焼結アルミナのくり返し衝撃疲れ*

杉 田 忠 彰** 佐 野 幸 雄*** 山 田 巖**

Fatigue Failure of Sintered Alumina due to Repeated Impulsive Stresses

Tadaaki SUGITA, Yukio SANO, Iwao YAMADA

The fatigue behavior of two kinds of sintered alumina, hot pressed and cold pressed, is discussed under repeated impulsive stresses in this paper. Strength of the fatigue on the basis of 10^5 cycles decreases remarkably, that is $0.4 \sim 0.5$ of the short time strength. It is suggested that the fatigue is mainly caused by increase in dynamic contact stress (Hertzian stress) under the surface of loading point.

1. 緒 言

別報¹⁾で焼結アルミナの静的曲げ応力およびくり返し曲げ応力下での疲れ挙動を検討した結果、作用応力の静、動にかかわらず狭い応力範囲ではあるが疲れの起こることがわかった。そしてその疲れ線図から動的な応力の作用する場合の疲れの機構も静的曲げ疲れと同じく時間おくれ破壊に支配されているようであり、疲れ現象そのものが若干促進されるのではないかと推論した。ここで応力の作用速度が疲れと何らかの関係を有しているようであるが、前記の報告だけでは明確ではない。

そこで、本報告では焼結アルミナに衝撃応力をくり返し与えたときの疲れ挙動について検討して、応力の作用速度と疲れとの関連性を実験的には握しようと試みる。これまでにこの種の材料の衝撃抵抗あるいは疲れの有無を論じたものは若干あるが^{2), 3), 4)} 応力の状態、速度と疲れの関係にまで及んで論じられていない。したがって、実験結果の定量的な妥当性までを含めて厳密に論ずることはできないが、ここでは一つの実験とその検討を通して焼結アルミナの疲れの一傾向を知ることができよう。そしてこの結果と別報⁷⁾の結果との比較から応力状態の差異によって疲れ強さがいかに左右されるかについて検討してみる。これらのことにより、たとえばセラミック工具の破損を作業状態からある程度予知することができようし、工具破損そのものの規則性をかなり知ることができると考える。

2. 実験方法

2.1 くり返し打撃試験機

* 原稿受付 昭和42年8月21日、岡山地方講演会（昭和39年11月27日）にて発表。

** 正会員 姫路工業大学（姫路市書写西坂）

***大阪大学大学院

この実験のために製作したくり返し打撃試験機を図1に示す。この試験機は重錘をつけたつちの自然落下を利用したものであって、落下距離を一定に保ち重錘の重量をかえることによって衝撃力を種々に選択できる。図に示すようにカム軸に回転を与えるとカムは打撃棒の支点の右側を押し下げ、重錘をつけた打撃棒を60mmだけ振り上げる。そしてカムの遊び行程に入ると同時に打撃棒は加圧ローラ（4φ×10ベアリング用）を叩き、支持ローラ（4φ×10ベアリング用）で支えられた試験片の中央荷重点を打撃する。この試験機の打撃くり返し数は毎分140回である。

このときの打撃速度は重錘の自然落下からは 1.15m/s と求められるが、エネルギー損失のために重錘の重量によって打撃速度が著しく異なるか否かを次に述べるような方法で実験的に求めてみた。すなわち、薄い板ばねに半導体ゲージ(新興通信, E N—108, 114.2Ω)をはりつけ、 60mm 振り上げた上記試験機の打撃棒の下に置く。そして打撃棒先端が加圧ローラを叩たく直前 0.8mm の距離の平均速度をオシロスコープで測定した。そして $50\sim$

1. 試験片 2. 支持ローラ (5φ×10ベアリング用) 3. 加圧ローラ (5φ10ベアリング用)
4. 重錘 5. 打撃棒 6. バランス重錘
7. カムローラ 8. カム

図1 くり返し打撃試験機

重錘140 g タテ軸38.5kg/div
ヨコ軸0.2ms/div

図2 打撃波形の例

BaTiO₃ (Murata) 20φ5
固有振動数493kc
回路入力コンデンサC=50000PF

図3 BaTiO₃の荷重と出力電圧との関係

200 gのときの速度として0.95~1.1m/sを得た。これから本実験に用いる重錘(50~200 g)の範囲では打撃速度に大きな差異はないとした。

2.2 瞬間最大作用力の測定

ここで試験片に与える物理量は衝撃エネルギーであるが静的曲げ疲れおよびくり返し曲げ疲れと比較する目的から衝撃応力に相当する応力を得るための瞬間最大作用力を測定した。すなわちチタン酸バリウム圧電素子(村田製作所, 20φ×5)をくり返し打撃試験機に取付け種々の重錘下で打撃を与えた

