焼結金属歯車の強度特性 (第2報)*

会田 俊夫** 藤尾 博重*** 高下 二郎****

Strength and Surface Durability of Sintered Metal Gears (2nd Report)

Toshio AIDA, Hiroshige FUJIO, Jiro TAKASHITA

Sintered metal gears have good surface durability even under the self-lubricating condition. But they are not so strong as those made of solid metals having the same chemical composition and tooth geometry.

So the load-carrying capacity of sintered metal gears having a high pressure angle or high density were tested. Also, the fatigue characteristics of welded or soldered sintered metal materials were investigated.

Results obtained are summarised as follows :

- (1) The load-carrying capacity can be significantly increased by adopting higher pressure angle system, higher density and carburizing heat treatment.
- (2) Notch factor is far less than stress concentration factor and size effect exists.
- (3) Sintered metal can be effectively welded.

1. 緒 言

焼結金属歯車の合理的設計の強度的な基準である静的曲げ強さ、曲げ疲れ強さ、摩耗強さなどについては資料が少なく、現場では設計にあたって経験的に形状寸法が定められることが多く、用途も限定されているのが現状である。そこで筆者らは焼結金属歯車の強度特性の研究をはじめ、すでに第1報で中密度 ($6.2 \sim 6.4 \text{ g/cm}^3$) の焼結金属歯車の強度特性について発表したり¹⁾。その結果、含油した上での無給油運転では、鑄鉄、あるいは鋼のホブ切り歯車に比べて非常に摩耗は少ないが、スブラッシュ潤滑状態ではそれらとほぼ同程度の摩耗強さを示し、静的曲げ強さおよび曲げ疲れ強さについては鋼製歯車に著しく劣ることが明らかとなった。そこで本報では圧力角を標準の 20° より大きくして²⁾ 曲げ強さの増大を計り、また、密度を高くし、さらに特殊熱処理を施して歯車の各強さがどの程度向上するかを実験により調べてみた。

さらに、焼結金属歯車の曲げ疲れ特性の基礎的研究と

して焼結金属材料の短冊状平滑試験片、切欠試験片につき平面片振り曲げ疲れ試験を行ない、切欠特性および寸法効果特性を明らかにしようとした。

また、焼結金属材料の接合試験片についてもその強度特性を調べたので、それらについて報告する。

2. 試験片要目および試験方法

2.1 試験歯車

実験に用いた焼結金属歯車の材質は 100メッシュ程度のヘガネス海綿状鉄粉を主成分とした Fe-Cu-C 系、Fe-Cu系であり、それらの化学成分および特性値は表1に示すごとくである。試験歯車の諸元は表2に示す。

高圧力角焼結金属歯車は、正確にホブ切りした電極で入念に放電加工仕上げをした金型によって成形、焼結、コイニングを行なっている。その精度は J I S 規格で 4 級ぐらいで、前回の低圧力角歯車に比して 1 ~ 2 級程度精度が高くなっている。

曲げ疲れ試験は第1報と同じくディーゼル機関用燃料噴射ポンプを利用した京大式曲げ疲れ試験機³⁾を用いて行なった。

摩耗試験は、トーション・スプリング式トルクメータを利用した動力循環式歯車運転試験機によって行なった。図1にその外観を示す。a および b が歯車箱で、この中に試験歯車対および駆動歯車対が収められていて、軸およびトルクメータ c により連結されている。トルク

*本研究は精機学会焼結機械要素とその加工性に關する分科会の事業の一部として行なわれたものである。昭和40年4月精機学会関西支部春季講演会、昭和40年11月精機学会秋季大会講演会にて発表。

正会員 京都大学工学部 *京都大学工学部

****日立精機株式会社

表1 試験歯車の化学成分および特性値

		Fe-Cu-C系		Fe-Cu系浸炭窒化
		中 密 度	高 密 度	高 密 度
成分%	C	0.3 ~ 0.5	0.5 ~ 1	—
	Cu	1.5 ~ 3	1.5 ~ 3	3 ~ 5
	Fe	97 ~ 98.5	97.5 ~ 98	95 ~ 97
密度 g/cm ³		6.2 ~ 6.5	7.0 ~ 7.1	7.1 ~ 7.2
多孔率 %		20	10	8
かたさ H_{RB}		40 ~ 45	65 ~ 67	42 ~ 47 (H_{RC})

