研 究

高 Ni 焼結合金鋼におけるメゾヘテロ組織及び転造の面圧疲労強度に及ぼす影響

工藤健太郎^{☆1}, 徳岡 輝和^{☆2}, 姜 賢求^{☆3}, 長田 稔子^{☆3}, 津守不二夫^{☆3}, 三浦 秀士^{☆3}^{☆1}九州大学大学院工学府機械工学専攻, 〒819-0395 福岡市西区元岡 744.^{☆2}住友電気工業(株), 〒664-0016 伊丹市昆陽北 1-1-1.^{☆3}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.

Effect of Mezzo-Heterogeneous Microstructure and Rolling on the Rolling Contact Fatigue Strength of Sintered High Ni Alloy Steels

Kentaro Kudo^{☆1}, Terukazu Tokuoka^{☆2}, Hyungoo Kang^{☆3}, Toshiko Osada^{☆3},
Fujio Tsumori^{☆3} and Hideshi Miura^{☆3}^{☆1}Dept. Mechanical Engineering, Graduate School of Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan.^{☆2}Sumitomo Electric Industries, Ltd., 1-1-1 Koyakita, Itami 664-0016, Japan.^{☆3}Dept. Mechanical Engineering, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan.

Received December 19, 2011

SYNOPSIS

This study aims to improve the fatigue strength of P/M gears and to substitute P/M gears for conventional wrought steel gears with reduced manufacturing costs. The 4600 series sintered alloy steels with mixed elemental powders show the mezzo-heterogeneous microstructure which consists of high-hard Ni rich areas and the surrounding martensitic structures. This mezzo-heterogeneous structure causes high strength to the products.

In this paper, we discuss the effects of Ni contents on the contact fatigue strength, and the effect of the pore size is also discussed for further strengthening. Especially, from the evaluation of the area of isolated pores in the densified surface layer after the rolling, it was found that the decrease of pore sizes is very important to improve the contact fatigue strength.

KEY WORDS

4600 series sintered alloy steels, mezzo-heterogeneous microstructure, rolling, contact fatigue

1 緒 言

現在,自動車トランスミッション用をはじめとする高負荷用歯車は,溶製鋼を対象としてブランク加工,ホブ切り,シェーピング加工,熱処理など数多くの加工工程を要していることから,かなりのコスト高となっている。これに対し,焼結歯車は安価に製造できるが,通常のプレス成形による焼結歯車では強度が不十分なため,高負荷用歯車として用いるためには高強度化が必要である。そこで,著者らはこれまでに報告してきた素粉末混合粉を用いた射出成形による高強度焼結 Ni-Mo 鋼の微細不均質(メゾヘテロ)組織による強靱化¹⁻⁶⁾に着目し,同鋼種による歯車の製造を試みることにした。ここでのメゾヘテロ組織とは, Fig.1 に示すように添加合金元素の1つである Ni の偏析により出現した高硬度マルテンサイトの周囲を,靱性がある焼もどしマルテンサイトが取り囲むネットワーク構造を呈したものであり⁴⁾,このユニークな組織形態が強度向上に寄与するものと考えている。本研究ではこれに加え,転造加工を施すことにより表層部を緻密化し,

さらなる高強度化を狙うものである。

なお,歯車の強度設計において,特に重要となるのは面圧疲労強度と歯元曲げ疲労強度であるが,本研究では後者につ

Fig.1 The schematic model of mezzo-heterogeneous microstructure.

いて着目し、メゾヘテロ組織及び転造加工が面圧疲労強度に及ぼす影響について調査、検討を行った。

2 ローラ試験片の作製および実験方法

使用粉末として、4600鋼(Fe-2Ni-0.5Mo-0.2Mn)と同組成のNi量2mass%,そして最高強度を示したと報告^{4,5)}のあるNi量6mass%,中間条件としてNi量4mass%と3種類のNi量の素粉末混合粉を用意した。これら粉末を980MPaにてプレス成形後、N₂ガス雰囲気中で1523K×3.6ksの条件で焼結し、相対密度約94%の円盤状焼結体を製造した。焼結体の特性をTable 1に示す。得られた焼結体をローラ形状に削り出した後、一部に転造を施し、未転造材ならびに直径減少量150 μ mと250 μ mの3条件のローラ形試料を準備した。その後、熱処理として油焼入れ(1173K×1.8ks)後、焼もどし(473K×3.6ks)を行い、表面を研削で仕上げ、面圧疲労試験に供した。研削後の試験ローラ形状並びに、相手ローラ形状をFig.2に示す。

熱処理前後において組織観察および硬度測定を行った。組織観察は歯車断面を研磨後、3%ナイトルでエッチングし、光学顕微鏡を用いて行った。硬度測定はマイクロピッカース硬度試験機を用いて行い、荷重0.98N(100gf)にて、組織ごとに10点で測定を行い平均値を求めた。

Table 1 Composition and density of Ni alloy steel compacts.