ときの圧電子の出力を50000 PFの無誘導入力コンデンサを介してオシロスコープ(岩崎通信機, SS 5302)に入れ図2のごとき打撃波形を記録した。

これを木本の用いた装置⁵⁾と較正方法⁶⁾によって図3に示す荷重と出力電圧との関係を得て, これを瞬間最大作用力とした。同様の測定について井川⁷⁾は十分な考慮を払えば, かなり信頼度の高い測定結果が得られることを証明している。ここで出力-1 Vに対して38.5kgを得た。以上の方法によって, 種々の重錘と瞬間最大作用力との関係を求めると図4のごとくなる。50 g以下では摩擦による損失によって直線関係からはずれるので, 実験では50~200 gの重錘を用いた。

図4 瞬間最大作用力の測定

図5 高温圧縮焼結アルミナのくり返し衝撃疲れ

図6 常温圧縮焼結アルミナのくり返し衝撃疲れ

2.3 試験片その他

試験片として高温圧縮材と常温圧縮材を用いたが, これについては前報¹⁾で述べた。寸法形状は幅4×高さ2×長さ6 mm(支点間4 mm)である。この長さは2.2で述べた重錘のとり得る最低重量の制約をうけて決定した。試験片の各コーナには0.05R程度の丸味をつけ微視

的なきずを除去した。表面は#400ダイヤモンド砥石で研削しており, $H_{max}=2.5\sim 3\mu$ とした。

3. 実験結果

図2の衝撃的応力波形が試験片にくり返し与えられた

状態の下で、瞬間最大曲げ応力と破断までの打撃くり返し数との関係を求めた。図5は高温圧縮材の、また図6は常温圧縮材のくり返し衝撃疲れ試験結果である。高温圧縮材と常温圧縮材との間での強さの差はくり返し数が少ないときに大きい。そして、くり返し数の増加とともにその差が小さくなる。疲れ線図の形からみると、静的曲げ疲れとかくり返し曲げ疲れとはかなり疲れ特性を異にしていることがわかる。前報⁹⁾の図5, 6, 7および8との比較からも明らかなように静的曲げ疲れ、くり返し曲げ疲れ、くり返し衝撃疲れと応力の作用速度が大になるにしたがって強さのばらつきは大となる⁹⁾。その上、くり返し衝撃疲れの場合には打撃回数の影響が大きく疲れ強さの低下が著しい。すなわち、この場合応力作用速度の依存性が大である。たとえば、 10^5 回における疲れの時間強さは短時間破壊強さの43%程度であって、静的曲げ疲れあるいはくり返し曲げ疲れのそれが80%以上もあることからみると、その影響の大小は明白である。なおくり返し衝撃の場合の応力波形の立ち上り時間は0.1msであり、くり返し曲げの場合のそれは12msである。

4. 実験結果の検討

以上の実験結果のように応力の作用速度が大なる場合にとくに疲れ強さが低下しやすいことの必然的な理由は現在のところ明らかではない。1回だけ応力を与えた場合には応力の作用速度の大なる場合ほど高い強さで示されるはずであり⁹⁾、この点からすると図5とか図6のような結果とはならず、もっと高い応力範囲で疲れ挙動がみられてもよいのではないと思われる。この問題を次のような点から考察してみた。

(i) つちの衝突にもとづく衝撃応力波(主として弾性波の問題)の伝ばと程度

(ii) 衝撃時の弾性接触による Hertz 応力

すなわち、2.2で述べたような瞬間最大作用力の概念で求まる単純曲げ応力よりも実際にはもっと高いあるいは組合わせの別の応力が作用しているのではないかという疑念が残る。

(i) に関しては、いま単純なモデルを考える。すなわち一方固定の有限長さの棒に別の物体がある速度で衝突するとき、最大圧縮応力は重錘50~200gで $65 \sim 130 \text{ kg/mm}^2$ となる。もちろん本実験の両端支持はりでこの大きさの衝撃応力があるとは考えられないが、自由端で反射したときに引張応力に変換することの影響はあるかも知れない。すなわち、はりの断面の中主軸より下側の引張応力側で、反射した衝撃応力と曲げ応力との組合わせ応力の生ずることが考えられ、そういった意味での衝撃応力の

