研 究

鉄系焼結合金ローラの転造による面圧疲労強度の向上 – 第2報 –

三浦 秀士^{☆1}, 津守不二夫^{☆1}, 浜本 昭太^{☆2}, 河本 浩介^{☆2}, 宇波 繁^{☆3}^{☆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}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.^{☆3}JFE スチール(株), 〒260-0835 千葉市中央区川崎町1.Improvement of the Contact Fatigue Strength by Rolling of Sintered Ferrous Alloy Rolle
–2nd Report–Hideshi Miura^{☆1}, Fujio Tsumori^{☆1}, Shota Hamamoto^{☆2}, Kosuke Komoto^{☆2} and Shigeru Unami^{☆3}^{☆1}Dept. Mechanical Engineering, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan.^{☆2}Dept. Intelligent Machinery and systems, Graduate of School Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan.^{☆3}JFE Steel Corporation, 1 Kawasaki-cho, Chuou-ku, Chiba 260-0835, Japan.

Received February 2, 2010

SYNOPSIS

Due to the continual improvements of powder metallurgy techniques, it is possible for sintered materials to compete the wrought materials even in some of the most demanding applications. However, strength of sintered materials was normally inadequacy, because they have a lot of pores. This paper describes a study on the effects of the amount of rolling and effective hardened depth by case hardening on the contact fatigue strength of sintered ferrous alloy compacts and the contact fatigue damage mechanisms. Porosity at the vicinity of the surfaces of rolled compacts was decreased with increasing the amount of radial feed, from which the contact fatigue strength of rolled compacts was improved. Furthermore rolling contact fatigue strength of rolled and case hardened compacts was more improved.

KEY WORDS

ferrous alloy compacts, rolling, case hardening, contact fatigue strength, fatigue damage mechanism

1 緒 言

鉄系焼結合金素材は一般的な溶製材と比べて、非常に少ない工程で直接最終製品形状、あるいはそれに近い形状まで製造可能であり、加工コストを大幅に削減できる¹⁾。そのため、現在では自動車用の歯車やベアリング、コネクティングロッドなど様々な部品に鉄系焼結合金素材が適用されている。しかし、鉄系焼結合金素材はその製法ゆえに素材内部に気孔が多数残存していることから強度が不足しがちであり、トランスミッション用歯車など高速高荷重下で使用される歯車には現在でも溶製材歯車(SCM415など)が使用されている。鉄系焼結合金歯車においても、熱間静水圧成形(HIP)や熱間鍛造により素材全体を完全緻密化した後、仕上げホブ切りやシェービングにより歯面仕上げを行い、さらに浸炭焼入れや高周波焼入れなどの表面硬化処理を施すことで、溶製材歯車に匹敵する荷重伝達能力が得られるという報告^{2,3)}もある。しかし、加工コストは溶製材歯車のそれと大差なく、通常の粉末冶金のメリットが損なわれる。そこで、著者らは高負荷用歯車の生産性向上とコスト低減に向けて、歯車形状に成形し

た粉末焼結体プリフォームに転造を施すことで素材表面層近傍を局所的に緻密化し、歯車の精度のみならず、面圧や歯元曲げ疲労強度を同時に向上させ、溶製材歯車に匹敵する高性能な鉄系焼結合金歯車の製作を目的とした研究を行っている。

本研究では、まずは鉄系焼結合金歯車の面圧疲労強度の改善に向けての予備実験として、前報⁴⁾ではCNC転造盤により鉄系焼結合金ローラに種々の荷重で転造加工を行い、表面層近傍の気孔量を低減させた焼結ローラ試験片による面圧疲労試験を行った。本報では、前報同様に2種類の焼結合金鋼ローラを用いて転造加工を施し、転造加工後の焼結ローラに浸炭焼入れを施したのに関しても面圧疲労試験を行い、浸炭焼入れを施した溶製材SCM415の面圧疲労強度と比較した。さらに、面圧疲労試験後の焼結ローラの損傷形態についても調査検討を行ったので、以下に得られた結果を示す。