	Composition element [mass%]				Density [g/cm ³]	Relative density [%]
	Ni	Mo	Mn	C		
2%Ni	1.81	0.51	0.21	0.43	7.46	94.8
4%Ni	4.00	0.51	0.21	0.43	7.47	94.7
6%Ni	6.12	0.53	0.15	0.45	7.40	93.6

Fig.2 Shapes and dimensions of test roller pairs.

転造による表層部での気孔率減少の様子は、ローラを半径方向に切り出し、光学顕微鏡写真を撮影、画像分析することにより評価した。ローラ表面から深さ方向に6mmまでの気孔率分布を測定し、特に緻密化の及んでいる深さ0.5mmまでの領域においては、画像処理により個々の気孔の面積を集計し統計処理を行った。その場合、材料内部にどれほどの粗大気孔が存在しているかを評価するパラメータとして、粗大気孔の上位2%を平均した値(以後2%平均気孔面積と称す)を用い、転造前後の気孔サイズの減少について評価した。

面圧疲労試験はFig.3に示す二円筒式面圧疲労試験機を用いて行った。相手ローラとして溶製材であるSCM415浸炭焼入れ焼きもどし鋼ローラを用い、試験ローラと相手ローラを対向して設置し、荷重と回転を加える方法で、試験ローラの回転数と相手ローラの回転数はそれぞれ1413 min⁻¹, 1805 min⁻¹とし、相対すべり率を-21.7%とした。また、ローラ接触部に油温を313Kに保持した潤滑油(出光興産(株)製ダフニースーパーギアオイルLW150)を0.4L・min⁻¹で強制供給した。本試験機には振動感知センサを設置しており、ローラに損傷が生じると、異常振動を感知し、自動停止するように調整している。なお、最大繰返し数(N)は1.0×10⁷とした。

Fig.3 Experimental set up (two cylinder type rolling contact fatigue testing machine).

3 実験結果および考察

3.1 組織および硬度

Fig.4 に熱処理前後の組織観察および硬度測定の結果を示す。まず熱処理前の組織は、ベイナイト (図中 A), Ni リッチ相 (図中 B) からなるヘテロ組織を示している。これら各相の硬さは図中に示すとおりであり、ベイナイト相は 230 HV 前後、Ni リッチ相は 400 HV 以上の高い硬度を示している。次に熱処理後の組織は Ni リッチ相 (図中 C) と焼きもどしマルテンサイト (図中 D) の 2 相からなるヘテロ組織が得られている。射出成形法で得られるメゾヘテロ組織⁴⁾は Ni リッチ高硬度マルテンサイト相を焼きもどしマルテンサイトが取り囲む、いわゆるネットワーク構造を呈しており、Ni リッチ高硬度マルテンサイト相の硬度は 700 HV 以上を示していたが、今回の金型プレス成形法で得られた組織では Ni リッチ相の硬度は 2 mass% Ni 添加材で 613 HV、6 mass% Ni 添加材では 475 HV と

Ni 添加量の上昇とともに減少している。この原因は、Ni リッチ相内の Ni 濃度が高いために、マルテンサイト化が十分に進んでおらず、残留オーステナイトが残存したためと思われる。また、Fig.5 に Ni リッチ相の分布状態を示す。黒線で囲んだ着色部分が Ni リッチ相である。図のように 2 および 4 mass% Ni 添加材では Ni リッチ相の点在したヘテロ組織が得られているが、6 mass% Ni 添加材では Ni リッチ相が連なり、本来の狙いであるネットワーク状組織とは異なる構造となっていた。また、Ni 添加量が増えるに従い、気孔が粗大化する傾向にあり、これは Ni の拡散に伴うカーケンドール気孔の生成も影響しているものと考えられる。

3.2 転造実験

面圧疲労において、最大せん断応力は表面から 0.5 mm 前後で発生する⁷⁾ため、表面近傍の緻密化が面圧疲労強度の向上には重要である。表層部の気孔率分布測定結果を Fig.6 に示

Fig.4 Microstructures and hardness of the as-sintered and heat treated Ni alloy steel compacts (A: Bainite B, C: Ni-rich Phase D: Tempered Martensite).