図7 FC15のくり返し衝撃疲れにおけるクラック、荷重点直下の部分

$\sigma'_{bmax} = 32 \text{ kg/mm}^2$ $N = 26$

$\sigma'_{bmax} = 32 \text{ kg/mm}^2$ $N = 26$

図8 FC15のくり返し衝撃疲れにおけるクラック、支持点直上の部分

影響が考えられる。(ii)の問題として、荷重点の加圧用円柱ローラと試料平面との弾性接触のときの応力が考えられる。この場合一応応力の速度は無関係として Hertz の式で検討してみた¹⁰⁾。その結果最大圧縮応力は $275 \sim 457 \text{ kg/mm}^2$ となり最大せん断応力は表面下 $0.02 \sim 0.03 \text{ mm}$ のところで $80 \sim 130 \text{ kg/mm}^2$ となる。このせん断応力では静的にも破壊は起こり得る。しかし、Hertz の式は半無限体について求めたものであって、はりのようにたわみが出る場合にはこの応力値はずっと低くなるはずである。また荷重点の加圧ローラの変形も関与してくるであろう。ともあれ、この Hertz 応力とくにせん断応力の影響が大となれば、打撃のくり返しで最大せん断応力部から破壊が選択的に生ずる可能性は十分ある。そのような状態下では予測したよりも低い曲げ応力で破壊するはずである。

いまこの Hertz 応力の影響を分りやすく知るために鋳鉄を試験片として、くり返し衝撃破断時の側面におけるクラックの形態を観察したのが図7と図8である。図7は荷重点直下のクラックで、ここではやはりせん断応力によるクラックがみられる。そしてそれは引張応力側から進行してきたクラックとつながっている。試験中の観察によるとせん断応力によるクラックが先行する。図8は支持点直上にみられるクラックである。支持点の材料力学的性質からみてもこれは明らかに Hertz 応力のみ依存するせん断破壊であり、クラックは停留している。ここで興味あることは、同様の試験片に同じ値の静的な応力を与えたときには、くり返し衝撃のときにみられた Hertz 応力によるクラックは観察されなかった。これは応力の作用速度が大の場合には計算したよりも大きい Hertz 応力が生ずるということと、それをくり返し与え

ることの影響の差異だと考えられる。前者については論議の余地を残しているので今後検討を加えねばならないが、後者については一応認めざるを得ない。すなわち、あるくり返し数後に荷重点直下でせん断破壊が生じ進行するようになる。

以上の検討の結果をまとめると、衝撃によって発生した Hertz 応力のくり返しにより、荷重点直下でせん断クラックが発生する。これがその応力のくり返しにともなって次第に進行し断面積を減じるのでやがてみかけより低い曲げ応力で引張力側から曲げ破断を生ずる。その上、付加的に曲げ破断のさい衝撃応力が影響すると考えられる。

さきに既報¹⁾で静的曲げ疲れとくり返し曲げ疲れの比較において応力の動的効果もしくは速度効果があるのではないかと推論し、それは疲れを促進する役割を果しているのではないかと考えたが、これは確かに重要な事象である。以上の検討もあわせてこの三者の疲れのあり方をここで考えられる範囲でまとめると次のようになる。すなわちいずれの場合にも疲れ破断に対して単純くり返し曲げ応力による時間おくれ破断という原因と Hertz 応力のくり返しによるせん断破壊という原因が同時に重なって生じている。そして、応力の速度が大になるほど Hertz 応力の影響が大となり、それによるクラックの進行が早められ、みかけ上疲れ強さは低くなる。

また、高温圧縮材は常温圧縮材よりも衝撃疲れ強さが大きい。前報¹⁾図 5, 6, 7 あるいは 8 との比較から、ただ 1 回の衝撃で破損する強さは静的な応力下での強さと同程度か、それをやや上回る。しかし、くり返し数の増加とともにこの両材料間でのくり返し衝撃時の疲れ強さの差は小さくなっている、この両材料間の強さの差は、前報¹⁾の図 3 でも明らかなように、粒径の大小で評価できるとみてよい。すなわち焼結方法の特徴から小粒径のものを得やすい高温圧縮材の強さは、静的な応力下でも衝撃的な応力下でも常に大きいとみてよい。ただ、衝撃くり返し数の多いところで両材料の強さの差が小さいのは、衝撃に対する感受性が両材料で若干異なるのではないだろうか考えられる。たとえば、高温圧縮材は常温圧縮材よりも少しもろいのではないかとということになる。しかしながら、強さとしては高温圧縮材の方がすぐれていることは明らかである。

4.2 断続切削における工具破損との関連性

断続切削におけるセラミック工具の破損は本報と既報^{1), 11)}の結果からみて機械的衝撃に支配されるところが大であるとみななければならない。たとえば図 9 は FC 15 をセラミック正面フライスで切削したときの工具破損と