表2 試験歯車の諸元

諸元	歯車	低圧力角歯車	高圧力角歯車
歯 数		24	24
モジュール mm		2	2
圧 角 度		16.5°	25°
歯 幅 mm		10	10

図1 動力循環式歯車運転試験機

メータcの一端にはウォームおよびウォームホイールdがあり、これによってトルクメータcをねじって循環トルクをあたえる。このトルクメータの回転角はトーションバーの場合よりかなり大きいので歯車のかみあい誤差による荷重の変動が小さい。この状態でトルクメータeを介して外部より回転させることにより運転試験を行なう。トルクメータeはその際の損失トルクをあたえる。

潤滑条件としては自己潤滑のみの場合とスプラッシュ潤滑の場合とを行なった。

2.2 曲げ疲れ試験片

試験片の材質は機械部品としてよく使用される鉄系で、それらの化学成分、密度、かたさを表3に示す。

試験片の形状寸法は表4のごとくで、切欠試験片は60°のV形切欠を有している。切欠は機械加工で仕上げた。平滑片も同様に機械加工で仕上げている。

なお、形状係数はNeuberの計算図表より求めた。

表3 曲げ疲れ試験片の化学成分および特性値

	Fe	Fe-C	Fe-Cu-C
成分%	C	1.0	1.0
	Cu	—	1.5
	Fe	99	97.5
密度 g/cm ³		6.5	6.4
多孔率 %		18	—
かたさ H_{RB}		20 ~ 22	38 ~ 45
		—	45 ~ 52

表4 曲げ疲れ試験片の寸法

試験片番号	a	t	ρ	b	形状係数 α
1	3.5	0	∞	5	—
2	3.5	1.5	1.0	5	1.7
3	3.5	1.5	0.5	5	2.3
4	7	0	∞	10	—
5	7	3	2.5	10	1.7
6	7	3	1.0	10	2.3
7	7	3	0.5	10	3.0

図2 曲げ疲れ試験の荷重状態

試験機としては前述の歯車曲げ疲れ試験機を利用したが、負荷装置としては図2のごとく試験片の中心から左右にある範囲だけ一定の曲げモーメントが作用するようにしてある。

2.3 接合試験片

試験片の材質はFe-C系で、それらをろう付けしたもの、溶接したものを用いた。ろう付けは酸素アセチレン炎でトーチろう付けを行ない、ろう材としてはCu-Zn系統のものである。アーク溶接試験片はイルミナイト系溶接棒で開先形状にした母材を溶接し、あとで機械加工により同一面に仕上げた。

試験片の形状は断面が6×10、長さ60mmの短冊状の平滑試験片であり、中央部断面が接合されている。

3. 実験結果

3.1 歯車の曲げ強さ

試験歯車の曲げ疲れ試験結果を図3に示す。

歯元公称曲げ応力 σ は図4のように記号を定めると次式であたえられる。

$$\sigma = 6 P_n l \sin \theta / b s^2$$

ここで P_n : 歯面荷重 (kg), b : 歯幅 (mm), s : 危

図3 焼結金属歯車の荷重-繰返し数線図

図4 荷重の作用位置と危険断面

図5 圧力角の相違による曲げ強さの比較
(Fe-Cu-C 中密度歯車)

険断面上の歯厚 (mm), l : 危険断面より負荷点までの距離 (mm) である。

3.1.1 圧力角の影響

Fe-Cu-C 系中密度で圧力角 16.5° , 25° の歯車についての静的破断力, 曲げ疲れ破断力の比較を図5に示す。両歯車の強さの比は静的曲げ破断力, 曲げ疲れ破断力に対しそれぞれ1.64, 1.35となっている。

