

繰り返し応力による累積疲れ損傷の概念と 管端スピニング加工に対するその応用

岡村 俊一*・中西 賢二**

(受理 昭和43年5月31日)

REVIEW OF A CONCEPT OF CUMULATIVE FATIGUE DAMAGE UNDER VARIOUS REPEATED LOADS AND AN APPLICATION OF THIS CONCEPT FOR THE EXPERIMENTAL TUBE END SPINNING.

Shunichi OKAMURA,* Kenji NAKANISHI**

The phenomenon of cumulative fatigue damage under various repeated loads have been investigated by many reporters. The purpose of this paper is to present a simple theoretical concept of fatigue damage that is shown in reports and literatures and introduce this concept to predicting workabilities for the experimental tube end spinning.

On the tube end spinning process, the material encountered with (i) Cyclic lateral bending at relief areas of the shaping die and (ii) Cyclic heating by friction, so the tube end spinnability of any metal would be affected by cumulative damage fatigue under cyclic lateral bending, strain-rate and forming temperature.

1. ま え が き

管端スピニング加工においては摩擦熱の拡散を主目的とした溝を有するダイスを回転させながら絞りが行われる。したがって材料は、加工中に

- (i) 溝部での繰り返し曲げ
- (ii) 摩擦による断続加熱

を受ける。この際、加工中に生ずる管壁円周方向の座屈あるいは破壊は加工条件によるものである。¹⁾

繰り返し変動応力を受ける材料の呈する疲れ損傷、あるいは被害に関する理論的解析および実験的研究がこれまで多くの研究者により行われてきた。またこれらに関する多くの展望も見られる。そこで、これら疲れ損傷に関するいくつかの論文に述べられた繰り返し変動応力による累積疲れ損傷についての理論、および考え方についてまとめ、さらに管端スピニング加工の加工条件を繰り返し変動応力による累積疲れ損傷理論から考察することにする。

2. 損 傷 理 論

2.1 損傷理論の函数関係

2.1.1 直線損傷則

損傷理論の函数関係は (1) 式で与えられることが良く知られている。

$$D=f(n_i/N_i)\cdots(1) \quad n_i/N_i=\beta$$

式中 D は損傷度で $D=0$ は試料中に何ら繰り返し応力履歴が存在しない時を示す。 $D=1$ は繰り返し応力のもとでついに試料が破断して二分された時を示す。通常、損傷過程においては、 $0<D<1$ である。 N_i は破断繰返し数、 n_i は任意の繰返し数、 β はサイクル比を示す。 Miner²⁾、 Langer³⁾ らによるとこの函数関係は単純に (2) 式で示される直線損傷則で与えられると述べている。

$$D=n_i/N_i \quad \cdots(2)$$

もし、異なる振幅の繰り返し応力が加えられるとすると (2) 式は (2') 式となる。

$$D=\sum_{i=1,2,\dots,m} (n_i/N_i) \quad \cdots(2')$$

* 鹿児島大学工学部機械工学教室・教授

** 鹿児島大学工学部機械工学教室・元助手 (現大学院学生)

一方、多くの研究者によつて過去に行われてきた実験結果によると損傷度とサイクル比との函数關係は応力値、その順序、応力分布状態により異なり、必ずしも直線損傷則には従わないことが指摘されている⁴⁾。したがつて、損傷理論の函数關係が (3) 式で

$$D=f(\beta, \sigma_i) \quad \dots\dots(3)$$

表わされるという仮説のもとで、(3) 式の函数關係を求める試みがなされている。一方、損傷曲線は応力の前歴に關係するものと考えられており、重複応力による疲労損傷の進行状況は、きわめて複雑で、損傷曲線の適切な表示は困難であると考えられている。

2.1.2 指数 (損傷) 則

疲労損傷は次の物理的変数の函数であろうと考えられている⁴⁾。

1. 個々の疲労生成核の数。
2. 疲労割れの進行。
3. 割れの大きさや形状。
4. クラック面に隣接する材料におよぼす冷間加工の効果と材料内に生じうる熱的再結晶効果。