FC15を300φの正面フライスで切削したときの
刃先欠損 切込み2mm, 1刃送り0.08~0.35
mm/tooth

→印のものは、切削続行可能

図9 セラミックカッタの破損¹³⁾ (常温圧縮焼結アルミナ使用)

打撃くり返し数との関係である¹¹⁾。これによると明らかに衝撃的切削抵抗(工具と被削材の衝突直後の切削抵抗)の大なる切削条件下で工具破損は早く起こる。そして局部的欠損の生ずる時期からみてこれは図5とか図6の形式の疲れとみてよいのではないかと考える。場合によっては熱的な衝撃あるいは疲れも問題となるが¹²⁾しかしまず工具破損防止策として第1に考慮すべきは機械的衝撃の少ない、かつ刃先強度の大なる工具形状をとるべきであろう。

5. 総 括

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 焼結アルミナは焼結方法、粒径のいかんにかかわらずくり返し衝撃によってその疲れ強さを著しく低下する。すなわち、 10^5 cyclesにおいて、もとの強さの40~50%となる。
- (2) くり返し衝撃の場合にとくに疲れ強さの低下が顕著であるのは、応力の作用速度が大であることに基づく Hertz 応力とか衝撃応力の増大とそのくり返しに基因しているとみられる。
- (3) セラミック工具がとくに衝撃作用を受けるときに破損しやすいのは、機械的くり返し衝撃に基づく疲れによるものと解釈される。

以上の実験に際して、変わらぬご指導を賜った大阪大学名誉教授上田太郎先生ならびに大阪大学教授田中義信先生に心より感謝の意を表する次第である。また実験試料の製作にご援助をいただいた、日本タングステン株式会社小川一樹氏と日本特殊陶業株式会社鈴木滋氏に御礼申し上げる。

引用文献

- 1) 杉田忠彰, 佐野幸雄, 山田巖: 焼結アルミナの疲れ挙動, 精密機械, **34**, 4 (1968) 254.
- 2) L. S. Williams: Stress-Endurance of Sintered Alumina, Trans. Brir. Ceram. Soc., **55** (1956) 287.
- 3) S. Pearson: Delayed Fracture of Sintered Alumina, Proc. Phys. Soc., **69-B** (1956) 1293.
- 4) W. D. Kingery, J. Pappis: Note on Failure of Ceramic Materials at Elevated Temperature under Impact Loading, J. Amer. Ceram. Soc., **39**, 2 (1956) 64.
- 5) 木本保夫: 放電加工における衝撃力について, 電気学会誌, **81**, 11 (1961) 1877.
- 6) 木本保夫, 田宮勝恒: 力の測定における圧電素子の校正, 精密機械, **29**, 3 (1963) 220.
- 7) 井川直哉: ダイヤモンド砥石の研削性能に関する研究, 学位論文, 大阪大学, (1964) 17.
- 8) 横堀武夫: 脆性材料の強度について, 窯業協会誌, **68**, 10(1960) 361.
- 9) たとえば谷口紀男: 非金属材料の特殊加工法, 地人書館, (1965) 24.
- 10) たとえば石橋正: 設計を主とした金属の強さ, 養賢堂, (1962) 23.
- 11) 杉田忠彰: 鋳鉄の正面フライス削りにおける Ceramic Cutter の破損, 姫路工大研究報告, 19A号 (1966) 87.
- 12) 杉田忠彰: セラミックカッタの熱損傷 (第4報), 精密機械, **32**, 5 (1966) 357.

— 表紙説明 —

新 製 品

ローラプロフィルメータ

本装置は圧延ローラ等の形状を検査する装置で同期電動機により測定ヘッドを動かして形状を正確に測定, 記録し検査をおこないます。

測定には差動トランスをもちいた電子マイクロメータを使用しますから高感度であり, 測定圧が小さくしかも出力が電気信号ですからレコーダに接続して容易に測定値の自動記録ができます。

測定範囲	直径 最大 25mm 長さ 最大 380mm
測定台送り	ねじ送り方式
測定台移動速度	180mm/分
測定値指示範囲 目 量	$\pm 10\mu$, $\pm 50\mu$, $\pm 250\mu$ 0.5μ , 2μ , 10μ
測定精度	$\pm (\text{目量} \times \frac{1}{2} + \text{指示値の } 2\%)$
電 源	100V, 50/60Hz

(本社) 東京都港区南麻布 4-12-20
(03) 442-8171
(支店) 大阪市東区高麗橋 5-17
(06) 202-7561

(札幌) (0122) 26-8391
(福岡) (092) 76-5347
(名古屋) (052) 961-5786
(厚木) (0462) 22-3311