

高強度金型の熱クラックを抑止する設計指針に関する研究

東京都立大学 システムデザイン学部 機械システム工学科

教授 若山 修一

(2019年度 一般研究開発助成 AF-2019026-B3)

キーワード：高強度金型材料，熱クラック，ディスク・オン・ロッド試験

1. 研究の目的と背景

加工の高速化、高応力化に伴い、金型や切削工具等の耐久性・耐摩耗性を向上させるために超硬合金の利用が普及しているが、さらに被加工品の表面性状の向上を目指し、より表面平滑度の高いサーメット、さらにはセラミックスの使用が推進あるいは検討されている。しかしながら、これらの材料は塑性変形能が低い本質的な脆性材料であり、耐熱衝撃性が低いことが弱点になっている。

塑性加工中には、摩擦により金型が局所的に急加熱される場合や、加熱された金型の表面が潤滑油で急冷される場合に大きな熱応力が発生し、その繰り返し(熱疲労破壊)で熱クラックが発生することがある。また、押し出し金型を型枠に焼ばめで設置しようとした際に即時破断(熱衝撃破壊)を生じる例も知られている。これらの問題を解決するためには、熱応力を十分に考慮した金型設計技術や耐熱衝撃性に優れた材料の開発が不可欠であり、熱クラックの発生および進展、すなわち熱衝撃(疲労)破壊メカニズムの解明および評価法の確立がこれらの材料および金型等の信頼性を確保するためのキーテクノロジーといっても過言ではない。

従来の熱衝撃破壊試験は、加熱した試験片を水中投下によって急冷し、その残留応力を測定する方法が用いられており、セラミックスの場合は JIS R 1648「ファインセラミックスの熱衝撃試験方法」に規格化され、サーメットにも利用されている。しかしながら、この試験では、評価できるのは臨界温度差のみであり、材料間の耐熱衝撃性の相対的な比較しかできない、などの問題点が指摘されている。熱衝撃破壊は、局所的な急冷や急加熱に起因する熱流動によって形成される温度場によって生じる遷移的な熱応力の下で、マイクロ損傷が発生・蓄積して巨視き裂(熱クラック)が生成される現象であり、熱衝撃の際の熱応力の評価、およびき裂の発生・進展などの破壊過程の評価、の2つを同時に行うことが不可欠である。

そこで本研究では、高強度金型における熱クラック発生防止技術の開発を目的とし、高強度金型に用いられる超硬合金、サーメットおよびセラミックスの熱クラック発生および進展挙動の評価手法の開発を行った。特に、本研究では、最も脆性的な破壊挙動を示すセラミックスを研究対象とした。後述のような著者らが開発したディスク・オン・ロッド試験を利用して、予き裂を含む試験片に種々の熱応力比の熱衝撃を与え、様々な破壊モード(開口/せん断の混合モード)下での熱クラック進展挙動を評価した。

2. 実験方法

2.1 試験片

試験片には代表的なエンジニアリングセラミックスであるアルミナセラミックスを用いた。

試験片原料はアルミナ粉末として大明化学工業(株)製タイミクロン TM-DAR を使用し、一軸圧縮、冷間等方加圧(Cold Isostatic Press, CIP)により成形体を製作した。そして成形体を楕円形状に加工後、高温大気炉にて昇温速度 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で焼結温度 $1,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで加熱し 2 時間保持して焼結体を得た。その後、試験片の中心部に予き裂の発生起点としてピッカーズ圧痕を導入し、ブリッジインデンテーション法により予き裂を導入した。予き裂導入後、試験片表面を 0.3 mm 研削し、残留応力を除去した。予き裂と長軸の角度を変化させることにより、き裂先端のモード比を変化させた。また試験片内の水分による応力腐食割れによる強度低下を考慮し真空中で $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、2 時間保持で乾燥した。

作製後に測定した試験片の見掛け密度、かさ密度および開気孔率はそれぞれ $3.96\text{ g}/\text{cm}^3$ 、 $3.95\text{ g}/\text{cm}^3$ および 0.26% であった。開気孔率は 1% 未満であり十分に密な試験片が得られた。また試験片の平均粒径は $4.55\text{ }\mu\text{m}$ であった。

