材の未試験の歯の断面部の観察結果をFig.13に示す。破壊起点と一致する場所にき裂が既に存在している。さらに、浸炭処理を施す前の転造材の歯元近辺の断面の組織観察結果(Fig.14)より、転造の時点で亀裂が生じていたことが確認される。これは、転造による塑性流動の際に発生したまくれこみの一種と考えられ、本実験で用いた素材の炭素量や硬さが比較的高かったために発生したものと思われる。このき裂の存在により疲労強度が本来より低下していると考えられる。そこで、実際にはどの程度の歯元曲げ疲労強度を達成しうるのであるかを見積もるため、井上¹⁴⁾が提案した浸炭歯車の歯元曲げ疲労強度の推定式(1)を用いた。

$$\sigma_u = (257 + 1.17H_c) + 3.1 \exp[0.0097(H_s - H_c)] - 0.5\sigma_R \quad (1)$$

ここで、 σ_u [MPa]は歯元曲げ疲労強度、 H_c [HV]は心部硬さ、 H_s [HV]は表面硬さ、 σ_R [MPa]は圧縮残留応力であり、 H_c , H_s はFig.10より求めた。 σ_R については、測定により100~150 [MPa]程度であることがわかっている。ただし、この推定式はモジュール5の歯車についてのものであり、それ以下のモジュールの歯車についてKatoら¹⁶⁾は寸法係数 Y_x を提案している。これによれば、モジュール3の場合の Y_x は1.09となり、これと式(1)より素材A、Bの浸炭後の完全緻密材の歯元曲げ疲労強度は約1200 MPaと予測される。

この予測によれば、歯元部のき裂により歯元曲げ疲労強度が300 MPa程度低下していると考えられ、き裂の除去は更なる高強度化には重要な要素である。しかしながら、これまで転造工程を見直して1回の押し込み量を減らすなどの方法を検討した結果、ある程度き裂の発生は抑えられることがわかったが、未だこのき裂を完全に除去するには至っていない。考えられる他の方法としては、転造工程の途中でき裂発生前に素材を焼きなますことであるが、熱変形などを考慮する必要がある。また、熱間転造法¹⁷⁾を適用することも実用的かつ効率的であると考えられ、これらを今後の検討事項としたい。

Fig.13 A crack found in crack initiation area.

Fig.12 Fracture morphologies of rolled P/M gears.

Fig.14 Lap defects found in tooth root area.

4 結 言

修整歯形のねじ状工具 QE13 による転造実験を実施した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 本実験で用いた素材 A, B に対して、転造特性の差異は見られなかった。
- (2) 修整工具を用いて適切な押込み量で転造を施すことで、歯面・歯元を同時に局所緻密化することができた。
- (3) 修整工具を用いて転造することにより、ドリブン側では最高で新 JIS3 級、フォロワ側では最高で新 JIS4 級の歯形精度を得ることができた。
- (4) 修整工具を用いて 600 μm の押込みで転造を行った場合、従来の溶製材に匹敵する歯元曲げ疲労強度を得ることができた。
- (5) 転造時の歯元のまくれこみによるき裂が原因で歯元曲げ疲労強度の低下が考えられ、き裂除去の方法の検討が必要である。

文 献

- 1) R. Strehl: "Tragfähigkeit von Zahnrädern aus hochfesten Sinterstählen", Ph. D. Thesis, Reinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Germany, (1997).
- 2) S. Hoyashita, H. Kubota, K. Hira, T. Takemasu, T. Ozaki, M. Yokoi, and H. Inada: "Study on Improvement of Surface Durability of Sintered Alloy Steel (1st Report, Effects of Roll Burnishing)", Trans. Jpn. Soc. of Mech. Eng., Series C, 66-661(2001)2953-2960.
- 3) T. Takemasu, T. Ozaki, H. Miyahara, S. Hoyashita, M. Yokoi, and H. Inada: "Consolidation of Surface Layer and Improvement of Surface Durability of Sintered Fe Alloy Rollers by Finish Rolling", J. Jpn. Soc. of Technology of Plasticity, 42-491(2001)1208-1212.
- 4) T. Takemasu, T. Ozaki, H. Miyahara, S. Hoyashita, M. Yokoi, and H. Inada: "Finish Rolling of Sintered Fe Alloy Gears Using Screw-Shaped Tool (1st Report, Rolling Experiments by Standard Screw-Shaped Tool)", Trans. Jpn. Soc. of Mech. Eng., Series C, 68-675(2002)3396-3401.
- 5) T. Takemasu, T. Ozaki, and R. Matsunaga: "Crowning Process of P/M Gears for Automotive Transmissions by Finish Rolling Using Screw-Shaped Tool", JSME Int. J., Series A, 46(2003) 196-201.
- 6) T. Takemasu, H. Miura, Y. Nii, T. Koide, and T. Ozaki: "Finish Form Rolling of Sintered Fe Alloy Gears Using Screw-Shaped Tool", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 53(2006)718-724.
- 7) T. Takemasu, H. Miura, and K. Komoto: "Development of High Precision and Strength Sintered Ferrous Alloy Gear by Rolling -1st Report- Numerical Tooth Profile Analysis in Finish P/M Gear Rolling Process Using Screw-Shaped Tool", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 56(2009)330-335.
- 8) H. Miura, T. Takemasu, K. Komoto, S. Hamamoto, and S. Unami: "Development of High Precision and Strength Sintered Ferrous Alloy Gear by Rolling -2nd Report- Rolling Characteristics of Sintered Ferrous Alloy Gear by Modified Tools", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 56(2009)336-343.
- 9) S. Unami, Y. Ozaki, and S. Uenosono: "Fatigue Strength of Sintered and Carburized Compacts Made of Molybdenum Hybrid-Alloyed Steel Powder", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 54(2007)519-524.
- 10) K. Inoue: "Present Aspect of Gear Rolling Methods", J. Jpn Soc. Mec. Eng., 64-510(1961)1034-1041.
- 11) K. Ohwada: "Roll Forming of Transmission Gears", J. Jpn Soc. Prec. Eng., 36-421(1970)88-93.
- 12) K. Ohwada: "Roll Forming of Transmission Gears (Part II)", J. Jpn Soc. Prec. Eng., 36-422(1970)161-166.
- 13) G. Rau, L.S. Sigl, and M. Krehl: "Highly Loaded P/M Gears Produced by Selective Surface Densification", SAE Technical Paper Series, 112(2003)96-100.
- 14) K. Inoue, T. Maehara, M. Yamanaka, and M. Kato: "The Effect of Shot Peening on the Bending Strength of Carbonized Spur Gear Teeth", Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., C, 54-502(1988) 1331-1337.
- 15) T. Miyazaki, A. Hattori, Y. Matsumura, and T. Kano: "Effect of Hardness Profile on the Low Cycle Impact Fatigue Properties in Carburized Steels", DENKI-SEIKO [ELECTRIC FURNACE STEEL], 77(2006)19-27.
- 16) M. Kato, K. Inoue, G. Deng, and B.S. Jeong: Trans. ASME, J. Mech. Des., 115(4)(1993)1013-1018.
- 17) M. Naruse, et al.: Haguruma no Sosei Kako, Yokendo, (1963) 56.