Fig.5 The schematic area of Ni-rich phases of different Ni added compacts.

Fig.6 Porosity profile into the depth from surface of test roller.

す。2, 4mass% Ni 添加材では直径減少量 150 μm の条件で表層部において気孔率 1% 以下であり、十分に緻密化していると言える。4mass% Ni 添加材において直径減少量を 250 μm に増加させた試料では、表面から 0.5 mm までの気孔率は 150 μm の試料とほぼ同等であり、さらに深い領域まで緻密化が進行していることがわかる。一方、直径減少量 150 μm の 6mass% Ni 添加材では、硬度の高い Ni リッチ相の分布量が多いために転造が効きにくく、表面から 0.5 mm までの気孔率が約 2.5% に留まっている。本試材においては直径減少量を 250 μm に増やすことで、他の試材と同程度に緻密化していることが確認できたことから、Ni 添加量の違いにより転造加工量を変化させる必要があることが示唆された。

従来、焼結材の転造加工の評価においては気孔率分布のみが評価されていたが、残存する介在物のサイズも疲労強度に大きく影響することが報告されている⁸⁾。そこで、転造後の気孔サイズの変化について調査を行った。Fig.7 に転造加工の直径減少量と 2% 平均気孔面積の関係を示す。2% 平均気孔面積とは試料内の粗大気孔量を示す指標として採用しているが、図より、まず転造量の増加により、個々の気孔面積が減少していることがわかる。基本的に転造により気孔が潰れ、気孔面積すなわち気孔サイズが縮小するが、2mass% Ni 添加材の気孔面積は 547 μm^2 から 140 μm^2 へと減少するのに対して、4, 6mass% Ni 添加材は 400 μm^2 程度で留まっており、気孔面積が減少しにくいという傾向がある。さらに、直径減少量を 150 μm から 250 μm に増加しても、個々の気孔面積はほとんど減少していない。これは、転造によって、硬度の低いペイナイト相の気孔が優先的に潰されていたことから、硬度の高い Ni リッチ相内の気孔には転造加工の影響が効きにくいこと

Fig.7 The average area of largest 2% pores in different rolling diameter.

を示唆しており、結果として、転造後も Ni リッチ相内の粗大気孔が残ったためと考えられる。

3.3 面圧疲労強度

各材料の面圧疲労試験の結果を Fig.8 に示す。転造を施すことで、疲労強度は大きく上昇した。6% Ni 添加材については、未転造材料で 1200 MPa の疲労強度が直径減少量 250 μm の転造を施すことで 1550 MPa に達し、SCM415 鋼の浸炭焼き入れ焼きもどし鋼 (1.8~2.0 GPa)^{9,10)} の 75% 程の面圧疲労強度を示し、転造加工により疲労強度が大きく改善することが示された。次に、Ni 添加量の違いについては、各 Ni 添加材の直径減少量 150 μm のものを比較すると、3 種類の添加量においてほぼ同等の疲労強度を示しており、Ni 添加量の違いによる面圧疲労強度への影響は見られなかった。特に 6mass% Ni 添加材に

Fig.8 Results of rolling contact fatigue test (S-N curves).

においては、Niリッチ相が連なり、狙いとしたメゾヘテロ組織が得られていないこと、また各Ni添加材のNiリッチ相において高硬度マルテンサイトも得られていないなど、組織的な効果が小さかったためであると考えられる。