この考えを考慮に入れることにより、また多くの研究から、損傷理論の函数關係は Miner 則による直線損傷則より、むしろ

$$D=(n_i/N_i)^{x_i} \quad \dots\dots(4) \quad x_i > 1$$

で示される指数則に従うと考えるべきである⁴⁾。任意の時間に試料に累積される疲労損傷の割合は疲労過程における疲労割れの数、またこれらの大きさの函数と考えられており、実験において見られる低応力繰返し

疲れ過程と高応力繰返し過程の間の疲労割れの発生との相異⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾、割れの数および大きさ、応力集中効果、割れの進行等を考慮に入れると (4) 式で示される指数則は、Miner 則よりも、より実験値に近い破壊進行の間の損傷度—サイクル比曲線を示すものと考えられる。

図1にこの概念にもとづいた概略の損傷度—サイクル比曲線を示す。繰返し応力が高くなるにしたがい、損傷度—サイクル比との關係は Miner 則 (直線損傷則) に近づくものと考えられる。低繰返し数疲れ、すなわち高応力繰返しにおける疲れの結果は Miner の仮説による直線則が実験値とよく一致し、高繰返し数疲れ、すなわち低応力繰返しにおける疲れの結果は Miner の仮説とは良い一致が得られないことが確かめられている⁴⁾⁸⁾⁹⁾。

2.1.3 塑性ひずみ振幅と破壊繰返し数の關係

塑性疲れの研究では、一般に結果は塑性ひずみ振幅あるいは全ひずみ振幅と疲れまでの繰返し数との關係として整理される。

Manson 等は塑性疲れの研究において一定塑性ひずみ試験で塑性ひずみ振幅 ϵ_{pa} のもとの破壊繰返し数 N と ϵ_{pa} との間に Manson-Coffin 形の式¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾として知られている。

$$\epsilon_{pa} \cdot N^\alpha = c \quad \dots\dots(5) \quad \alpha \cdot c \text{ は常数}$$

の關係の成りたつことを実験的に確かめている。

(5) 式は定塑性ひずみ振幅 ϵ_{pa} での1サイクル当りの被害は、 $\frac{1}{c} \epsilon_{pa}$ であることを示している。白鳥らは¹⁴⁾、蓄積塑性ひずみエネルギーを基礎として、試験片最小断面での材料の単位体積当りの破壊に到るまでの塑性仕事の総和と塑性疲れ強さとの關係について検討を行い塑性ひずみの総和と破壊繰返し数で整理すると実験値とよく一致すると述べている。

また石井ら¹⁵⁾は特に繰返し折り曲げにおける材料の挙動を明らかにする目的で、軟鋼 (焼鈍および加工のまま)、純アルミニウム、純銅の試験片を用いて、一定曲げ角 (試験片取り付部の両振り角度) で、かつ低繰返し速度で、試片にき裂が発生するまでの繰返し数が 10^4 以下の範囲を対称とした大ひずみ振幅の平面曲げ試験を行い、曲げ角、板厚と折り曲げ疲れ寿命の關係は (6) 式で示されることを実験から求めている。

$$N^m \theta = c \quad \dots\dots(6)$$

$$c = f(t) = a - bt$$

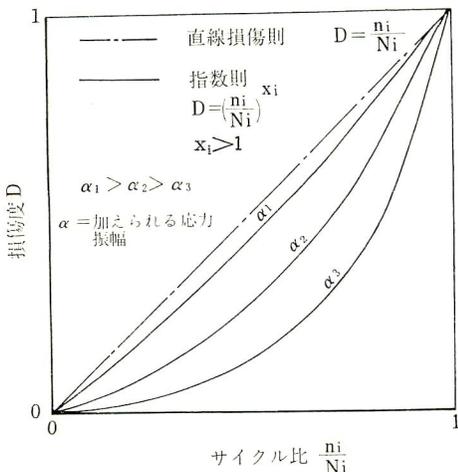


図1 損傷度—サイクル比曲線

$$m = \frac{1}{2}, \text{ 純銅において } \frac{1}{3}$$

a, b 定数, t 板厚

(6) 式はまた Manson¹⁰⁾, Coffin¹¹⁾¹²⁾¹³⁾ の式と類似の形式であり, θ はひずみ量と同等程度の影響を与える因子であることを意味する.