2 試料および実験方法

2.1 ローラ試験片作製および転造

2種類のローラ試験片の原料粉末にはFe-0.6Mo-0.2Mn

(mass%)の完全合金化粉と、その完全合金化粉に0.2mass% Moを部分拡散付着させたものを用い、前者を素材A、後者を素材Bとする。なお、両者ともに0.45 mass%の黒鉛を添加している。成形圧力は素材A, Bそれぞれ580 MPa, 608 MPaで、焼結は両者ともに1473 K×2.7 ksで行い、その後旋盤にて外径60 mm, 内径30 mm, 幅16 mmのローラを作製した。素材A, Bの各種特性をTable1に示す。

転造加工には、工具軸とワーク軸を交差させた状態で転造を行う軸交差式CNC転造盤を使用した。転造工具軸の回転数は 5 s^{-1} 、ワーク軸の回転数は 0.2 s^{-1} 、ワークの送り速度は $0.16\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ である。潤滑には鋼板用プレス加工油(出光興産(株)製ダフニープレスドローLF7)を用いた。転造実験としては転造加工によるローラの直径減少量が $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$ のローラを作製し、表面層における気孔率を測定し、比較検討した。

2.2 浸炭焼入れおよび面圧疲労試験

転造加工後のA, B両素材に浸炭焼入れを施した。Fig.1に浸炭焼入れのヒートパターンを示す。浸炭焼入れは有効硬化層深さ(550 HVまでの深さ)が0.6 mm狙いと1.2 mm狙いの2条件で行った(前者をpattern A、後者をpattern Bとする)。焼入れ時には有効硬化層深さを適切に制御するため、素材端面および内周面に防炭処理を施した。また、焼入れ後は研削処理を施し、面圧疲労試験に供した。

Table 1 Properties of sintered ferrous alloy compact roller.

Material	Sintered density [g/mm ³]	Porosity [%]	Young's modulus [GPa]	Hardness [HRB]
A	7.10	10	145	60.2
B				68.0

面圧疲労試験は2円筒面圧疲労試験機を用いて行ったが、詳細は前報⁴⁾を参照されたい。回転速度は低速側で 29.0 s^{-1} 、高速側で 30.0 s^{-1} であり、すべり率は4%である。ローラ試験片は低速側に取り付け、高速側には溶製材であるSCM415浸炭焼入れ鋼ローラを取り付けた。各種ローラ試験片およびSCM415浸炭焼入れ鋼ローラの形状をFig.2に示す。なお、転造加工後浸炭焼入れを施したローラは転造を施したローラとほぼ同じ粗さとなるように研削仕上げを施した。相手ローラであるSCM415浸炭焼入れ鋼ローラについても浸炭焼入れ後、研削仕上げを施しており、外周面はその最大高さ粗さ R_a がローラ接触時に潤滑油が形成する最小油膜厚さ $h_{\min}$ ⁵⁾を超えないように仕上げている。また、比較のためSCM415浸炭焼入れ鋼ローラの面圧疲労試験も行った。潤滑にはギアオイル

Fig.2 Drawing of sintered ferrous alloy roller and SCM415 roller for contact fatigue test.

Fig.1 Heat pattern of case hardening.

(出光興産(株)製ダフニースーパーギアオイルLW150)を使用し、油温は313 K、油量 $6.6 \times 10^{-3} \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ でローラ接触部に強制給油した。疲労試験は試験ローラが損傷し、それによる試験機の振動を振動感知センサが感知するか、打ち切り繰り返し数 1.0×10^7 回転に達するまで行った。

3 実験結果および考察

3.1 気孔率測定結果

転造後、マイクロカッターによりローラを切り出し、表面から深さ3.0 mmまでの領域をデジタルカメラで撮影し、その画像を計算機に取り込み二値化した後、画像解析により表面からの気孔率の変化を求めた。前報⁴⁾における素材A, Bの気孔率測定結果をまとめてFig.3に示す。両素材とも転造によって表面層近傍の気孔が潰され、気孔率が減少していることがわかる。緻密化の様相は両素材とも同様で、0~0.5 mmの領域で最も緻密化が進み、0.5~2.0 mmの領域では気孔率はほぼ直線的に上昇しており、2.0 mm近くの深さで母材の気孔率と同じ値になっている。素材A, B共に、転造による直径減少量が大きくなるほど最表面での気孔率は低下した。直径減少量が100 μm から200 μm になると、最表面での気孔率は約2%まで低下しており、初期気孔率10%と比較すると、大きく緻密化できている。また、素材A, Bを比較すると、最表面での気孔の潰れ方に違いがある。これは、素材Bが素材Aよりも硬さがわずかに高いために、気孔が潰れにくかったのではないかと考えられる。