2.2 ディスク・オン・ロッド試験

前述のように、熱クラック発生挙動を理解するには、推移する熱応力場と、その下でのマイクロ損傷の発生進展によって生じる熱クラックの発生過程の両方を同時に評価する必要がある。著者らは新たな熱衝撃破壊試験方法としてディスク・オン・ロッド(Disc-on-Rod)試験法を開発してきた⁽¹⁻³⁾。図1にディスク・オン・ロッド試験の概要を示す。本試験では、予加熱したディスク状薄板試験片に低温に保持した金属ロッドを接触させ中央部のみを冷却することにより 2 軸引張熱応力を発生させて熱衝撃を与える。その際、金属ロッド下部に AE センサを取付け、金属ロッドを冷却媒体及び導波棒として用いることにより、AE センサを熱から保護すると同時に微視割れなどの損傷に伴う AE 信号を検出し微視破壊過程を評価することが可能である。また、試験中の試験片表面の温度分布を赤外線カメラでモニタリングし、有限要素解析によって熱応力場の時間履歴を計測している。なお、試験片の板厚は直径に比べて十分小さいため、板厚方向の応力は無視でき、平面応力としての取り扱いが可能である。

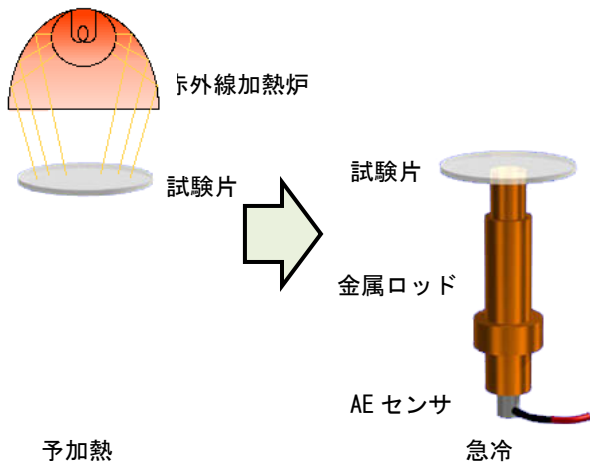


図1 ディスク・オン・ロッド試験の概要

2.3 ディスク・オン・ロッド試験システム

図2にディスク・オン・ロッド試験システムの模式図を示す。円板もしくは楕円板試験片をIRランプで加熱し、ホルダごと回転・降下させて、冷却ロッドと接触させた。その際、降下速度をエアダンパで制御し、接触によるAE信号を抑制している。

試験中、IRカメラを用いて試験片表面の温度分布を約60 fpsで計測した。また、微視損傷の蓄積過程を明らかにするために、銅ロッド下部に取り付けられたAEセンサを用いてAE計測を行った。FET内蔵の高感度AEセンサ(株)富士セラミックス製M204A、共振周波数180kHz)を用いた。AE測定条件は、プリアンプゲイン10dB、測定周波数25~2,000kHz、しきい値22.8dBとした。き裂進展経路はデジタルビデオカメラで撮影した映像から決定した。その後、有限要素解析ソフトウェア「Marc/Mentat 2018」を用いてき裂経路を反映した2次元モデルを作成し、試験中に測定した温度分布データを導入して構造解析をおこなった。

2.4 試験条件の決定(熱応力場のFEM解析)

実験に先立ち、所望の熱応力比およびモード比(開口/せん断モード比)の得られる試験片および冷却ロッドの形状、予き裂長さ、予き裂角度を決定するため、熱応力解

析を行った。き裂を導入した楕円形試験片のモデルを作成し、ディスク・オン・ロッド試験を伝熱解析と構造解析の連成問題として模擬した。

モデルは厚さを0.6mmとし、一般的なアルミナの物性値を与えた。所定の初期温度から、全体の表面を室温(25℃)に急冷した。その際、ロッドとの接触部以外には空気との熱伝達係数(5 W/m²・K)を与え、接触部の熱伝達係数を大きくすることで中央部のみの急冷を再現した。

試験片とロッドの寸法、予き裂の長さや角度のほか、初期加熱温度T₀を変えた解析を行い、き裂先端のモード比に着目し、最適な試験条件を検討した。

3. 結果および考察

3.1 熱応力解析による試験片・ロッドの形状の決定および試験片の作製

種々の条件で熱応力解析を行った結果、試験片中心部の熱応力比の挙動は試験片とロッドの形状、予き裂の長さや角度に強く依存し、試験片とロッドの接触部の熱伝達係数や初期温度は熱応力比、開口/せん断モード比にはほとんど影響しないことが示された。

本研究では、試験片の長径を25mmで固定し、試験片の短径、ロッドの長径および短径を変更し有限要素解析を行った。その結果、予き裂が長軸上である場合は、開口モード(Mode I)となり、長軸とき裂の角度が30°の場合にせん断モード(Mode II)の成分が最大になることが明らかになった。

3.2 ディスク・オン・ロッド試験

本研究では、予き裂を導入したアルミナセラミックスを用いてディスク・オン・ロッド試験を実施した。また試験を行う際、予き裂と試験片の長軸の間の角度を変化させることにより、き裂先端のモード比を変化させた。