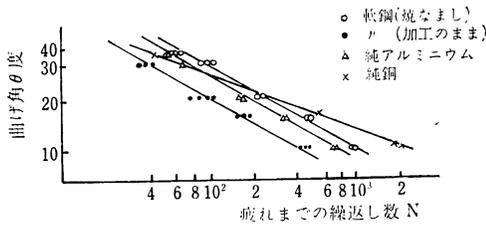
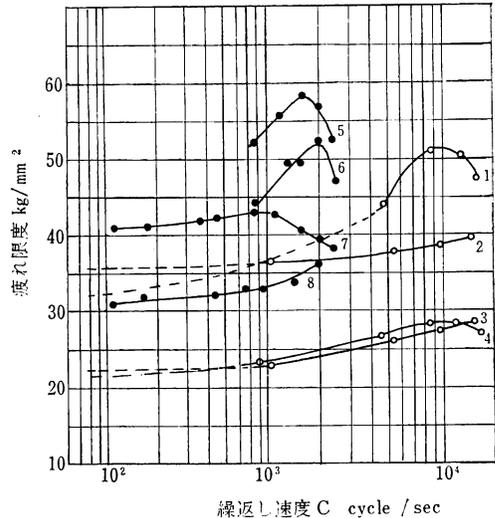


図2 Ishii らが求めた曲げ角—疲れまでの繰返し数の関係 (板厚 $t=2.0\text{mm}$)

2.2 疲れ損傷におよぼす応力繰返し速度の影響
 疲れ強さの速度効果は, 金属材料の疲れ強さに影響をおよぼす因子の一つと考えられている. 一般に疲れ試験に用いられる試験速度は $500\sim 1000\text{ c/min}$ であり, この速度範囲では疲れ強さの速度効果は, ほとんど存在しないと言われている. しかし, ごく低速では疲れ強さは低下して現われ, 逆に数百 c/sec 以上の高速では速度とともに疲れ強さが増すことが観察されている. Jenkin, Lehman¹⁶⁾ による銅, 炭素鋼, アルミニウム・アームコ鉄試験片による $600\text{ c/s}\sim 18\text{ kc/sec}$ の繰返し速度での疲れ試験, また Lomas¹⁷⁾, Wade, Grootenhuis¹⁸⁾ による $120\text{ c/s}\sim 2.5\text{ kc/sec}$ の繰返し速度での鋼材の疲れ試験などによると, 疲れ強さは繰返し速度とともに上昇し, 材質によつては極大値が存在する. しかしこの極大値の現われる繰返し速度は, Jenkin, Lehman の実験値 (約 10 kc/sec) よりも, より大形の試料を用い, また冷却の不十分な Lomas の実験値が低い ($1\sim 2\text{ kc/sec}$) ことや, 試料の冷却を十分に行うことによつて現われないことから, 繰返し速度の増加とともに試験片の内部摩擦が増大するために応力繰返し速度がきわめて高速になつてくると, 内部摩擦による発熱の影響が著るしくなるものと考えられているようである. 特に超音波疲れ試験機を用いた場合は¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾²²⁾ 繰返し周波数が高く, 一般に高応力を受ける部分の体積が大きいために, 内部摩擦による試験片の温度上昇が著るしく, 冷却しなければ試験片の危険断面付近が赤熱することが報告されている²²⁾.

なお, 定性的に塑性ひずみは時間おくれをともらうために, 応力繰返し速度を速くすることは, 一定応力に対する塑性ひずみを減少させる. 逆に一定塑性ひずみを与えるには, 繰返し速度が高いほど, 大きな応力を必要とすることが知られている.