3.2 浸炭焼入れ結果

上記の転造材に浸炭焼入れ後、表面から内部に向かっての硬さをマイクロピッカース硬さ試験機により測定した。測定結果をFig.4に示す。また、溶製材(SCM415)の浸炭焼入れ後の硬さ分布も比較のため併せて示す。焼入れ後の有効硬化層深さはpattern Aで0.65 mm、pattern Bで1.45 mmと、狙いよりもわずかに深い。また、内部硬さは約480 HVとなっており、溶製材(280 HV)と比較すると高くなっている。これは、素材内部の相対密度が10%であることから、その大部分は開気孔であり、このため素材内部まで浸炭されやすいこと、さらには素材の炭素含有量が約0.4%と比較的高かったことも原

Fig.3 Distribution of porosity in surface layer of test roller.

因として考えられた。

3.3 面圧疲労試験結果

面圧疲労試験結果をFig.5に示す。未熱処理ローラについては前報⁴⁾で示した通り、両素材とも転造によって面圧疲労強度が向上している。未転造材と転造材の面圧疲労強度を比較すると、素材A, B共に200 MPa程度上昇しており、転造加工の面圧疲労強度に対する有効性を確認できた。

次に、浸炭焼入れを施したローラの面圧疲労試験結果について考察する。転造加工によるローラの直径減少量200 μm の素材Bにおいて、面圧疲労強度は有効硬化層深さ0.6 mmのもので1700 MPa、有効硬化層深さ1.2 mmのものでは2100 MPaとなった。浸炭焼入れ前後で比較すると、それぞれ約1000、

Fig.4 Distribution of hardness in surface layer of test roller.

Fig.5 Results of contact fatigue test.

1400 MPaほど上昇したことになる。このように、浸炭焼入れを施すことで面圧疲労強度は大きく向上することが確認され、また有効硬化層深さを深くすることでも、面圧疲労強度が上昇することがわかった。いずれにしても、溶製材であるSCM415浸炭焼入れ鋼ローラの疲労強度は2000 MPaであることから、鉄系焼結合金ローラに転造加工および浸炭焼入れを施すことでSCM415浸炭焼入れ鋼ローラとほぼ同等の強度を得ることができた。このような面圧疲労強度の大幅な上昇は、転造加工による表面層近傍の緻密化に加えて、浸炭焼入れにより表面層の硬さが大きく上昇したことに起因していると考えられる。

3.4 損傷形態

面圧疲労試験後、有効硬化層深さが異なるローラの損傷形態を観察するために、損傷したローラの表面および断面の観察を行った。その一例をFig.6に示す。左側は走査型電子顕微鏡にてローラの表面を撮影した写真、右側は光学顕微鏡にて断面を撮影した写真である。そしてFig.7にローラ表面下に発生したき裂を詳細に観察した結果を示す。Fig.6より破面はローラ表面とほぼ平行であることがわかる。また、Fig.7よりき裂は表面層に残存する気孔同士を連結するようにして伝播していることがわかる。このき裂伝播形態は損傷したどのローラから見られた。このことから、き裂はローラ内部で発生し、気孔をつなぐようにして伝播した結果、ローラ表面が大きく剥離するスポーリングに至ったものと考えられた。またFig.6の断面写真を比較すると、浸炭焼入れによる有効硬化層深さ0.6 mmと1.2 mmのものでは損傷深さが異なることがわかる。その損傷深さを測定すると、それぞれ0.80 mm、