また、転造量の面圧疲労強度への影響として、直径減少量を150 μm から250 μm に増加させた場合の変化を比較すると、転造加工量の増加に従い疲労強度は上昇するものの、この上昇量は微増に留まっていることがわかる。4mass%Ni添加材に関しては、直径減少量の増加によって、深さ0.5mmまでの領域における気孔率は減少していない。また、気孔率2%以下となっている表面からの深さを緻密深さと呼ぶが¹¹⁾、この緻密深さが1mmから1.5mmへと拡大している。疲労強度に影響するのは最大せん断応力発生位置である深さ0.3~0.5mmでの緻密化であり、それ以上の緻密深さの増大は疲労強度へそれほど影響しなかったものと考えられる。6mass%Ni添加材においては、直径減少量150 μm で表層部気孔率が2.5%であり、直径減少量250 μm では0.6%と緻密化が進んでいるものの、疲労強度は1.48GPaから、1.55GPaへとやはり僅かな上昇に留まった。Fig.7で示したように、転造量を増加しても2%平均気孔面積はほとんど減少していない。すなわち、250 μm の転造加工後も粗大気孔の量が変化しておらず、この

ことから、緻密化による密度の上昇よりも、個々の気孔の面積の減少が転造加工による焼結材の面圧疲労強度の改善には有効に作用するものと示唆された。

今後は、小さなNi粉末粒径への変更やFe-Ni合金粉末などを用いることで、カーケンドル効果による気孔の粗大化を低減させ、転造によってNiリッチ相内の気孔を緻密化し易い組織を得たり、またNiリッチ相内のNi濃度を焼結条件にて調整し、残留オーステナイトを減少させ、高硬度マルテンサイトを得ることでメゾヘテロ組織の最適化を図り、更なる面圧疲労強度の向上を図りたい。

4 結 言

各Ni濃度におけるFe-Ni焼結合金鋼において転造加工及び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) 転造加工による直径減少量を150 μm から250 μm へと増加させても、緻密化は深さ方向に進展し、表層部の気孔面積は僅かな減少に留まった。
- (2) 6mass%Ni添加材の面圧疲労強度は直径減少量250 μm の転造を施すことで、未転造材の1220MPaから1550MPaへと疲労強度が向上した。なお、焼結材の面圧疲労強度の向上には、密度の上昇よりも、個々の気孔の面積の減少が重要であることもわかった。
- (3) Niリッチ相内で高硬度マルテンサイトが得られていないため、Ni添加量の疲労強度への影響は確認されなかった。今後、Ni粉末粒径の変更やFe-Ni合金粉末を混合することでさらなる面圧疲労強度の向上が期待できる。

文 献

- 1) H. Miura, T. Honda, and R. M. German: "Mechanical Properties of Injection Molded 4600 Steels", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 39(1992)254-259.
- 2) T. Baba, T. Honda, and H. Miura: "Effects of Homogeneous and Heterogeneous Microstructures on the Fatigue Properties of 4600 Steels Produced by MIM Process", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 44(1997)443-447.
- 3) T. Baba and H. Miura: "Mechanical Properties of Injection Molded 4600 Steels (As Heat Treated) with Fine Heterogeneous Microstructure", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 44(1997)1014-1018.
- 4) M. Matsuda and H. Miura: "Mezzo-Heterogeneous Microstructural Control for High Performance Sintered Low Alloy Steels", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 47(2000)681-685.
- 5) M. Matsuda and H. Miura: "Mezzo-Heterogeneous Microstructural Control for High Performance Sintered Low Alloy Steels (2nd report)", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 48(2001)451-455.
- 6) H. Miura and M. Matsuda: "Superhigh Strength Metal Injection Molded Low Alloy Steels by In- Process Microstructural

- Control", Mater. Trans., **43**(2002)343-347.
- 7) T. Kinami and S. Nakamura: "Finite-Element Analysis of Contact Stress in Roller Pitting Test", Electric Furnace Steel, **69**(1998)41-47.
- 8) Y. Murakami, S. Kodama, and S. Konuma: "Quantitative Evaluation of Effects of Nonmetallic Inclusions on Fatigue Strength of High Strength Steel", Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers Series A, **54**(500)688-696.
- 9) T. Takemasu, T. Koide, Y. Takeda, T. Shinbutsu, D. Kamimura, K. Saito, and S. Nakamura: "Surface Rolling Properties and Surface Durability of 1.5Cr-0.2Mo Sintered Alloy Steel Rollers", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **57**(2010) 424-429.
- 10) H. Miura, F. Tsumori, S. Hamamoto, K. Komoto, and S. Unami: "Improvement of the Contact Fatigue Strength by Rolling of Sintered Ferrous Alloy Roller -2nd Report-", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **57**(2010)430-434.
- 11) 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.