図3に、典型的な試験結果として、予き裂を試験片の長軸上に導入した試験片のディスク・オン・ロッド試験の結果を示す。図には、試験片の画像およびその時点における試験開始(ロッド接触時)からの時間を示している。この画像より、試験開始から0.11秒後にき裂が小さく不安定進展し、その後停止する様子が確認された。また、0.46

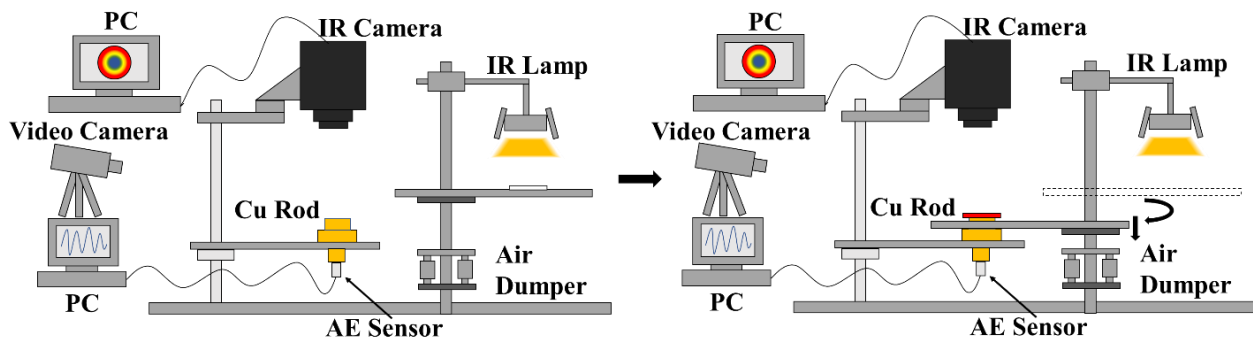


図2 ディスク・オン・ロッド試験システム

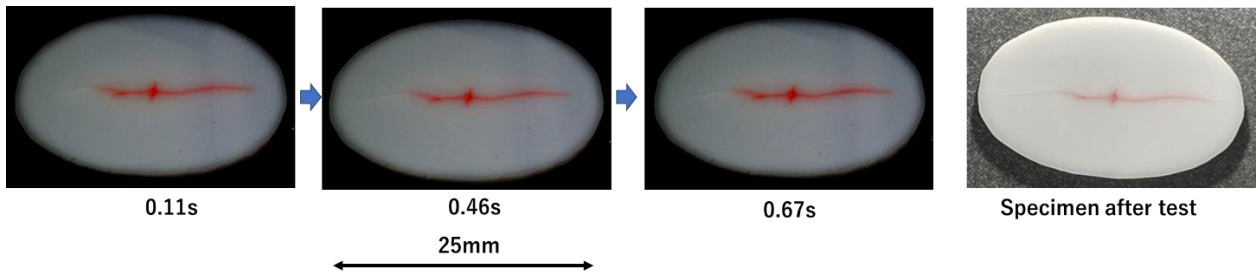


図3 ディスク・オン・ロッド試験中のき裂進展挙動（右端は試験後の試験片）

秒後、0.67 秒後にもき裂の小さな不安定進展と停止を繰り返している。したがって、熱応力下で、き裂は巨視的には安定成長しているものの、実際には、小規模の不安定成長と停止を間欠的に繰り返していることが理解される。

また、図3は、開口モード (Mode I) のみでせん断モード (Mode II) 成分がない場合であるが、き裂が若干の偏向があるものの、おおむね直線的に進展していることがわかる。

図3から測定したき裂進展量および AE 発生挙動を図4に示す。図中、実線が AE 累積エネルギーであり、AE 信号の強度の累積値を表している。また、プロットした点が個々の AE 信号の振幅値であり、破線がき裂進展量である。図より 0.11 秒後にき裂が大きく進展する不安定成長が確認され、それに伴い AE 信号が発生し、AE エネルギーが急増していることが確認される。またその後、き裂が時間の経過とともに間欠的に進展していくことが確認でき、結果として巨視的にき裂が安定成長したことが理解される。そして、き裂の小規模な不安定進展に伴って AE 信号が検出され、全体として、き裂の安定成長とともに、AE エネルギーが増加することが確認できる。

3.3 熱応力下でのき裂進展抵抗

試験中、き裂経路をビデオカメラによって特定し、IR カメラで記録した温度分布を、き裂経路を反映した有限要素

素解析モデルに導入した。その後、構造解析を行い、仮想き裂開口法を用いることで、き裂先端におけるエネルギー解放率を算出した。

図5に、予き裂が長軸上にある試験片のディスク・オン・ロッド試験から得られた熱応力下でのき裂進展抵抗を示す。図中、横軸は初期き裂長さからのき裂進展長さであり、縦軸はき裂進展抵抗、すなわち開口モード (Mode I) き裂進展抵抗 G_{IR} 、せん断モード (Mode II) き裂進展抵抗 G_{IIR} および総き裂進展抵抗 $G_R (=G_{IR}+G_{IIR})$ である。図より、き裂の進展にともなって、き裂進展抵抗 G_R が上昇することが確認される。また、せん断モードの G_{IIR} は極めて小さく開口モードの G_{IR} が支配的であり、実験前の有限要素解析結果とよく一致している。

以上のように、熱応力下でのき裂進展挙動と熱応力分布を精度良く記録し、両者を対応させて有限要素解析することで、熱応力下でのき裂進展抵抗を評価できる技術が開発されたといえる。

4. 結び

本研究では、高強度金型材料の熱クラック発生・進展を防止することを最終目標として、セラミックスの熱応力下でのき裂進展過程を評価した。楕円形の薄板試験片に予き裂を導入し、著者らの開発したディスク・オン・ロッド試験で熱衝撃を与えた。予き裂の角度を変化させることで、

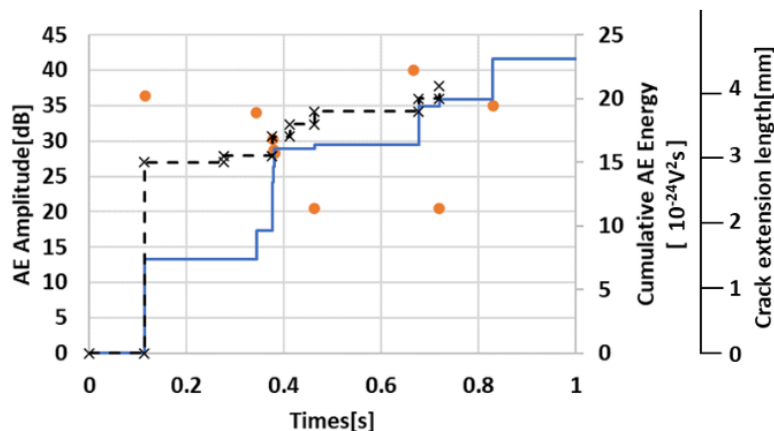


図4 ディスク・オン・ロッド試験中の AE 累積エネルギー (実線)、AE 振幅(赤点)およびき裂進展量(破線)の推移

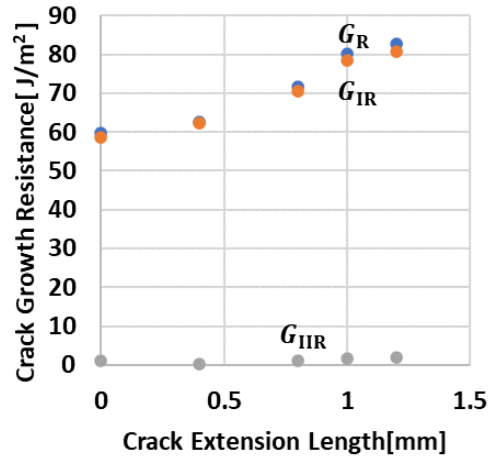


図5 熱応力下でのき裂進展抵抗

様々な開口 (Mode I) /せん断 (Mode II) 比が得られる。試験中のき裂進展挙動をビデオカメラで記録した。き裂経路を導入した有限要素モデルを作成し、試験中に IR カメラで測定した温度分布を境界条件として与え、構造解析によって熱応力分布を求め、き裂先端のエネルギー解放率を算出した。

その結果、き裂は巨視的には安定成長したもの、実際には、小規模の不安定成長と停止を間欠的に繰り返す不連続過程であることが明らかになった。また、き裂進展に伴い、き裂進展抵抗は向上した。セラミックスにおけるこのようなき裂進展抵抗の向上挙動は、機械的応力下では多数報告されているが、本研究では、国内外で初めて熱応力下でのき裂進展抵抗の評価に成功した。

高強度金型の熱破壊を防止するためには、熱クラックの発生のみならず進展過程を解明することが不可欠であり、本研究により、熱クラック防止のための基礎的知見が得られたといえる。

謝 辞

本研究の遂行に対し、公益社団法人 天田財団から研究助成金によってご支援いただいたことを記し、心より謝意を表します。

参考文献

- 1) S. Wakayama, S. Kobayashi and T. Wada, Journal of Acoustic Emission, Vol.23, pp. 150-155 (2005)
- 2) T. Sakai, S. Wakayama, G. Kametani, K.Yoshida and T. Akatsu, Bulletin of JSME Mechanical Engineering Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 1-10 (2014)
- 3) T. Akatsu, H. Takashima, Y. Shinoda, F. Wakai and S. Wakayama, Int. J. Appl. Ceram. Technol., 1-9 (2016)