

高温構造材料におけるクリープボイド発生モデルの開発

背景

火力高温機器の代表的な損傷形態としてクリープボイドという微小な孔の発生・成長・合体が挙げられる。低応力条件の実機環境では、ボイドが発生し成長するまでの時間が長い。従って火力高温機器の損傷状態を精度良く評価する為には、ボイドの発生・成長挙動を定量的に予測できる手法の開発が望まれる。これまで当所ではボイド成長モデルを提案し*1、同モデルによりボイドの成長挙動を定量的に予測できることを検証した。しかし、ボイド発生についてはメカニズムに関して不明な点が多く、合理的なモデル化が困難な課題として残っていた。従って、実機に適用できる損傷予測手法の構築の為には、ボイド発生までの期間を的確に予測できる手法の開発が必要不可欠である。

目的

実用耐熱鋼を用いてクリープボイドの発生機構を実験観察から考察すると共に、ボイド発生時期および個数密度を定量的に予測できるモデルを開発する。

主な成果

1. クリープボイドの発生観察

タービンローター材Cr-Mo-V鍛鋼を対象に、応力154.5MPa、温度580℃でのクリープ試験を実施し（想定寿命1万時間）、FE-SEM（電界放射型走査電子顕微鏡）によりクリープ中断材の微視組織観察を行なった。ボイドは想定寿命に対する5%中断材では観察されず、10%中断材において約0.5 μm のサイズで観察され、15%中断材では約1.2 μm 、20%中断材では最大で2.6 μm のものが観察された。また、EDS（エネルギー分散型X線分光）元素マッピングにより、従来から示唆されていた粒界上の析出炭化物と母相との界面がボイド発生サイトとして機能する事が確認された（図1）。

2. クリープボイド発生モデルの提案

実験観察結果を踏まえ、粒界上の析出炭化物/母相界面へと原子空孔が集積し、空孔クラスターのサイズがある閾値を超えるとボイド発生とみなすモデルを提案した（図2）。また、ひずみの蓄積により粒内では空孔濃度が減少する一方で、粒界では空孔濃度が上昇する事を分子力学計算*2により初めて明らかにし、ボイド発生に対する応力依存性を考慮できる理論式をモデルに組み入れた（図3）。

また、実用耐熱鋼は多結晶体である為、多数の粒界が含まれる。そこで様々な粒界の性状のばらつきを統計的に考慮し、実用材中のボイド発生挙動を定量的にシミュレートできるボイド発生モデルを開発した。モデルを用い、0.1 μm のサイズ*3でボイドが発生するという仮定を置いて、本研究および応力条件の異なる既報*1でのボイド個数密度についての実験観察結果との比較を行なった。良好にボイド個数密度の推移を再現できる事が明らかとなり、モデルの妥当性を検証した（図4）。

今後の展開

本ボイド発生モデルをボイド成長モデルに統合する事によりボイド発生・成長を統一的に予測できる微視的損傷予測手法を構築し、実機への適用性を図るとともに、損傷が生じにくい材料開発の為の微視的な指針を得る。

主担当者 材料科学研究所 火力材料領域 研究員 中村 馨、上席研究員 緒方 隆志

関連報告書 「クリープボイド発生観察によるボイド発生モデルの開発」電力中央研究所報告：Q08008（2009年3月）

*1：緒方、電力中央研究所報告：T03007（2003）

*2：原子間の相互作用を経験式で表現して任意結晶中の静的な全エネルギーを算出し、構造の安定性を評価する原子シミュレーション手法。

*3：既報のボイド成長モデルは0.1 μm 以上のボイドに適用出来る為、モデル中では0.1 μm を発生サイズとして扱った。

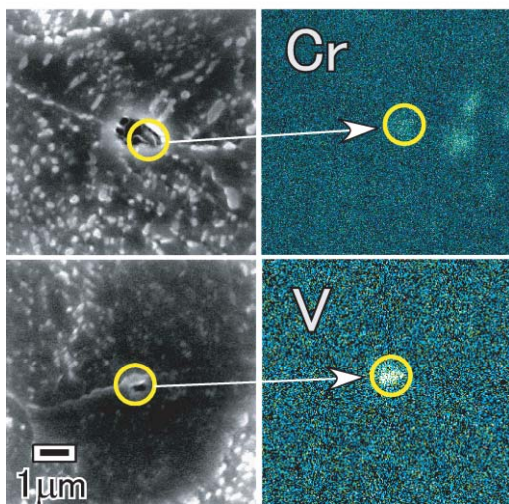
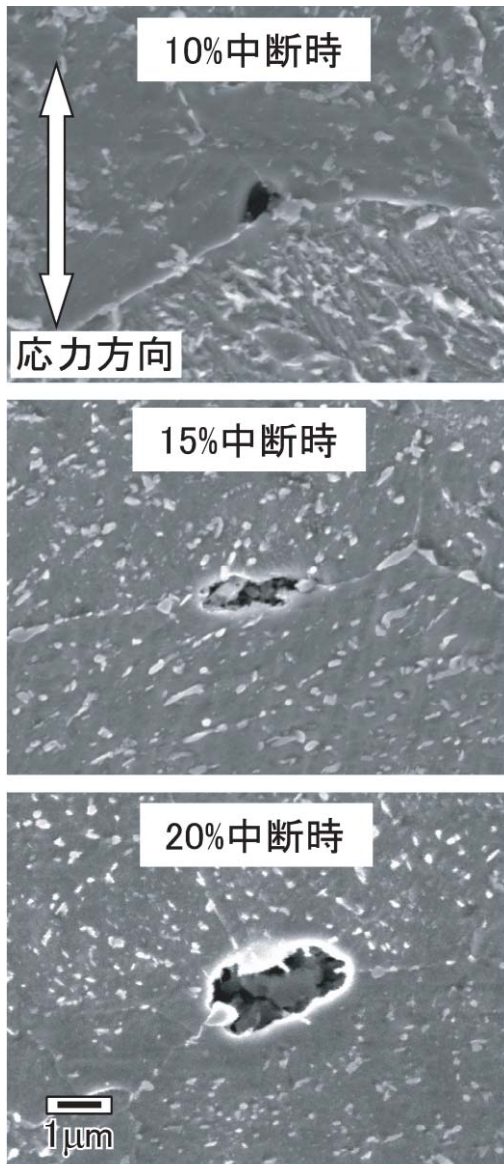


図1 ボイドのSEM画像および元素マッピング像

結晶粒界上にボイドが発生し、その横にはCr またはVの析出炭化物が確認される。

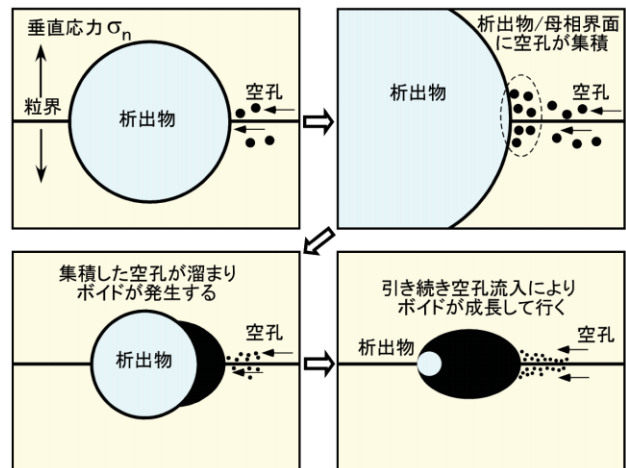


図2 ボイド発生モデルの模式図

空孔が粒界拡散し、粒界上の析出炭化物/母相界面に集積する事でボイドが発生する。

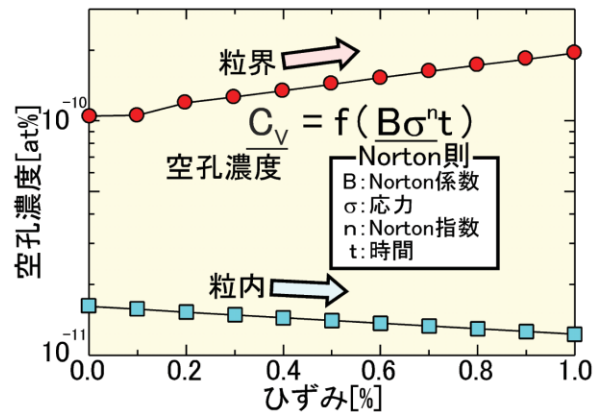


図3 ひずみの蓄積による空孔濃度の変化

分子力学計算よりひずみと空孔濃度の相関を明らかにし、クリープひずみ速度にNorton則を用いる事で、ボイド発生に対する応力依存性を考慮できるようになった。

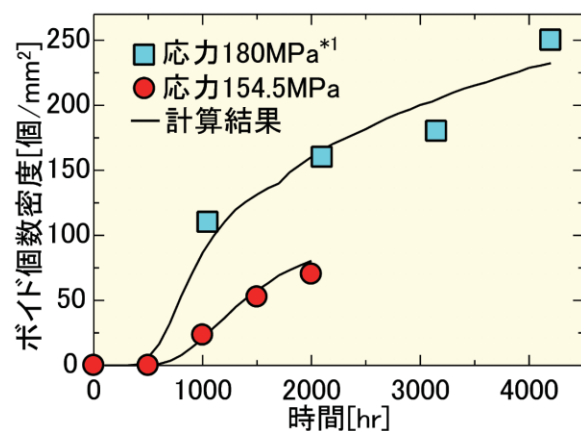


図4 ボイド個数密度の実験結果とモデル計算結果の比較

本ボイド発生モデルは、本研究で実施したクリープ条件のみならず、既報*1でのクリープ条件においても良好にボイド個数密度の推移を再現できる事が分かった。