一方, 歯先に荷重が作用したとして(1)式により両歯車の公称曲げ応力を比較してみると

$$\sigma = 0.178 P_n \quad (\alpha = 16.5^\circ)$$

$$\sigma = 0.107 P_n \quad (\alpha = 25^\circ)$$

となり, σ がある値に達したとき折損すると考えると, その時の両者の P_n の比は1.66となる。

曲げ疲れ破断力が1.35と小さい値を示したのは高圧力角歯車に対する l の実際の値が低圧力角歯車に対する l よりもやや大きかった結果によるものと思われる。その場合, 静的曲げ破断力がこれに対応して小さくなっているのは負荷によるたわみが大きくなると負荷点が歯元側に移動する割合が圧力角が大なるほど大きくなるためと考えられる。すなわち, 静的曲げ試験で, 低圧力角歯車のたわみによる負荷点の移動量は約 0.2mm であるのに対し, 高圧力角歯車のそれは 0.8mm で, たわみを考慮した理論的破断力比は1.58になり, 実験結果をほぼ説明することができる。

3.1.2 密度, 材質の影響

Fe-Cu-C 系で圧力角 25° の歯車について, 中密度歯車と高密度歯車の曲げ強さを比較してみる。両歯車の静的曲げ強さはそれぞれ42, 92kg/mm² で, 曲げ疲れ限度は12, 28kg/mm² であり, 高密度歯車は静的曲げ強さ, 曲げ疲れ限度ともに中密度歯車の2.2~2.3倍となっている。

なお, 曲げ疲れ限度の静的曲げ強さに対する比は中密度歯車, 高密度歯車でそれぞれ29%, 30%となる。

つぎに, Fe-Cu系高密度歯車に浸炭窒化処理したもの

図6 Fe-Cu 系浸炭窒化歯車表面層のかたさ (荷重25g)

について調べると、歯元すみ内部表面層のかたさ分布は図6のごとくで、表面より0.2mm³程度の非常にかたい層が存在する。この図で荷重値を25gと表わしているが、これは焼結金属材料の場合、表面と内部が同じかたさであっても測定用荷重が大きくなるとかたさは小さくなるので、荷重値を明示する必要があるためである。

この歯車の静的曲げ強さは119kg/mm²、曲げ疲れ限度は52kg/mm²である。なお、浸炭窒化処理前のFe-Cu系歯車についての曲げ疲れ限度は28kg/mm²であり、Fe-Cu-C系高密度歯車とほぼ同じであった。浸炭窒化により曲げ疲れ強さは1.9倍にもなる。

以上の結果から、高圧力角を採用し、また、高密度とし、熱処理を施すことにより、曲げ強さについて铸铁歯車よりも優れ、鋼製熱処理歯車に十分匹敵しうる焼結金属歯車がえられることがわかる。

3.2 摩耗強さ

摩耗量は第1報と同様にまたぎ歯厚減少量 δ で表わした。歯形の摩耗による変化の一例は図7のごとくであり、摩耗の程度は歯厚の減少によって大過なく示すことができると考えられたからである。一定荷重で運転試験を行なうとき、はじめ、摩耗量は急激に増加するが、荷重繰返し数が増加するにしたがってその傾きは減少し、 1×10^6 の荷重繰返し数の後にほぼ一定の傾きを保つ。実験では 3×10^6 の荷重繰返し数まで試みたが、この傾きがその後も続くとして、初期摩耗の大きさを除いた 10^7 の荷重繰返し数後の予想される摩耗量を Δ と表わすことにした。

なお、接触面の圧力の大きさを示すものとして、次の値を用いることにする。

$$k = P_n / 2 \cdot b \cdot R_r$$

ここで、 P_n ：伝達トルクより求めたピッチ点における垂直歯面荷重、 R_r ：ピッチ点における歯形の相対曲率半径、 b ：歯幅である。

(Fe-C 低圧力角歯車、歯面荷重 2.2kg/mm)

図7 摩耗による歯形の変化

図8 接触荷重と摩耗

一般には Hertz の接触応力を基準にとることが行なわれているが、Hertz の接触応力は材質が一樣であることが条件なので、焼結金属のような場合には平均的な応力値 k で表わすのが実際に即していると思われる。