以上の論議から, 低い速度範囲では速度効果は存在



Jenkin, Leman らが求めた疲れ限度の速度効果

- 1—0.86% C 鋼
- 2—0.11% C 圧延鋼
- 3—0.11% C 焼ならし鋼
- 4—焼ならしアームコ鋼

Lomas, Wade らが求めた疲れ限度の速度効果

- 5—2.5% Cr-Mo-V 鋼
- 6—2.5% Cr-Mo-V 鋼 (5 と熱処理が異なる)
- 7—12% Ni-25% Cr 鋼
- 8—36% Ni-12% Cr 鋼

図3 疲れ限度の繰返し速度依存性

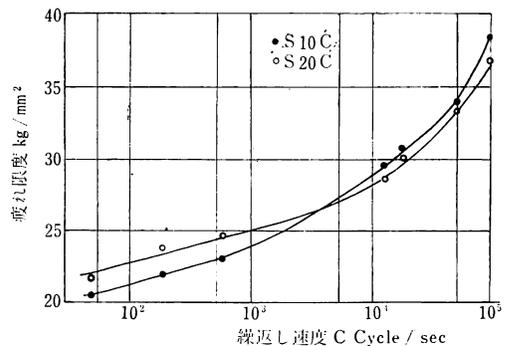


図4 Kikukawa らにより求められた疲れ限度の繰返し速度依存性

せず、数百 c/s 以上の速度範囲では高速度になるにともない疲れ限度は増加する。また速度効果には極大値は存在しないと考えられている。振動による温度上昇をゆるす場合は極大値の存在が認められる¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾ また疲れの速度依存性を内部損失と結びつけてレオロジ的解析したり²³⁾速度効果を転位論で検討する試みがなされている。

2.3 累積疲れ損傷におよぼす温度の影響

材料強度は温度により著しく異なることが良く知られている。したがって温度は疲れ強さに重要な影響をおよぼす因子の1つと考えられており、一般に温度上昇にともない材料の疲れ強さは減少することが確かめられている。種々の材料について的高温疲れ強さに関するこれまでの実験によると常温で耐久限度が認められても、高温では耐久限度の存在しないもの(鉄鋼材料一般)がある。また、アルミニウム合金では常温でも、高温でも耐久限度は存在しない。ひずみ時効、析出硬化の顕著におこるものではかなりの高温においても耐久限度が存在することが明らかにされている。また引張強さと疲れ試験では強度最大の温度が一般に異なる場合が多い。これは両試験におけるひずみ速度が異なるためであると考えられている。

さらに材料によつては青熱脆性が観察され 300~400°C において、疲労強度-温度曲線にピークが認められている²⁴⁾²⁵⁾ 2.2 で述べたごとく低繰返し速度(10~10⁴ c/min)では繰返し速度は疲労強度にはあまり影響を与えない。しかし温度が上昇すると疲労の時間強度(一定繰返し数での破壊の有無)は繰返し速度が減少すると減少する²⁵⁾²⁶⁾。

2.4 熱疲れ

熱サイクルを加えた時、一種の熱疲れ現象を呈することが一般に知られている。これらに関する研究が多く行われているが²⁷⁾²⁸⁾²⁹⁾ 確定した理論は見うけられない様である。

3. 繰返し応力のもとでの累積疲れ損傷の概念から見た管端スピニング加工条件

3.1 管端絞りスピニング加工(成形の良否を定める加工条件)

管端スピニング加工において、加工材料は摩擦熱の拡散を主たる目的として、回転ダイスに設けられた溝によつて

(1) 半径方向の繰返し曲げ、

(2) ダイス壁面と材料との接触面における摩擦による繰返し断続加熱。

を受けながら加工されることが明らかにされている。また実験によると加工条件によつては材料は横座屈(星形に絞られる)を生じたり、あるいは破断するものがあることが確かめられている¹⁾³⁰⁾³¹⁾。これらの現象はスピニング加工法の特質である変動繰返し曲げ、高ひずみ速度、急速加熱による熱間加工などに起因するものと思われる。そこで成形の良否を定める加工条件を繰返し応力のもとでの累積疲れ損傷の概念から考察することにする。なお図5.6に実験装置を示す。

