

628 超硬合金の繰返し熱衝撃下のき裂進展特性（機械的繰返し荷重との比較）

Cyclic crack growth behavior under repeated thermal shock in cemented carbides
(Comparison with those under mechanical fatigue tests)

○正 石原 外美（富山大工） 正 柴田 博司（富山商船高専）
正 五嶋 孝仁（富山大）

Sotomi ISHIHARA*, Hiroshi SHIBATA**, Takahito GOSHIMA*

* Faculty of Engineering, Toyama University, Toyama 930-8555, Japan

** Toyama National College of Maritime Technology, Toyama 933, Japan

Repeated thermal shock tests were performed using cemented carbides with two different WC grain sizes to study a cyclic crack growth behavior. The results were compared with those obtained by a rotating bending fatigue tests (stress ratio = -1) as well as pulsating fatigue tests in tension at stress ratio of 0.1. The cyclic growth rates under the repeated thermal shock correspond well with those obtained by a rotating bending fatigue tests, however they are faster than those of the pulsating fatigue.

Key Words: Thermal Shock, Crack growth, Thermal stress, Mechanical fatigue, Stress ratio

1. 緒言

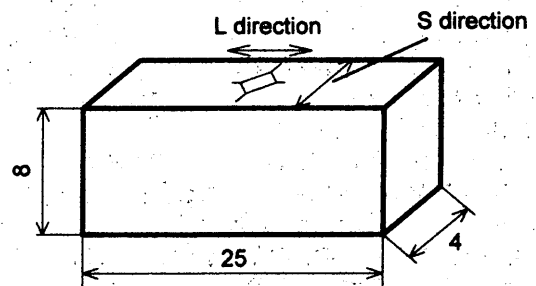
切削加工では、高送り切削や激しい断続切削時に生じる熱衝撃により、工具に熱クラックの発生することが知られている。耐熱衝撃性に優れた工具を開発するには、このような工具材の熱衝撃挙動を明らかにする研究が必要と考えられる。しかし、工具材に用いられる超硬合金の熱衝撃挙動を調査した研究は、セラミックス等の他の材料に比べて極めて少ない。そこで本研究では代表的な硬脆材料である超硬合金を用いて熱衝撃疲労実験を行い、繰返し熱衝撃下のき裂進展挙動を調べ、その場合のWC粒径の影響について調べた。また、常温における機械的曲げ疲労実験も併せて行い、これらのき裂進展挙動と熱衝撃下のき裂進展挙動との比較を行い、その関連性を考察した。

2. 試験片及び実験方法

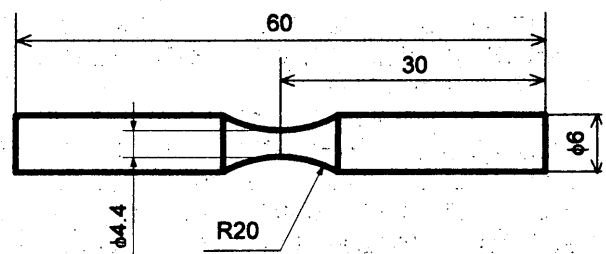
2.1 試験片 本実験に使用した試験片素材は、原料のWC粉末の粒径が8.5 μm 及び2.5 μm のWC-C α 系超硬合金である。その化学成分はWC:72, TiC:8, TaC:8, NbC:2, Co:10wt%であり、焼結後の機械的性質はヤング率:527.2GPa, ポアソン比:0.222, 線膨張係数:5.34 $\times 10^{-6}$ である。試験片はこのように混合した粉粒体を加圧成形、脱脂予備焼結、成形加工、本焼結を経て図1に示す試験片形状に仕上げたものである。

2.2 実験方法

2.2.1 温度分布測定 冷却面の試験片下面を除いた全ての面を断熱するために、シリコン系充填材でこれらの面を被覆した。その後、試験片を473K及び523Kで20分炉中加熱後、すばやく293Kの水中に試験片下面のみを水に接触させ、そのまま5分間冷却することにより熱衝撃を与えた。繰返し熱衝撃実験は、タイマー制御の小型モーターを正転、逆転させることにより、試験片を炉と水中の間を上下させることにより行った。実験装置の略図を図2に示す。き裂の無い試験片の側面に冷却面からの距離がそれぞれ0, 2, 4, 8mmの4個所の位置に熱電対を取り付け、熱衝撃時の冷却面からの距離に対する温度分布を調べた。測定は加熱温度毎にそれぞれ4~5回行い、これらの平均したものを冷却曲線として、熱衝撃時の動的熱応力の計算に用いた。



