

高強度金型材料の耐熱クラック性向上に関する研究

首都大学東京 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

(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016030)

キーワード：高強度金型材料，熱クラック，ディスクオンロード試験

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・耐磨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部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「ファイナ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束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・蓄積して巨視的クラック(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、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、後述のような著者らが開発したディスクオンロード試験を改良して、種々の熱応力比のもとでの熱クラック発生・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-D 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 °C/min. で焼結温度 1,500 °C まで加熱し 2 時間保持して焼結体を得た。表面付近の粗大粒子を取り除くために両面を研削し、表面の微視欠陥や傷を取り除くために両面に鏡面研磨を施した。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 °C、2 時間保持で乾燥した。

2.2 ディスクオンロード試験

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ード(Disc-on-Rod)試験法を開発してきた⁽¹⁻³⁾。図1にディスクオンロー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、FEM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

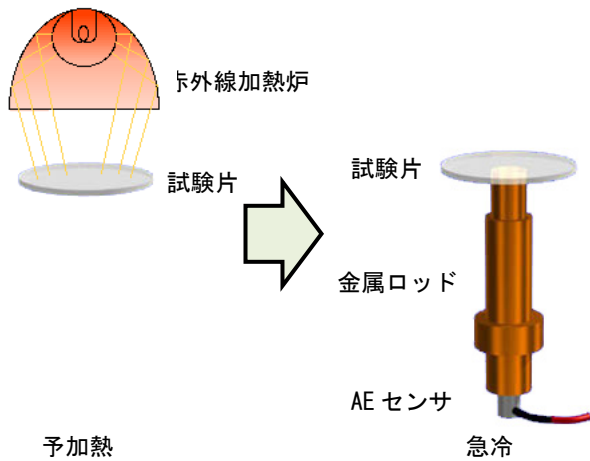


図1 ディスクオンロッド試験の概要

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。

従来は円形薄板試験片を用いていたため、試験片中央部で得られる最大熱応力は等2軸であったが、本研究では、楕円形試験片とすることで任意の応力比が得られるように工夫した。

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60fpsで計測した。またビデオカメラによりき裂の発生を録画した。微視損傷の発生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。AEセンサには、共振周波数180kHzのアンプ内蔵の高感度センサを使用した。ゲイン55dB、しきい値17.8dB、計測周波数範囲25~2000kHzとした。

2.4 試験条件の決定(熱応力場のFEM解析)

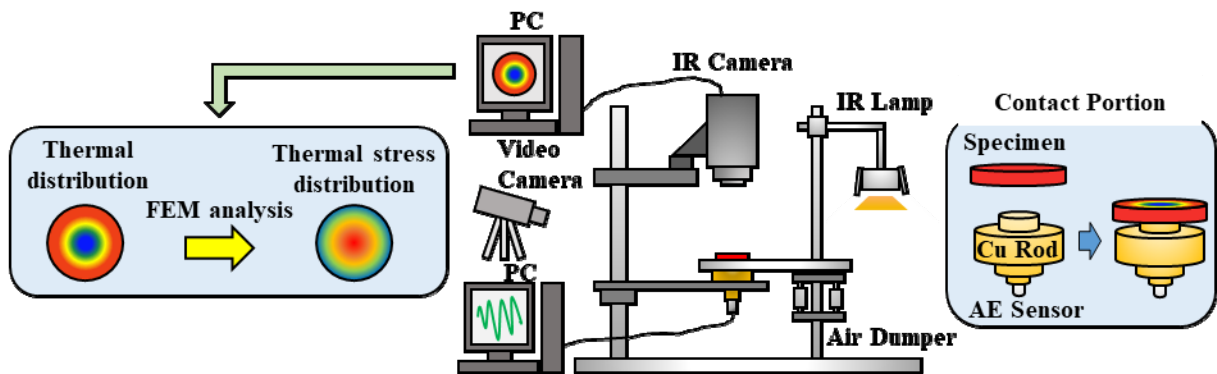


図2 ディスクオンロッド試験システム

実験に先立ち、所望の熱応力比の得られる試験片および冷却ロッドの形状を決定するため、熱応力解析を行った。試験片の1/4モデル(10接点アイソパラメトリック四面体要素)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hを大きくすることで中央部のみ急冷を再現した。

試験片とロッドの寸法のほか、初期加熱温度T₀、接触部の熱伝達係数hを変えた解析を行い、中心で生じる最大熱応力及び熱応力比に着目し、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に強く依存し、熱伝達係数や初期温度は熱応力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。試験片中心部での目標応力比が最適となるように決定した試験片およびロッド寸法を図3に示す。また、図4に作製した試験片の写真を示すが、測定した見掛け密度、かさ密度および開気孔率はそれぞれ3.98 g/cm³、3.96 g/cm³、0.46%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4.37 μmであった。

3.2 ディスクオンロッド試験

作製した試験片に対して、ディスクオンロッド試験を

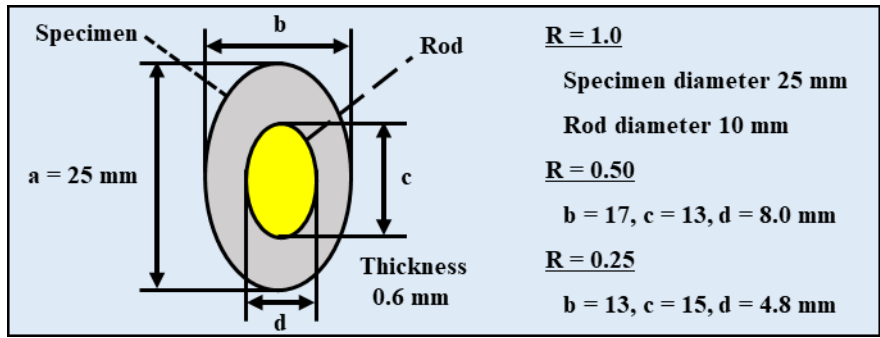


図3 試験片および冷却ロッドの寸法

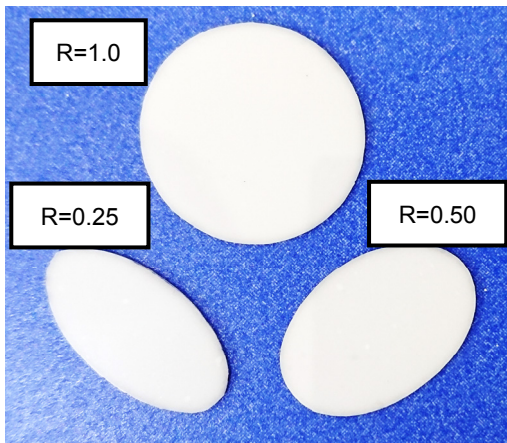


図4 作成した試験片の外観

行った。図5に、熱応力比 $R=0.50$ のディスクオンロッド試験結果を示す。図の左上に、破壊直前の試験片の温度分布および第1主応力分布、破壊後試験片の写真を示す。また、左下に試験片中心部および最大応力点の第1主応力、応力比、累計AEエネルギーの時間に対する挙動をプロットした。第1主応力分布から分かるように最大応力点は試験片中心部とわずかに異なった。しかし、試

験片中心部および最大応力点の熱応力はほぼ等価であり、応力比は両方とも目標値の0.5でほとんど変動せずに制御できていることが理解される。

この試験の場合、試験片とロッドの接触後1.48秒後に210MPaで破断し、累積AEエネルギーの急増点を確認された。AE発生挙動を見ると、試験初期から小振幅AEが検出され、最終破断時に大振幅AEが検出されAE累積エネルギーの急増が認められた。以上の結果から、急冷直後から最大熱応力の発生する試験片中心部にマイクロ損傷が発生・蓄積し、それらの進展・合体で熱クラックが発生すると同時に不安定進展して破断に至ったことが推察される。

一方、熱応力比 $R=0.25$ のディスクオンロッド試験結果を図6に示す。この場合、 $R=0.50$ の試験に比べて、最大応力点の位置や熱応力の試験片中心部との際はやや大きい、熱応力比は目標の $R=0.25$ 付近によく制御されている。また、試験片は、ロッド接触後1.11秒後に260MPaで破断した。 $R=0.50$ の場合と同様に、最終破断時にAE累積エネルギーの急増点認められ、主き裂の形成後ただちに最終破断に至ったものと考えられる。

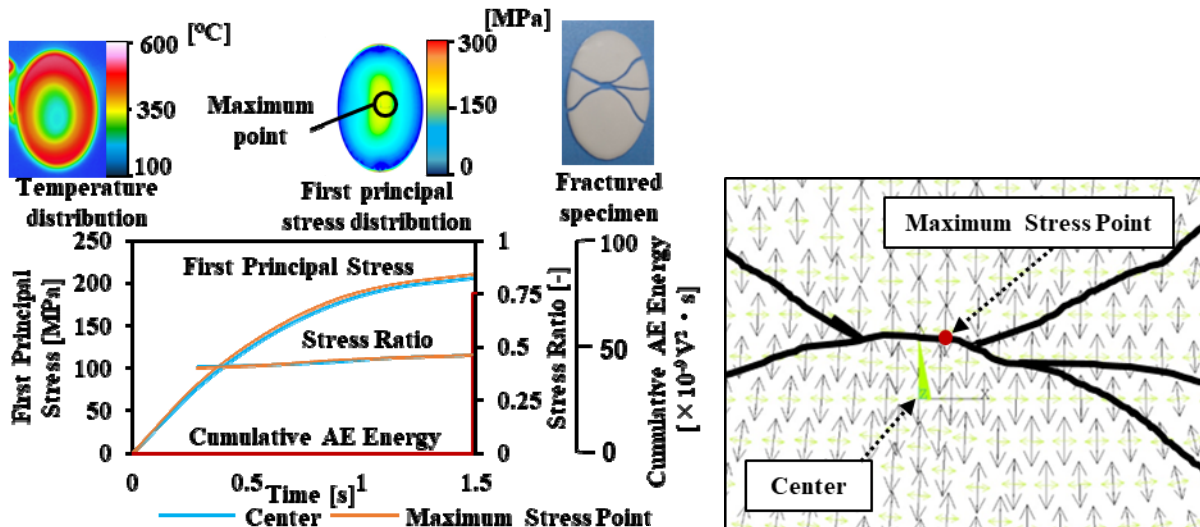


図5 ディスクオンロッド試験結果 ($R=0.50$)

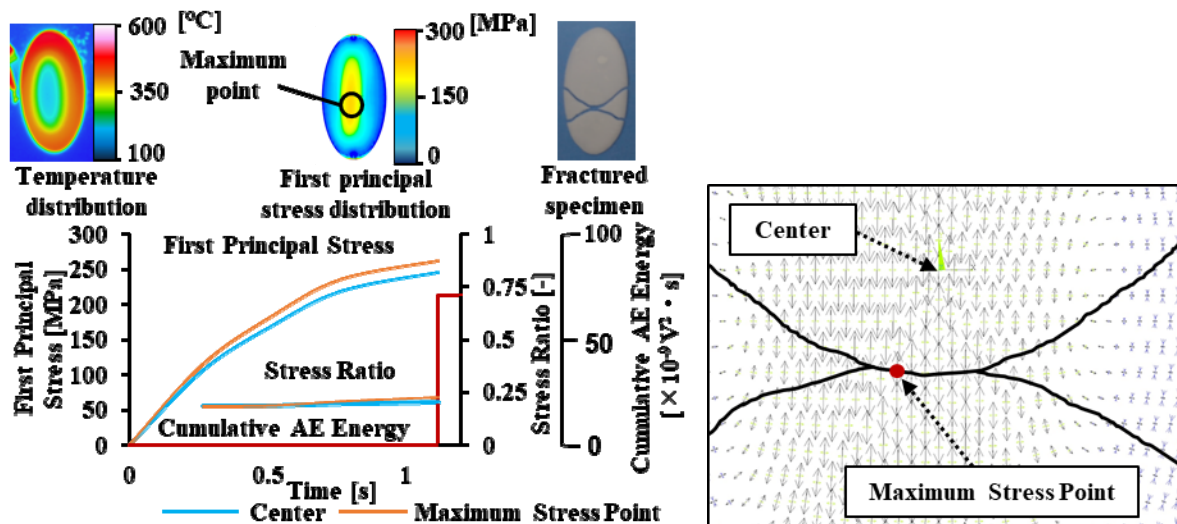


図6 ディスクオンロッド試験結果 (R=0.25)

図5および図6の右側に有限要素解析から得られた破断時の第一主応力のベクトル図とき裂経路を重ねた図を示す。図より、最大応力点で最大主応力に垂直な方向に主き裂が形成されたことが理解される。破断後の試験片からき裂進展経路は破壊の起点から枝分かれしていることが確認された。これは、よく知られているように、高速き裂進展の影響によるものであり、高速き裂進展によって発生した応力波とき裂先端での応力場の重畳で周方向応力がき裂面に対して斜めの対称的な位置で最大となるためである。

以上のように、試験片とロッドの形状を最適化することで任意の熱応力の下での熱クラック発生・進展過程の評価が可能になったことが示される。

4. 結び

本研究では、高強度金型材料の熱クラック発生を防止することを最終目標として、種々の熱応力比のもとでの熱クラック発生挙動の評価技術の開発を行った。著者らが開発したディスクオンロッド試験を改良し、試験片とロッドの形状を円形から楕円形にし、それらの寸法を最適化することで、任意の熱応力比のもとでの熱クラック発生過程の評価が可能となった。

従前は、試験片とロッドの接触が不均一になり、試験片中心部から離れた位置で破断が生じていたが、本研究では試験片ホルダやロッドのアライメントの調整機構を付与できたため、再現性の高い試験が可能になった。今後は、熱クラック発生に加え進展のクライテリオンを検討し、同時に、種々の機械的応力のもとでの破壊過程の評価を進めることで、例えば高強度金型材料の新規設計などによる熱クラック防止のための基礎的知見を明らかにしていく所存である。

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)