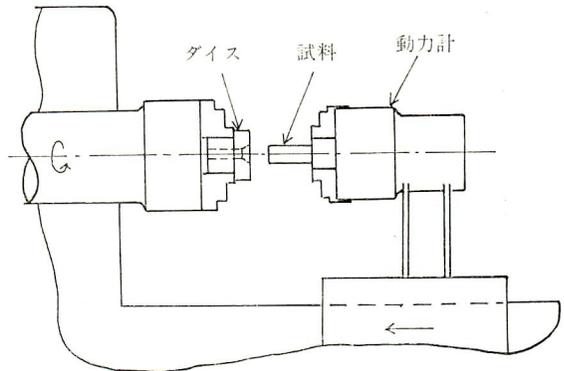


図5 加工装置略図

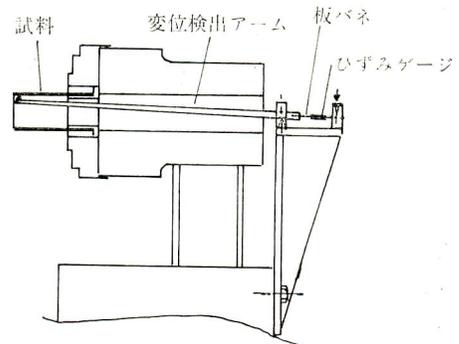


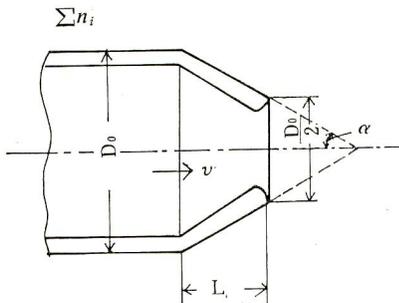
図6 半径方向変位測定装置

3.2 加工中に受ける繰返し曲げによる累積疲れ損傷(横座屈あるいは破壊)。

管端絞りスピニング加工において損傷を生ぜしめる機械的力は、溝部での繰返し曲げと思われる。この加工材の受ける繰返し数が低繰返し数(現在、実験されているものでは 10~1.5×10⁸ cycle)であることから、累積疲れ損傷の函数関係は Miner-Langer 則に従うと思われる。したがって損傷度と繰返しサイクル

比との間には、 $\sum_{i=1,2,\dots,m} \frac{n_i}{N_i} = D \dots (2')$ が成り立つと考えられる。

3.2.1 溝部において試料の受ける繰り返し曲げ数



$$D_0 = 19 \text{ mm} \quad \text{送り速度 } v = f_w \cdot N \cdot \frac{1}{60} \text{ mm/sec}$$

$$L = \frac{19}{4 \tan \alpha} \text{ mm} \quad \text{加工時間 } \frac{L}{v} \text{ sec}$$

$$\text{ダイス回転数 } N \text{ rpm}$$

図7 加工部および加工送り速度

管径 19 mmφ の試料が管径がその 1/2 となるまで絞られる時に試料先端の受ける繰り返し曲げ数 $\sum n_i$ は次式で与えられる。

$$\sum n_i = n \cdot N \cdot \frac{1}{60} \cdot \frac{19}{4 \tan \alpha} \cdot \frac{1}{f_w \cdot N \cdot \frac{1}{60}}$$

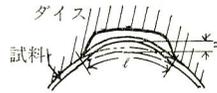
$$= n \cdot \frac{19}{4 \tan \alpha} \cdot \frac{1}{f_w} \text{ (cycle)}$$

