114 ショットピーニング浸炭硬化歯車の面圧強さに関する研究

A Study on Surface Durability of Shot-peened Case-hardened Steel Gear

○正 関 正憲 (岡山大学) 正 吉田 彰 (岡山大学) 正 大上 祐司 (香川大学)

Masanori SEKI, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-naka, Okayama

Akira YOSHIDA, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-naka, Okayama

Yuji OHUE, Kagawa University, 2217-20, Hayashi-cho, Takamatsu

In order to investigate the influence of shot peening on the surface durability of case-hardened steel gears, the case-hardened steel gears shot-peened with different shot velocity and shot diameter were fatigue tested using a power circulating type gear testing machine. The hardness, the compressive residual stress and the surface roughness of the gears increased by the shot peening. The failure mode of all the test gears was pitting. The surface durability of the gear shot-peened under medium condition in this experimental range was higher than that of non-peened gear, on the other hand those of lightly or strongly shot-peened gears were lower. Judging from the $p_{\max}$ - N curves and also the $[A(\sigma_r/\sqrt{3} \text{ HV})]_{\max}$ - N curves, it is proposed in this experimental range that the medium shot peening condition, that is, 60m/s shot velocity and 0.6mm shot diameter, should be selected in order to improve the surface durability of case-hardened steel gears.

Key Words : Gear, Surface treatment, Shot Peening, Case-Hardened Steel, Surface Durability, Pitting, Hardness, Residual Stress, Surface Roughness, Normal Stress

1. 緒 言

ショットピーニングに関する研究論文は、世界中で数多く報告されているが、それらの研究論文の中でショットピーニングの目的として最も多く採り上げられているのは、疲れ強さの向上である⁽¹⁾。ショットピーニングが機械要素などの強度向上に有効であり、表面強化法としての利用が定着していることから、ショットピーニングと疲れ強さに関する研究論文が特に多くなったと考えられる。しかし、ショットピーニングと疲れ強さの関係を簡単に説明することは難しく、まだ議論すべき余地が残っている。著者らは前報⁽²⁾において、表面き裂に起因するピッチング損傷に焦点を絞り、浸炭硬化ローラのピッチング強さに及ぼすショットピーニングの影響について検討を行った。その結果、ローラのピッチング強さには、ショットピーニングによる表面粗さの増大が大きく影響することがわかった。そこで本研究では、浸炭硬化歯車にショットピーニングを施し、歯車の面圧強さに及ぼすショットピーニングの影響について調べ、ローラの結果と比較・検討を行った。

2. 試験歯車および実験方法

2・1 試験歯車の製作条件 表1に本実験で用いた平歯車対の諸元を示す。試験側小歯車 (Pinion) ならびに相手側大歯車 (Gear) の素材として、クロモリブデン鋼 (JIS:SCM415) を用いた。歯車対はモジュール 5mm、圧力角 20°、歯数比 20/21 であり、試験歯車および相手歯車の歯幅はそれぞれ 5mm と 22mm で、軸間距離は 102mm である。試験歯車、相手歯車ともにクロモリブデン鋼をホブ切りし、浸炭硬化 (焼入れ: 1203K×5h, 1103K×0.5h 油冷, 焼戻し: 427K×1h 空冷) の後、歯面研削仕上げを行った。歯車精度は、試験歯車ならびに相手歯車ともに JIS 2 級であった。その後、歯車歯面にショットピーニングが施され

た。なお、両歯車のヤング率およびポアソン比は、それぞれ 206GPa, 0.3 とした。

本研究のショットピーニングは、遠心型 (インペラ式) 加速装置⁽³⁾により投射された鋼製ショットが、等速度で回転する歯車に衝突し、ピーニング効果を与える加工法である。表2に試験歯車と相手歯車に施したショットピーニング条件ならびに歯面の表面粗さを示す。ショットピーニングを施していない試験歯車の表記名を G とした。また、試験歯車 GV60 のショットピーニング条件がショット投射速度とショット粒径に関する二つのパラメータの基準となるように、ショット投射速度およびショット粒径はそれぞれ中間の値 (60m/s, 0.6mm) となっている。そのほかの試験歯車には、表中の灰色で示すショット投射速度とショット粒径の各条件の違いにより表記名を付けた。以後、各試験歯車は表中の表記名で記すことにする。表中の表面粗さは、各

Table 1 Test gear data

	Pinion	Gear
Module	mm	5
Pressure angle	deg.	20
Number of teeth	20	21
Addendum modification coefficient	0	-0.19
Tip circle diameter	mm	110.0 113.1
Center distance	mm	102
Facewidth	mm	5 22
Contact ratio	1.536	
Accuracy*	Class 2	Class 2
Heat treatment	Case-hardening	
Tooth surface finishing	Grinding	