3.2.1 荷重の影響

回転数1020rpmとしたときの荷重と摩耗量 Δ との関係を図8に示す。Fe-Cu系浸炭窒化歯車では摩耗量が少なく、測定が困難なので一定の傾向を示さないが、他の場合には荷重とともに摩耗量は増加し、直線の傾きが一定となっていることは、摩耗量が荷重に比例していることを示す。なお、中密度の歯車では自己潤滑の場合とスブラッシュ潤滑の場合では摩耗量はそれほどちがわない。とくに低負荷の場合にはほとんど同じとみてよく、自己潤滑でも油膜を形成し、金属接触をある程度防いでいると考えられる。しかし、自己潤滑作用も潤滑油の量が限られているので荷重が高くなるとスブラッシュ潤滑に比べ多少劣る。

3.2.2 回転速度の影響

中密度歯車の自己潤滑、スブラッシュ潤滑、高密度歯車のスブラッシュ潤滑の場合の回転速度と摩耗量との関係を、接触圧力 k をパラメータとして図9に示す。 $k = 0.41 \text{ kg/mm}^2$ では回転速度が大きくなるにつれて摩耗量は増加しているが、スブラッシュ潤滑の場合、 $k = 0.22 \text{ kg/mm}^2$ では2120rpmでかえって摩耗量が減少している。負荷が小さく、かつ歯面のすべり速度が大きいので油膜が形成されやすい条件となり、金属どうしの接触が少なくなったものと考えられる。

図9 回転速度と摩耗量の関係

図10 焼結金属歯車の摩耗 (Fe-Cu-C系, $P_n/b = 4.2 \text{ kg/mm}$)

Fe-Cu-C系中密度歯車を $k=0.80 \text{ kg/mm}^2$ 、回転速度 2120rpm、自己潤滑で運転したとき、 1×10^6 回転で軽いスコアリングをおこし、その後、摩耗量が急激に増加し、運転不能となった。スプラッシュ潤滑の場合、試験の範囲内 ($k=0.22 \sim 0.80 \text{ kg/mm}^2$ 、回転速度 $n=530 \sim 2120 \text{ rpm}$) ではスコアリングをおこしていない。したがって、中密度歯車ではある程度の荷重、回転速度までは自己潤滑性があり、スプラッシュ潤滑を行なった場合と同様に使用しうるが、高負荷、高速回転になるとスコアリングを起こしやすくなり、スプラッシュ潤滑などの外部よりの潤滑を行なう必要がある。

中密度歯車の摩耗について考察してみると、図9より直線の方程式は

$$\Delta = p \cdot n / 100 \quad (2)$$

と表わされる。 n は回転速度(rpm)、 p は定数である。

ここで $n=250 \text{ rpm}$ の場合の摩耗量を求めると、 $k=0.22, 0.41, 0.80 \text{ kg/mm}^2$ に対しそれぞれ $\Delta=1.8, 3.4, 7.0$ となり、(2)式から $p=0.72, 1.36, 2.80$ と決る。この定数 p と接触圧力 k の比はほぼ一定であり、 p は接触