式中、 n はダイス溝数、 N はダイス回転数 rpm、 α はダイス半角、 f_w は試料の送り速度 mm/rev である。

式は $\sum n_i$ が回転数 N に無関係であることを示す。

表1 実験条件

ダイス頂角 2α	30°, 45°, 60°		
溝数 n	2, 4		
ダイス回転数 N rpm	送り速度 f_w mm/rev	ダイス回転数 N rpm	送り速度 f_w mm/rev
760	0.45	1930	0.045
	0.07		0.07
	0.1		0.1
	0.23		0.23
	0.5		0.5
1220	0.045	3000	0.045
	0.07		0.07
	0.1		0.1
	0.23		0.23
	0.5		0.5



$$\text{曲げひずみ振幅 } \epsilon = \frac{u}{l}$$

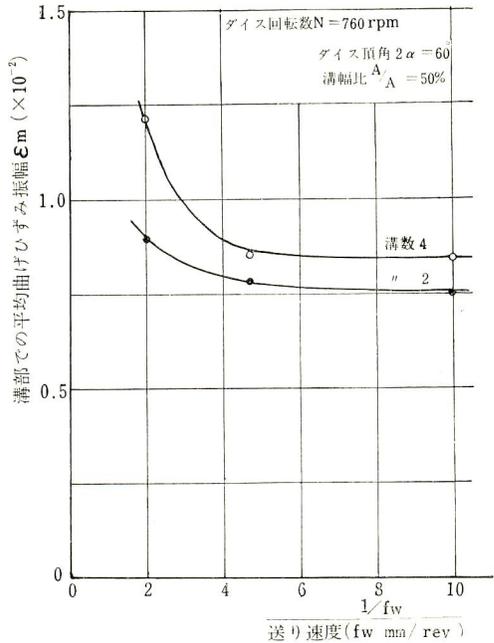
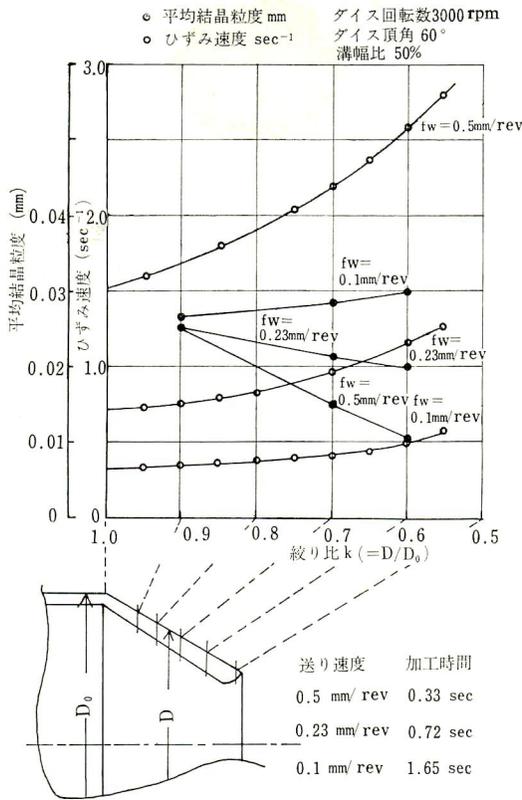


図8 試料先端部が加工中に受ける平均曲げひずみ振幅と送り速度との関係

実験条件 (表1) から $\sum n_i = 20 \sim 1500 \text{ cycle}$ となり、繰り返し曲げによる疲労損傷の状況は低繰返し数疲れ、すなわち高応力繰返しによる破損と思われる。すなわち破損時の溝部での試料の曲げひずみ振幅はかなり大きな値と考えられる。また、曲げひずみ振幅は溝面積比、溝数が同一ならば送りが大きいほど大きい。(図8に1例を示す。)