(a) Thermal shock and bending fatigue tests at R=0.1



(b) Rotating bending fatigue tests (R=-1)

Fig.1 Shape and dimensions of the specimens

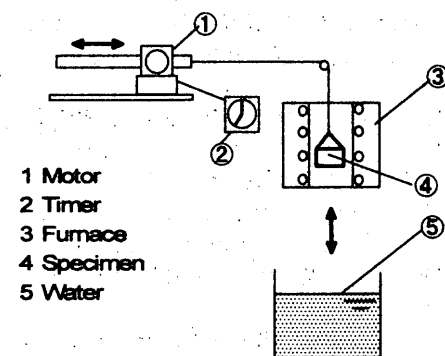


Fig.2 An experimental apparatus

2.2.2 熱応力解析 冷却面からの距離に対する温度分布より以下の熱応力評価式を用いて試験片長手方向への熱応力を計算した。このとき熱は試験片高さ方向にのみ伝達されるものとし、物性値の温度依存性を考慮しなかった。ここで、 α 、 E 、 ν はそれぞれ線膨張係数、ヤング率、ポアソン比、 $2c$ は板厚、 T は温度である。

$$\sigma(x) = -\frac{\alpha ET}{1-\nu} + \frac{1}{2c(1-\nu)} \int_c^x \alpha ET dy + \frac{3}{2c^3(1-\nu)} \int_c^x \alpha ET y dy \dots \dots (1)$$

2.2.3 繰返し熱衝撃下でのき裂進展特性 ダイヤモンドペーストにより鏡面に仕上げた試験片の冷却面に、任意の荷重でピッカース硬度計により予き裂を導入後、繰返し熱衝撃実験を行い、任意の回数毎に、試験片の長手方向(L方向)とそれと直交する方向(S方向)のき裂長さ $2a$ を、工学顕微鏡によって約400倍から1000倍で測定した。得られたき裂進展曲線より、き裂進展速度 da/dN と熱応力拡大係数幅 ΔK の関係を求めた。応力拡大係数 ΔK はラジュ・ニューマンの式を用いて算出した。この際表面き裂のアスペクト比は、実験結果より $b/a=0.74$ 一定とした。ここで、 b は表面き裂の深さである。また、応力拡大係数幅の計算において、き裂進展に有効なのは引張り応力だけと考えられるので、 $\Delta\sigma = \sigma_{max}$ として計算した。ここで、 $\Delta\sigma$ ：応力振幅、 σ_{max} ：最大応力である。

2.2.4 機械的曲げ疲労実験 熱衝撃実験と同一の化学成分、WC 粒径並びに機械的性質を有する超硬合金を用いて、応力比-1の片持ち回転曲げ疲労実験、並びに応力比0.1の片振りの引張り疲労実験を行った。回転曲げ疲労実験には図1(b)に示す丸棒試験片を用い、片振り引張り疲労実験には図1(a)に示す直方体形状試験片を用いた。いずれの実験も室温、応力繰返し速度 10 Hz で行った。ピッカース圧痕からのき裂の進展挙動を、レプリカ法を用いて測定した。応力拡大係数の計算には、熱衝撃実験と同様にラジュ・ニューマンの式を用いた。

3. 実験結果

3.1 繰返し熱衝撃下と両振機械疲労におけるき裂進展挙動との比較 (R=-1) 図3は、WC 粒径 2.5 及び 8.5 μm の超硬合金を用いて繰返し熱衝撃下でピッカース圧痕から発生、進展するき裂の進展速度 da/dN (m/cycle) と応力拡大係数幅 ΔK (MPa m^{1/2}) の関係を両対数グラフに示したものである。図よりわかるように、高 ΔK 領域では、き裂進展速度には WC 粒径による明確な差異は認められないが、低 ΔK 域においては差異が認められる。すなわち WC 粒径 8.5 μm に対する ΔK_{th} 値は、WC 粒径 2.5 μm のそれよりも大きい。