1.27 mmである。他の損傷したローラについても同様の傾向がみられた。このように、有効硬化層深さの違いが損傷深さに与える影響は確認できたが、表面層緻密化の違いによる影響はさほど見られなかった。例えば、転造加工による直径減少量200 μm においてもローラ最表面の気孔率は2%と完全に緻密化されてないことから、表面層緻密化よりも浸炭焼入れによる表面硬化の方が損傷深さに影響したと考えられる。

そこで、次に面圧疲労試験中、ローラ表面下に作用する最大せん断応力 τ_{max} 分布と、浸炭焼入れによる硬さ分布との関係の評価することで、損傷深さについて考察した。最大せん断応力 τ_{max} はJ.O. Smithらの解析法⁹⁾を用いて算出している。最大せん断応力、硬さ、損傷深さの関係をFig.8に示す。Fig.8(a)を見ると、最大せん断応力のピークの深さと有効硬化層深さ、さらに損傷深さはほぼ一致している。このことから、有効硬化層深さから硬さが低下し始めるところに最大せん断応力のピーク値が作用し、剥離に至ったと考えられる。一方、Fig.8(b)を見ると、最大せん断応力のピークの深さと有効硬化層深さは一致しておらず、損傷深さは有効硬化層深さ近辺である。つまり、Fig.8(a)の場合と比較して、最大せん断応力のピークの深さでは高い硬さを保っていることから損傷は

Fig.7 Appearance of crack propagation.

Fig.6 Observation of failed roller.

Fig.8 Distribution of maximum shear stress and hardness.

生じず、硬さが低下し始める有効硬化層深さ近辺まで損傷深さが移動したとも考えられる。このことから、有効硬化層深さを深くすることで鉄系焼結合金ローラの面圧疲労強度の向上にも有効であることが示唆された。

4 結 言

鉄系焼結合金歯車の面圧疲労強度の向上に向けて、転造加工後に浸炭焼入れを施したローラの面圧疲労試験を行った結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 転造加工を施すことで、鉄系焼結合金ローラの面圧疲労強度は上昇した。さらに浸炭焼入れを施したローラについては、有効硬化層深さ 0.6 mm で 1700 MPa、有効硬化層深さ 1.2 mm で 2100 MPa と SCM415 浸炭焼入れ鋼ローラとほぼ同等の疲労強度を得ることができた。
- (2) 浸炭焼入れを施した鉄系焼結合金ローラの断面観察を行い、損傷形態はスポーリングが支配的であることが確認された。また、素材内部に発生するき裂は表面層に残存する気孔をつなぐようにして伝播していること、そして浸炭焼入れによる有効硬化層深さが深くなると損傷深さも深くなることがわかった。
- (3) 面圧疲労試験中にローラ内部に発生する最大せん断応力分布と、浸炭焼入れによる硬さ分布の関係から、有効硬化層深さを最大せん断応力のピークの深さよりも深くすることで、面圧疲労強度の上昇に寄与することが確認された。

文 献

- 1) R. Strehl: "Tragfähigkeit von Zahnrädern aus hochfesten Sinterstählen", Ph.D. Thesis, Reinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Germany, (1997).
- 2) P. Skoglund, M. Kejzerman, and I. Hauer: "HIGH DENSITY PM COMPONENTS BY HIGH VELOCITY COMPACTION", Powder Metallurgy, **44**(2001)199-201.
- 3) T. Koide, S. Oda, H. Nakamura, and M. Onishi: "Effect of Sintering process and Rolling on Surface Durability of Sintered Metal Gears", Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., C, **66**(2000)2383-2387.
- 4) H. Miuram T. Osadam S. hamamotom K. Komotom N. Tsuchihashim, and S. Unami: "Improvement of the Contact Fatigue Strength by Rolling of Sintered Ferrous Alloy Roller-1st Report-", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **56**(2009)325-329.
- 5) A. Ishibashi, H. Yoshino, and I. Nakashima: "Appreciable Increase in Load Carrying Capacity in Rolling and Sliding Contact: For 180H_B Carbon Steel", Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., **42**(1976)2207-2214.
- 6) J.O. Smith, C.K. Liu, and U. Ill: "Stresses Due to Tangential and Normal Loads on an Elastic Solid With Application to Some Contact Stress Problems", Transactions of ASME, J. of Applied Mechanics, **20**(1953)157-166.