*JIS B 1702

Table 2 Shot peening conditions of gears

Specimen mark		Test gear			
		G	GV30	GV60	GV90
Shot velocity	m/s	---	30	60	90
Shot diameter	mm	---	0.6		
Shot hardness	HV	---	620		
Peening time	sec	---	200		
Projection amount	kg/min	---	100		
Arc height	mmA	---	0.28	0.52	0.80
Coverage	%	---	460	600	700
Surface roughness	R_v μm	3.70	5.23	6.12	6.19

Specimen mark		Test gear		Mating gear
		GD0.2	GD0.8	GM
Shot velocity	m/s	60		90
Shot diameter	mm	0.2	0.8	0.2
Shot hardness	HV	620		620
Peening time	sec	200		
Projection amount	kg/min	100		
Arc height	mmA	0.19	0.64	0.25
Coverage	%	2000	400	2400
Surface roughness	R_v μm	4.33	8.32	4.11

Fig.1 Hardness distributions of test gears

歯車歯面のかみあいピッチ点付近における歯形方向の表面粗さ(最大高さ) R_v であり、強いショットピーニング条件、つまりショット投射速度あるいはショット粒径が大きい条件ほど、表面粗さ R_v が大きくなっていることがわかる。

2・2 試験歯車の表面性状 図1に試験歯車の硬さ分布を示す。硬さ測定にはマイクロピッカース硬度計を使用し、測定荷重 0.98N (100gf)、時間 30sec の条件下で測定を行った。図よりショットピーニングによって、歯面近傍の硬さが上昇していることがわかる。ここで、相手歯車の表面硬さは 821HV であり、浸炭の有効硬化層深さ(550HV 以上)は試験歯車で 0.8~1.0mm、相手歯車で約 1.0mm であった。

表3にX線による応力測定条件を示し、表4に各歯車歯面

Table 3 X-ray stress measurement conditions

Characteristic X-ray	CrK α
Diffraction plane	α -Fe (211)
Tube voltage	kV 40
Tube current	mA 30
Irradiate area	mm ² 3 × 2
Scanning speed of detector	deg./min 3

Table 4 Surface Residual stresses of gears

Specimen mark		Test gear			
		G	GV30	GV60	GV90
$(\sigma_x)_r$	MPa	-299	-696	-779	-755
$(\sigma_y)_r$	MPa	-454	-749	-728	-643

Specimen mark		Test gear		Mating gear
		GD0.2	GD0.8	GM
$(\sigma_x)_r$	MPa	-716	-703	-789
$(\sigma_y)_r$	MPa	-780	-706	-591

の表面残留応力を示す。歯面の残留応力は、X線回折装置を使用して $2\theta\text{-}\sin^2\psi$ 法⁽⁴⁾により測定し、X線としてCrK α 線を用いた。このとき、歯面上におけるピッチ点付近の残留応力を測定し、歯筋方向の残留応力を $(\sigma_x)_r$ 、歯形方向の残留応力を $(\sigma_y)_r$ とした。表4よりショットピーニングを施すことによって、圧縮残留応力が增大していることが確認できる。歯車の歯のかみあいは、歯形方向における滑り転がり接触であることから、歯形方向の残留応力 $(\sigma_y)_r$ に着目する。ショット粒径のみが異なるGD0.2、GV60およびGD0.8を比較してみると、ショット粒径が最も小さいGD0.2の残留応力 $(\sigma_y)_r$ が最も増大している。この傾向は、ショット粒径が小さいショットピーニング条件下で加工表面の圧縮残留応力が大きくなる傾向⁽⁵⁾と一致している。