圧力 k に比例しているといえるので

$$p = C \cdot k \quad (3)$$

とおける。 C は耐摩耗性を示す定数である。したがって、(2)/(3)式より

$$\Delta = C \cdot k \cdot n / 100 \quad (4)$$

となる。 $n=250$ に対する各接触圧力 k 、摩耗量 Δ の値を(4)式に代入すると $C=3.3$ となり

$$\Delta = 3.3 k \cdot n / 100 \quad (5)$$

上式より、初期摩耗を除いた 10^7 回転後の摩耗量を推定できる。

同様に中密度歯車のスプラッシュ潤滑の場合、 $C=3.1$ となり、自己潤滑の場合よりやや減少している。

低荷重、高速回転の場合はかえって摩耗量が少なくなっているなのでこの関係式は適用できないが、上式を使えば安全側にあるといえる。

スプラッシュ潤滑を行なった場合、Fe-Cu系浸炭窒化歯車を除いて接触圧力 k が大きいとき、ピッチングを生じた。ただし、回転速度が大きい場合には遅い場合よりもピッチングは生じにくかった。たとえば、Fe-Cu-C系中密度歯車で $k=0.80 \text{ kg/mm}^2$ としたとき、530rpm では 3×10^6 回転付近でピッチングが生じたが、1020、2120rpm では生じなかった。これは荷重が高いときには回転速度が大なるほどすべりにより摩耗が大きいことが影響していると考えられる。

3.2.3 密度の影響

Fe-Cu-C系中密度歯車、高密度歯車を接触圧力 $k=0.41 \text{ kg/mm}^2$ 、回転速度 1020rpm で運転した場合の歯厚減少量と回転数との関係を図10に示す。スプラッシュ潤滑では中密度歯車よりも高密度歯車の摩耗は少ないが、自己潤滑では潤滑油の不足をきたし、スコアリングを起こして使用に耐えなくなる。したがって、高密度歯車では一般の歯車と同様に潤滑してやる必要がある。

中密度歯車では、この程度の回転速度ではスプラッシュ潤滑と自己潤滑のみの場合とで摩耗量に大差なく、外部からとくに潤滑してやる必要は少ない。

同じ接触圧力に対して、中密度歯車は高密度歯車よりもピッチングが生じにくい。このことは、中密度歯車の弾性定数が高密度歯車のそれよりも小さく、その結果、実際の接触圧力が小さいためと考えられる。

3.3 曲げ疲れ試験片の曲げ疲れ特性

図11 平滑試験片、切欠試験片の応力-繰返し数線図
(中密度 Fe-Cu-C系)

①点(2)直下の図はろうづけ試験片破断面の略図で、パッチングした部分は実際ろうづけされている部分、白い部分はろうづけの不完全な部分を示す。

図13 接合試験片の応力-繰返し数線図(中密度, Fe-C系)

図12 焼結金属材料曲げ疲れ試験片の形状係数と切欠係数との関係

中密度焼結金属材料の曲げ疲れ試験結果の一例を図11に示す。各材質に対する応力-繰返し数線図から形状係数と切欠係数との関係を示したのが図12である。

小試験片では平滑片1を、大試験片では平滑片4を基準として切欠係数を表わしている。この結果によるとFe, Fe-C系では切欠半径 ρ が小さくとも曲げ強さはほとんど変化せず、切欠係数はほぼ一定値をとっている。Fe-Cu-C系では小試験片の切欠係数は前2者と同様に一定値をとっているが、大試験片では形状係数の増加とともにやや増加している。しかし、どの材質についても切欠係数は形状係数に比して著しく小さい。また、大試験片の切欠係数は小試験片のそれよりもかなり大きく、寸法効果があることを示している。このことは、焼結金属材料中に存在する空隙による欠陥のため、平滑片でもすでに切欠を付したような状態であり、この平滑片に切欠を付しても疲れ強さにあまり影響しないためであると考えられる。つまり、焼結金属材料中の空隙の存在は鑄鉄における黒鉛の存在に相当するわけである。また、この空隙の存在が大きい寸法効果をおこす原因であ

る⁴⁾と考えられる。

なお、図12に示した曲げ疲れ切欠試験片の曲げ疲れ限度は小試験片で16.6~17.6kg/mm²、大試験片で12.0~15.6kg/mm²であった。それに対し、中密度歯車の曲げ疲れ限度は、16.5°、25°歯車に対して、それぞれ13.0、12.4kg/mm²であり、曲げ疲れ試験片よりやや低いが、これは歯車のかたさがわずかながら小さく材料が全く同一でないためと考えられる。