3.2.2 温度、ひずみ速度が繰り返し曲げによる累積疲れ損傷におよぼす影響

疲労は組織敏感である⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽³²⁾。かなりの高温では疲労の際に粒界クリープ破壊を特性づける粒界空孔の成長による粒界破壊が生ずる⁽²⁵⁾。高温では結晶粒度による強度差は少ない⁽²⁶⁾⁽³³⁾⁽³⁴⁾。などが報告されており、加工部に再結晶組織が認められる⁽³¹⁾管端スピニング加工の加工条件の選定には、加工中の加工部の温度、ひずみ速度および組織変化が考慮されねばならない。管端絞りスピニング加工において、加工中の加工材の再結晶粒度は、加工温度、加工ひずみ速度、加熱時間の函数となることが確かめられている⁽³¹⁾。図9はこれらの因



子が組織におよぼす影響を脱炭銅管の試料を用いた実験によつて求めたものの一例である。

すなわち、加工時の加工部の局所的ひずみ速度の相違、加熱時間の相違により、再結晶粒度が異なることを示す。温度分布および加熱時間(約 0.5 sec)が加工部全体でほとんど変わらずにひずみ速度が高く(平均 1~2 sec⁻¹) その高低の差の著しい(0.7~1.3 sec⁻¹ および 1.5~2.85 sec⁻¹) 場合は、加工部はひずみ速度分布に応じた再結晶粒度分布を呈している。(ひずみ速度が高い程再結晶粒度が細かい。)

一方、ひずみ速度が低く(平均 0.4 sec⁻¹) その高低の差も小さい(0.3~0.55 sec⁻¹) 場合は、ひずみ速度よりもむしろ加熱時間による影響が顕著に現われてくる。(加熱時間の長い先端部ほど再結晶粒度が大きい。) また材料自体が温度による脆性を示すものは、溝面積の選定により温度上昇を制限あるいは温度の調整を必要とする。

3・2・3 繰返し速度

管端スピニング加工において溝部で生ずる繰返し

曲げ速度は

$$V = n \cdot N \cdot \frac{1}{60} \text{ c/sec}$$

で与えられる。式中 n はミゾ数、 N はダイス回転数 rpm である。実験条件(表1)から

$$40 < V < 200 \text{ c/sec}$$

であり、繰返し曲げによる累積疲れ損傷に与える速度効果は存在しないと考えられる。しかし温度が上昇すると疲労の時間強度は繰返し速度が増加すると増加すると考えられる^{2・2)}。

4. ま と め

管端スピニング加工における加工材料の受ける累積繰返し数 $\sum n_i$ は 10⁴ 以下である。したがつて、溝部での応力あるいは曲げひずみ振幅は、かなりの大きさ(溝面積比および溝溝数が同一なら、 f_w が大きいほど大きい)までゆるされる。繰返し速度は 200 c/sec 以下であり、疲れ強さにおよぼす速度効果は存在しない。しかし、温度が上昇すると疲労の時間強度は繰返し速度が増加すると増加すると考えられる。

疲労は組織敏感であることから加工中の再結晶組織が重要となる。管端絞りスピニングにおける加工材料の再結晶組織は、温度、ひずみ速度、加熱時間により決定される。実験(試験片は銅管)では、ひずみ速度が小さいほど、また加熱時間が長いほど、再結晶粒は大きいという予想どおりの結果と完全に一致する。

文 献

- 1) 岡村俊一・田中秀穂・中西賢二: 管端スピニング加工に関する研究(第3報) 鹿大工学部研究報告, 9.
- 2) M. A. Miner: Trans, ASME. 67 (1954), J. Appl Mech, A 159.
- 3) B. F. Langer: ASME. 59 (1937), J. Appl Mech, A 160.
- 4) S. M. Marco and W. L. Starkey: Trans, ASME. (1954).
- 5) B. Strom: J. Inst, Metals. 83 (1954-55), 530.
- 6) D. S. Kemsley: J. Inst, Metals. 85 (1956-57), 153.
- 7) 大久保筆・後藤 学: 日本機械学会論文集. 32 巻 (234号), 昭 41~42.
- 8) 大路清嗣: Journal of the JSME. Vol. 70, No. 576.
- 9) 菊川 真・大路清嗣・鎌田 敬雄・城野 政弘: