

<熱測定応用研究の頁>

耐火物における熱機械測定と熱応力シミュレーション

Thermomechanical Test and Thermal Stress Simulation for Refractory

後藤泰男, 石田秀輝

Yasuo Goto and Hideki Ishida

1. はじめに

近年, 自動車用ターボローターやガスタービンにセラミックス材料が使用されており, これらの材料の熱機械測定による耐久性評価を行った結果が報告されてきている。山内ら¹⁾は, 窒化ケイ素材料の1200°Cにおける繰返し応力下の亀裂進展挙動について実験を行い, 寿命評価について考察している。一方, 古くから種々の工業に利用されてきている耐火物材料については, その不均質性の理由から, 使用環境(1000°C以上)での機械的特性を把握し, 寿命評価を試みた例は少ない。

また, 高温で使用される構造材に発生する応力は, 力学的応力だけでなく温度変化によって発生する熱応力も重要である。Lamonら²⁾は窒化ケイ素に発生する急速加熱繰返しによる熱応力破壊試験結果を有限要素法(FEM)を用いた解析と比較し, 新しい熱応力測定法を提案している。

我々は, 1次粒子直径が1mm程度のコーディエライト質耐火物の熱機械測定を行い, その結果と, FEMを用いてシミュレーションした実際の使用温度条件において発

生する熱応力とを比較検討して, 耐火物の性能および寿命評価を試みている。本稿では, その途中経過について報告する。

2. 試料

試験片は, 陶磁器製造の際に焼成補助材料として用いるコーディエライト質耐火物材料A, Bの2種類を用いた。用いた試験片の物理的特性をTable 1に示す。ここで, 経験的に試料Aの方が試料Bに比べて寿命が長いことが知られている。

3. 熱機械測定

不均質材料の熱機械測定の場合, 試験片の大きさは1次粒子の大きさに比べて十分に大きい必要があり, 材料試験機に電気炉を装備した熱機械測定装置が有用となる。本研究では, Fig.1に示す試験機を用い耐火物の熱機械測定を実施した。

3.1 曲げモード熱機械測定

10×10×40mmの角柱試験片を, スパン30mmのアルミナ製治具に試験片を乗せ, 電気炉中で1000°C到達後1時間保持し, 試験片中央にアルミナ製治具を用いて負荷を加えた。試験は, 定速変位負荷(0.05mm・min⁻¹)による破

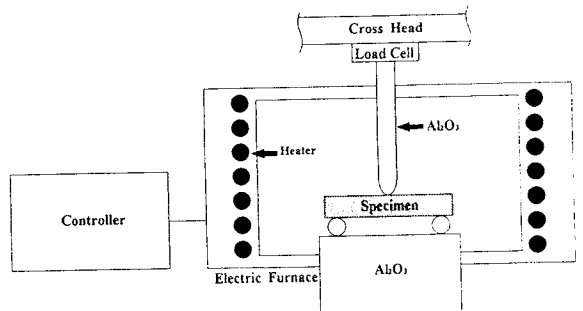


Fig.1 Schematic diagram of TMA equipment for bending mode.

Table 1 Properties of refractories used in this study.

Sample name	Bulk Density g·cm ⁻³	Flexural Strength MPa	Young's Modulus E GPa	Thermal Expansion α		Thermal Conductivity W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	Fracture Toughness (SENB) K _{IC} MPa·m ^{1/2}	Work of Fracture γ _{wof} J·m ⁻²
				RT-400°C	700-800°C			
Sample A	2.31	9.6	44.7	2.6×10 ⁻⁶	4.5×10 ⁻⁶	1.88	0.38	38.4
Sample B	2.14	9.9	34.4	2.7×10 ⁻⁶	4.0×10 ⁻⁶	1.36	0.40	29.4

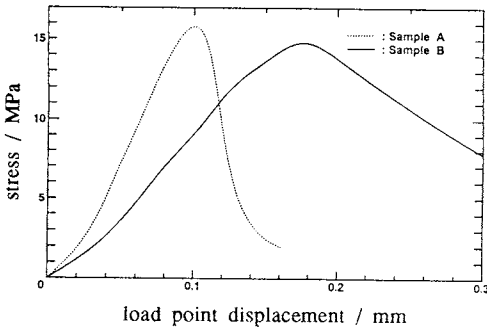


Fig.2 Stress-displacement curve at 1000°C.

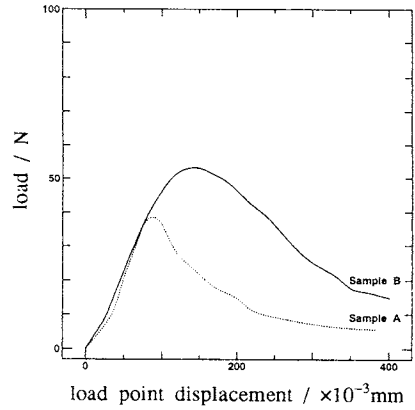


Fig.4 Load-displacement curve of notched specimen at 1000°C.

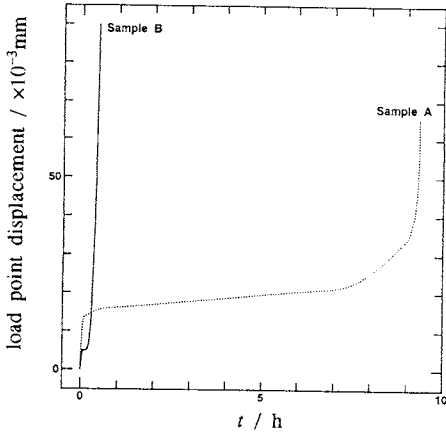


Fig.3 Creep deformation of specimen.

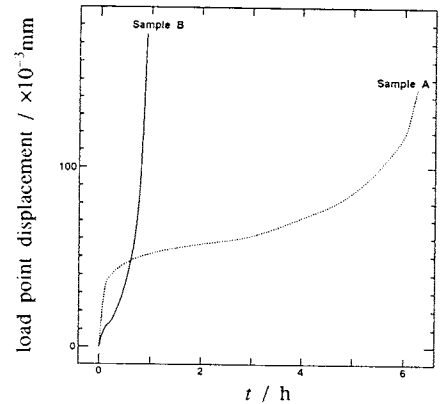


Fig.5 Creep deformation of notched specimen.

壊試験と、破壊荷重の約50%一定荷重(100N)によるクリープ試験を行った。破壊試験により得られた荷重-変位曲線をFig.2に示し、クリープ試験によって得られた変位-時間曲線をFig.3に示す。Fig.2において、最大強度から求めた1000°Cにおける試料AとBの曲げ強さは15.8MPaと14.8MPaであり、大きな違いは認められない。しかしながら、試料Bでは、試料Aの破断変位の約2倍の変位に達しても破断していない。この差は、Fig.3の試料Bでは最大破壊荷重の半分の負荷条件でクリープ変形し約20分で破壊に至るのに対し、試料Aでは6時間も耐えることから、クリープ変形の影響であることがわかる。

曲げモード熱機械測定において、その定速変位負荷試験は高温での強度を評価することができるが、クリープ変形の影響を無視することはできない。特に、繰り返し使用される耐火物材料にとって、最大破壊応力に達しない荷重の繰り返しによるクリープ変形は、強度劣化の大きな原因となると推測される。

3.2 亀裂の影響

Donaldsonら³⁾は、ガラス質粒相を伴うアルミナについて、亀裂を入れた試験片と入れない試験片についてクリープ挙動を検討した。この結果、亀裂を有する材料のクリープ挙動を支配するのは亀裂増進クリープであり、亀裂を入れない場合、発生する弾性率の変化によるクリープ変形よりも、材料の寿命に対し支配的であるとしている。そこで、亀裂導入試験片の熱機械測定を行い、亀裂の影響について検討を行った。

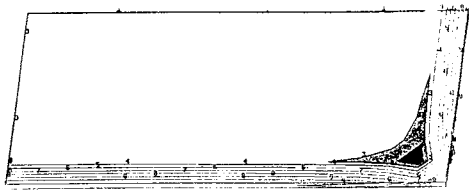
10×10×40mmの角柱試験片中央に深さ約20mmの亀裂を入れた試験片を用い、1000°Cにおける定速変位負荷(0.05m・min⁻¹)による破壊試験と、一定荷重(30N)によるクリープ試験を実施した。亀裂が有る場合の破壊曲線とクリープ変形曲線をFig.4、Fig.5に示す。破壊曲線およびクリープ変形曲線共に亀裂の無い場合と同様の傾向を示すが、試料A、Bともに2次クリープ変形時の歪み速度が

速く、亀裂存在下では、弾性クリープの変形速度に比べ亀裂増進クリープによる変形速度が速いことを示している。従って、耐火物の高温評価を行う上で亀裂存在下での耐久性を検討することは、実際の寿命に関連した指標を得るために最も重要な項目であるといえる。

4. 実際にかかる熱応力の計算

耐火物の場合、発生する応力が力学的応力よりも熱応力の方が支配的である場合が多い。そこで、本研究で用いる耐火物に発生する熱応力をFEMを用いてシミュレーションした。製品形状は600×300×10mmであるが、簡単のために1/4モデル(300×150×10mm)で計算を行った。実際の使用条件中、1300℃から750℃までの冷却帯(冷却速度100℃min⁻¹)で発生する熱応力をTable 1の物性値を用い計算した。なお、熱伝達係数は、固体-気体に一般的に用いられる値20kcal・m⁻²h⁻¹℃⁻¹を用いた。

Fig.6にシミュレーションによって得られた試験片Aの熱応力の等応力線図を、Table 2に温度と発生する最大熱応力を示す。本シミュレーションに用いた物性値は、熱膨張係数を除き、いずれも室温物性値である。本来は、熱機械測定により得られる使用温度での物性値を代入すべきであるが、この試料はクリープ特性の影響を受けることが確認されていることから、クリープの影響を無視できる室温物性値を用いてシミュレーションを実



No. 1	-2 MPa	No. 4	1 MPa	No. 7	4 MPa
No. 2	-1 MPa	No. 5	2 MPa	No. 8	5 MPa
No. 3	0 MPa	No. 6	3 MPa	No. 9	6 MPa

Fig.6 Thermal Stress Contour Line from Result of FEM Analysis.

Table 2 Maximum thermal stress calculated by FEM.

Temperature ℃	Thermal Stress MPa	
	Sample A	Sample B
1300	0	0
1100	3.5	3.9
900	5.7	6.3
750	8.1	9.0

施した。

解析の結果、熱応力は端部に引っ張り応力が発生し、その最大値は試料Aで約8.1MPa、試料Bで約9.0MPaであった。この値は、各々の耐火物の1000℃での曲げ強さから比べて十分に小さい値ではあるが、破壊強度の50%応力でもクリープ変形を生じることが確認されており、発生する熱応力はクリープ変形を生じさせるに十分な値である。耐火物の場合、1度の使用により破壊が生じることは無く、繰り返しの利用による変形や亀裂進展が劣化の原因であることから、計算された熱応力は妥当な値と考えている。精度をより向上させるためには、詳細な熱機械測定を行い、高温での物性値を明確にすることが必要である。

5. おわりに

耐火物にかぎらず、熱機械測定をする場合には多くの要因が複合していることが多いので、実際の現象をとらえた測定をすることが重要である。本研究において、高温での強度特性にはクリープ特性を無視することができず、亀裂の存在による亀裂増進クリープ特性の影響が重要であることも確認された。さらに、発生する熱応力はクリープ変形させるに十分な値であることが計算され、耐久性評価に重要な物性はクリープ特性であることを確認した。

熱応力による破壊耐久性を議論することは、測定と解析の複雑さから、従来敬遠されがちであったが、コンピュータ解析能力の向上から、シミュレーションがパソコンレベルで可能になり、容易に熱応力評価ができるようになってきている。しかしながら、入力する物性値は熱機械測定により求める必要があり、高温での機械的特性評価は、各種物性値が複雑に影響する為、その測定は十分に考慮する必要がある。今後、コンピュータ解析技術が発達し、とすればキーボード操作だけで解析が可能になったと錯覚しがちであるが、実際の現象を十分に考慮して解析を進めることが重要である。

今後の夢は、耐火物材料を使用する前の熱機械測定と諸物性から寿命を推測することで、その上寿命の長い耐火物が開発されればうれしいものである。

文 献

- 1) 山内幸彦, 宮島達也, 伊藤正治, 久保勝司, セラミックス論文誌 **102** [4], 364-67 (1994).
- 2) J. Lamon and D. Pherson, *J. Am. Ceram. Soc.* **74** [6], 1188-96 (1991).
- 3) K. Y. Donaldson, A. Venkateswaran and D. P. H. Hasselman, *J. Mater. Sci.* **27** [16], 4501-10 (1992).