2・3 実験方法 本実験では、FZG型動力循環式歯車試験機を用い、試験歯車を被動側、相手歯車を駆動側として、試験歯車の回転速度 $n_1=1800\text{rpm}$ で疲れ試験を行った。負荷の基準として、かみあいピッチ点におけるヘルツの最大接触応力 $p_{\max}$ ⁽⁶⁾を用いた。使用した潤滑油はEP3090ギヤ油で、歯車かみこみ側ノズルから圧力給油した。給油量は750mL/minであり、油温は $313\pm 5\text{K}$ となるように制御した。本実験では任意の試験歯車繰返し数 N_f ごとに歯面に生じたピッチングの面積を測定し、試験歯車と相手歯車の総接触面積に対するピッチング面積の比で表すピッチング面積率を求めた。そのピッチング面積率が5%に達したときの試験歯車繰返し数を試験歯車の破壊寿命 N とした。また、歯の折損により異常振動が発生し、振動感受スイッチによって試験機が自動停止したときの試験歯車繰返し数も破壊寿命 N とした。疲れ試験はヘルツの最大接触応力 $p_{\max}=1600\sim 2000\text{MPa}$ の範囲で行われ、Dowsonの式⁽⁷⁾より求めた歯車対のかみあいにおける理論最小油膜厚さは $h_{\min}=0.8\sim 1.8\mu\text{m}$ であり、Dawsonが定義した D 値⁽⁸⁾はすべての試験歯車対において $D>1$ であった。なお、試験歯車と相手歯車のかみあいにおいて、相対曲率半径は 3.61mm から

Fig.2 $p_{\max}$ - N curves

8.39mmの範囲内で変化し、かみあいピッチ点における相対曲率半径は8.39mmである。

3. 実験結果と考察

3・1 面圧強さとショットピーニング条件の関係

図2に本実験で得られたヘルツの最大接触応力 $p_{\max}$ と試験歯車の破壊寿命 N との関係を示す。図中の矢印は、試験歯車繰返し数 N_f が 2×10^7 を越えても、ピッチング面積率が5%に達しなかった、あるいは試験機が自動停止するほどの損傷に至らなかったことを表す。なお、本実験で用いた相手歯車に損傷は発生しなかった。本実験では、破壊寿命 $N=2 \times 10^7$ に対するヘルツの最大接触応力 $p_{\max}$ を試験歯車の面圧強さとした。図よりショットピーニングを施すことによって、GV60の疲れ寿命は向上したが、GV60以外のショットピーニング歯車の疲れ寿命はGと同程度であった。

図3はアークハイト値に対する各試験歯車の面圧強さをプロットしたものである。前報⁽²⁾の直径60mm浸炭硬化ローラの結果も合わせて示している。なお、図中の一点鎖線は、本実験で用いたショットピーニング歯車ならびに前報⁽²⁾のショットピーニングローラそれぞれのプロット点に対する近似曲線である。前報⁽²⁾のローラではアークハイト値が大きいほど、すなわち、強いショットピーニングを施したローラほど、面圧強さが低下する結果となった。しかし、本実験で用いた歯車において、GV60の面圧強さだけが向上し、GV60以外のショットピーニング歯車の面圧強さは低下した。

3・2 損傷形態

図4に試験歯車の損傷写真ならびに損傷した歯の軸直角断面写真を示す。試験歯車の損傷形態は、すべて歯面表面からのき裂に起因するピッチング損傷であった。図中の写真(A)と(C)に示すように、かみあいピッチ点付近にピッチングが発生していることが確認できる。

Fig.3 Relationship between surface durability and arc height

Fig.4 Observation of failed teeth

Fig.5 Failed tooth surface of test gear

本実験の範囲内において、高負荷条件で疲れ試験を行った一部の試験歯車では、かみあいピッチ点付近のピッチングを起点として発生したき裂が、反対側歯面の歯元に達し、写真(B)のように歯が折損した。

図5はレプリカ法による歯面表面の観察写真である。この図より、疲れ試験前の $N_f=0$ の歯面には、ショットピーニングによる圧痕が観察できるが、疲れ試験初期段階におけるなじみ効果により、歯面表面の凹凸が小さくなっていることがわかる。さらに、かみあいピッチ点付近で発生したピッチングが、試験歯車繰返し数 N_f の増加とともに、歯元の面全体に広がっていることが確認できる。

3・3 硬さと垂直応力による面圧強さの評価 本研究ではピッチングき裂の発生が、ビッカース硬さHVに対す

Fig.6 $[A(\sigma_y/\sqrt{3} \text{ HV})]_{\max}$ - N curves

る歯形方向の垂直応力 σ_y の比を $\sqrt{3}$ で除した振幅 $A(\sigma_y/\sqrt{3} \text{ HV})$ 、特に歯面表面で最大となる振幅最大値 $[A(\sigma_y/\sqrt{3} \text{ HV})]_{\max}$ に依存すると考えた⁽⁹⁾。ここで、歯形方向の垂直応力 σ_y を J.O.Smith の解析法⁽¹⁰⁾ により求めるにあたって、表4に示した表面残留応力を考慮し、相対曲率半径はかみあいピッチ点における値を用いた。なお、接線力は接触領域に様に作用するとし、前報⁽²⁾のローラの結果より摩擦係数を0.035とした。