3.4 接合試験片の曲げ強さ

ろう付け試験片、溶接試験片の静的曲げ試験で、破断箇所はいずれも接合部をはずれた母材部であり、したがって、母材部の曲げ強さとしては38.5kg/mm²となった。

つぎに、曲げ疲れ試験結果を図13に示す。ろう付け片の一部を除いてすべて母材部で破断した。ろう付け部で破断したものは図13に示すように中央部にろう付けされていない部分があった。しかし、ろう付け部での破断といっても厳密にはろう材が破断したのではなく、母材がろう付け部の近くで破断している。これはろう材の強度が母材のそれよりも大であることを示している。したがって、ろう付けが完全であれば接合部の強度が低下することはない。

溶接試験片についても強度は低下していない。これは、焼結金属では微細な空隙のため一般金属より強度が劣るが、溶接部は空隙がなく、また、溶接部付近の母材の空隙にも溶接金属が含浸されて、溶接部およびその付近では母材よりも強度が大となるためである。すなわ

表5 各種歯車の強さの比較

比較項目 歯車の種類		静的曲げ 破断荷重	曲げ疲れ 破断荷重	曲げ疲れ 破断荷重 静的曲げ 破断荷重	*耐摩耗係数 C $\left(\mu \frac{\text{mm}^2}{\text{kg}} \frac{1}{\text{rpm}}\right)$
圧力角	密度, 熱処理	(kg)	(kg)		
16.5°	中	240	90	0.37	—
25°	中	410	120	0.29	3.3
25°	高	890	270	0.30	1.5
25°	高, 浸炭窒化	1160	500	0.43	0.5

* 圧力角25°中密度歯車のみ自己潤滑

ち, 焼結金属材料の強度増大法として現在実用されている溶浸法と同じ効果を示しているといえる。

以上の結果から3種の試験片の応力-繰返し数線は一致すべきものであることがわかる。したがって, この焼結金属材料の曲げ疲れ限度は 15kg/mm^2 であり, ろう付け部, 溶接部のそれは 15kg/mm^2 以上となる。

4. 結 言

以上の実験結果より各種歯車の強度比較を行ない, 表5に示した。これより次のような結論がえられる。

- 1) 圧力角を標準より大きくすることは曲げ強さを向上させる上で非常に有効であり, 大きい負荷を伝達する焼結金属歯車では 25° 程度の高圧力角を採用することが望ましい。
- 2) 高密度焼結金属歯車は自己潤滑性に乏しいが, 曲げ強さは鋼製歯車に匹敵しうる。
- 3) 焼結金属材料の切欠系数はかなり小さく, とくに試験片が小さい場合, 応力集中による曲げ強さの低下を考慮に入れなくてよい。

したがって, 焼結金属歯車の場合, すみ肉丸みは小さくてよく, 頂ぎきを小さくとる方が曲げ疲れ強さに対して有利になることが予想され, 一般の鋼製歯車とは異なる歯形の採用が考えられる。

また, 焼結金属歯車の曲げ強さ計算式としては応

力集中の影響を考慮せず, 公称曲げ応力計算式を採用することが適当であると考えられる。

- 4) 焼結金属材料の寸法効果は大きい。
- 5) 焼結金属材料の接合は有効であり, 焼結金属製品で成形しにくい形状寸法の場合や, 複雑な金型を必要とする場合などに, 接合を活用することが考えられる。

本研究を行なうにあたり, 焼結金属材料の接合につき御便宜を計っていただいた大阪大学大西教授および研究室の方々に厚く御礼申し上げます。

また, 試験片を提供された住友電気工業株式会社, 日本粉末冶金株式会社に感謝の意を表します。

(1966, 4月4日受付)

参 考 文 献

- 1) 会田俊夫, 他2名: 焼結金属歯車の強度特性(第1報), 精密機械, 31巻1号(1965) 109~114.
- 2) Louis. D. Martin: A Proposed 25-deg Pressure-Angle System for Powder-Metal Gears, Machine Design, Vol. 33 No.9 (1961) 200~202.
- 3) 会田俊夫, 寺内喜男: 歯車の疲労試験機と二, 三の試験結果について, 材料試験, 5巻30号(1956) 553~557.
- 4) 石橋 正: 金属の疲労と破壊の防止, 養賢堂, (昭29).