図中には、応力比-1で行われた回転曲げ疲労実験の結果も比較のために併せて示されている。図からわかるように、回転曲げ疲労のき裂進展特性にも、低 ΔK 域において熱衝撃と同様の WC 粒径依存性が認められる。しかし、繰返し熱衝撃におけるき裂進展特性と R=-1 の回転曲げ疲労におけるき裂進展特性との差異は明確に認められず、両者のデータはほぼ同一の帯域にある。

3.2 繰返し熱衝撃下と片振り引張り機械疲労におけるき裂進展挙動の比較 (R=0.1)

図4は、図1と同一形状の試験片を用いて、室温で R=0.1 の片振り引張りの機械疲労実験から得られたき裂進展挙動と、繰返し熱衝撃によるき裂進展挙動を比較したものであ

る。但し機械疲労では、WC 粒径 2.5 μm についてのみ実験を行った。図から、R=0.1 の機械疲労のき裂進展特性と繰返し熱衝撃疲労下のき裂進展特性には明確な差異がある。

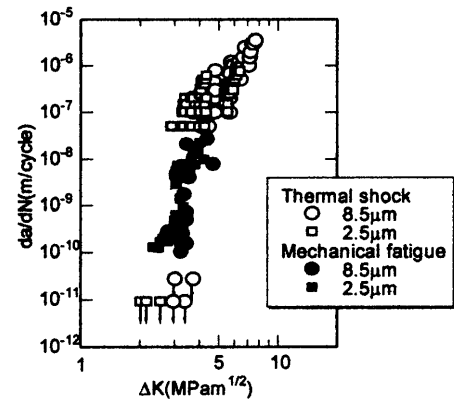


Fig.3 Comparison of crack growth behavior under repeated thermal shock with those of mechanical fatigue (R=-1).

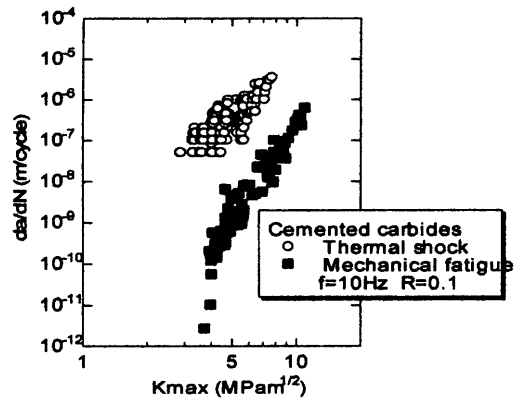


Fig.4 Comparison of crack growth behavior under repeated thermal shock with those of mechanical fatigue (R=0.1).

4. 考察

R=0.1における繰返し熱衝撃と機械的疲労のき裂進展特性の差異は、窒化珪素セラミックスにおいても認められた。これはいわゆる架橋効果によるものと推察される。

R=0.1の片振りの機械疲労では、き裂ウェークに未破断のWC粒による架橋部が存在する。両振りの機械疲労では、引張りと圧縮の交番応力によって未破断の架橋部が解消される。このため、R=-1の両振り疲労では片振り疲労に比較してき裂進展速度が加速する。応力比によって機械疲労のき裂進展特性に差異が生じたのは上記の理由に基づくものと推察できる。一方、繰返し熱衝撃では、試験片の加熱、冷却を交互に繰返す。これにより WC/CO の結晶粒界面には冷却時と加熱時に引張りと圧縮の微視的熱応力が交互に作用し、き裂ウェークに WC 粒による架橋部が生成し難い。

以上のことから架橋部が生成し難い繰返し熱衝撃実験と R=-1 の両振り機械疲労実験では、 ΔK =一定条件で同一のき裂進展速度を示したと思われる。

5. 結言

(1) 繰返し熱衝撃下のき裂進展速度と応力拡大係数の関係は、室温中の回転曲げ疲労試験における関係と良く対応するが、応力比 0.1 の片振り引張り疲労実験結果とは異なることがわかった。

(2) 両振りの機械疲労実験から、繰返し熱衝撃下のき裂進展速度を推定することができる。 文献 省略