図6に振幅最大値 $[A(\sigma_y/\sqrt{3} \text{ HV})]_{\max}$ とローラの破壊寿命 N の関係を示す。図2と比較して図6では、ほとんどのショットピーニング歯車のプロット点が、ショットピーニングを施していない G のプロット点より下に位置し、ショットピーニング歯車と G のプロット点の差が広がっていることがわかる。このことから、GV60はショットピーニングによる硬さの増大により、面圧強さが向上したといえる。また、図6では硬さ以外の表面粗さなどの影響が現れていると考えられるので、本実験の範囲内で強いショットピーニングを施したGV90とGD0.8は、ショットピーニングにより表面粗さが増大し、表面粗さの凸部における負荷の集中の割合が大となり、面圧強さが低下したと考えられる。一方、本実験の範囲内で弱いショットピーニングを施したGV30とGD0.2の場合、硬さで無次元化した図6において、GV30とGD0.2のプロット点がGV60のプロット点の近くに位置している。すなわち、ショットピーニングによる硬さの増加が小さかったため、表面粗さの悪影響によりGV30とGD0.2の面圧強さは向上しなかったといえる。ローラの疲れ試験は、滑り率と相対曲率半径が一定の滑り転がり接触条件下で行われるのに対し、歯車の疲れ試験では、歯のかみあい始めからかみあい終わりにかけて滑り率や相対曲率半径が逐次変化する。したがって、本実験の歯車の結果と前報⁽²⁾のローラの結果の違いは、歯車とローラの試験条件

の差が現れていると考えられる。

以上のことから、本実験の範囲内において、GV60の硬さや圧縮残留応力などが効果的に作用するとともに、表面粗さの悪影響が小さかったため、浸炭硬化歯車の面圧強さ向上につながったと結論づけられる。

4. 結 言

ショット投射速度およびショット粒径の異なる条件でショットピーニングを施した浸炭硬化歯車の疲れ試験を行い、歯車の面圧強さに及ぼすショットピーニングの影響について検討を行った。その結果を以下に示す。

- (1) 本実験の範囲内で、ショット投射速度およびショット粒径が中間の値の条件でショットピーニングを施したGD0.6の面圧強さは向上したが、GD0.6以外のショットピーニング歯車の面圧強さは低下した。
- (2) 本実験で用いた試験歯車の損傷形態は、すべてピッチング損傷であり、かみあいピッチ点付近でピッチングが発生し始め、歯元の面全体に広がった。一部の歯車では、かみあいピッチ点付近からのき裂により歯の折損が発生した。
- (3) $[A(\sigma_y/\sqrt{3} \text{ HV})]_{\max}$ - N 曲線より、GD0.6はショットピーニングによる硬さの増大によって面圧強さが向上し、GD0.6以外のショットピーニング歯車はショットピーニングによる表面粗さの増大によって面圧強さが低下したことがわかった。
- (4) 浸炭硬化歯車の面圧強さを向上させるためには、本実験の範囲内で、中間の条件であるショット投射速度60m/s、ショット粒径0.6mmが適しているといえる。

文 献

- (1) 当舎勝次, JICST ファイルにおけるショットピーニング技術の研究動向, ショットピーニング技術, 12-3(2000), 155-160.
- (2) 吉田彰, 關正憲, 大上祐司, 後藤田佳和, 林大介, 浸炭硬化鋼ローラのピッチング強さに及ぼすショットピーニングの影響, 機講論, No.03-1(2003-8), 19-20.
- (3) ショットピーニング技術協会編, ショットピーニングの方法と効果, (1997), 69, 日刊工業新聞社.
- (4) X線材料強度部門委員会, X線応力測定法標準, (1982), 1, 日本材料学会.
- (5) 文献(4)のp.16.
- (6) K.L.Johnson, *Contact Mechanics*, (1987), 84, Cambridge University Press.
- (7) D.Dowson, *Elastohydrodynamics*, *Proc.Instn.Mech.Engrs.*, Vol.182 Pt.3A(1967-68), 151-167.
- (8) P.H.Dawson, *Further Experiments on the Effect of Metallic Rolling Surfaces*, *Proc.Instn.Mech.Engrs.*, Vol.180 Pt.3B(1965-66), 95-100.
- (9) Akira Yoshida and Daijiro Konishi, Study on Influences of Machining Method and Surface Roughness on Pitting of Thermally Refined Steel Rollers (Part 4), *Japanese Journal of Tribology*, Vol.40 No.5(1995), 425-436.
- (10) J.O.Smith and C.K.Liu, 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*, Vol.20 No.2(1953), 157-166.