

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 17 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420008

研究課題名(和文) Ni基超合金の初期疲労き裂進展に対する結晶破壊力学アプローチ

研究課題名(英文) Crystal plasticity fracture mechanics for early stage fatigue crack propagation in Ni-base superalloys

研究代表者

阪口 基己 (Sakaguchi, Motoki)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：60452083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：Ni基耐熱超合金における疲労き裂の発生と進展をターゲットにし、超合金の初期破壊プロセスについて実験と解析の両面から検討した。具体的には、Ni基超合金の単結晶材と一方向凝固材を対象にし、室温、450、700 での疲労き裂進展試験を行い、それぞれの破壊プロセスに与える結晶粒の結晶方位の影響、結晶粒界での幾何学的不連続性の影響、試験温度の影響について明らかにした。また、き裂の形状や傾きを忠実に再現した有限要素モデルにより、弾性異方性を考慮した弾塑性解析と塑性異方性を考慮した結晶塑性解析を行い、き裂先端のすべり面での変形を個別に評価することにより、疲労き裂進展挙動を定量的に説明付けた。

研究成果の概要(英文)：Early stage fatigue crack propagation in Ni-base superalloys was experimentally and analytically investigated. Fatigue crack propagation tests were conducted for a single crystal and a directional solidified superalloy, and clarify effects of crystal orientation, grain boundary and testing temperature on crack propagation behavior. An elastic-plastic and crystal plasticity analysis were carried out based on a finite element model considering realistic crack geometry. It was concluded that trans-granular fatigue crack propagation was rationalized by fracture mechanics parameter that considered slip activities in slip systems in Ni-base superalloys.

研究分野：材料力学

キーワード：高温強度 Ni基超合金 疲労き裂進展 破壊力学 結晶塑性解析 結晶方位 結晶粒界

1. 研究開始当初の背景

先進ガスタービンの高温構造材に用いられる Ni 基耐熱超合金は優れた高温強度を誇るが、タービン稼働中にはさまざまな損傷を受け、材料中にはき裂が発生する。超合金部材の場合、き裂が結晶粒径と同程度の寸法に成長するまでの初期き裂進展過程に寿命の大部分が費やされるため、材料の寿命管理や長寿命化には、発生したき裂の初期進展特性を正確に把握することが不可欠になる。研究開発当初において、Ni 基超合金の微小疲労き裂進展については多くの研究が行われてきていたが、実構造材で生じる現象には評価・予測が困難なものが多く、経験的な情報に頼らざるを得なかった。これは、以下の背景に大きな要因がある。

1) 超合金のき裂進展は、粒の結晶方位やすべり、結晶粒界からの拘束といった結晶学的因子の影響を強く受けるが、これらの結晶学的因子の影響について包括的な理解が得られていない。

2) 超合金部材は室温から 1000 度超までの広い範囲の温度サイクルを受けるが、項目 1) で挙げた結晶学的因子の影響は強い温度依存性を示し、また、高温環境では時間依存型の組織変化や粒界脆化などの材料学的因子が絡み問題がさらに複雑になる。

本研究では、これらの問題解決を目指し、超合金の初期き裂進展挙動を支配する結晶学的・破壊力学的学理を明確にすることを目的とした。

2. 研究の目的

高温構造材料として用いられる Ni 基耐熱超合金における発生初期の疲労き裂進展をターゲットにし、超合金の初期き裂進展挙動を支配する結晶学的・破壊力学的学理を明確にすることを目的とした。具体的には、単結晶材ならびに一方向凝固材を対象にし、(1) 試験片板厚、(2) 結晶粒の方位と結晶粒界での方位差、(3) 試験温度、(4) 時間依存型の組織変化や粒界脆化の影響を個別に抽出しながら、耐熱超合金の余寿命診断技術の向上に資する初期疲労き裂進展モデルの構築と粒や粒界の最適設計を介した新しい耐熱材料設計指針の提案を目指した。

3. 研究の方法

(1) 試験系の組上げ

これまでに開発してきた高温疲労き裂進展試験装置を改良し、試験片中央に貫通き裂を導入した小型 CCT 試験片に繰返し負荷を加えられる新しい試験系を組み上げた。き裂発生と初期進展のその場観察には長距離ズームレンズを用い、電位差法によるき裂長さの測定を介して長さ 1 μ m 程度のき裂進展を精度よく検出できる試験系とした。組上げた試験系の概観を図 1 に示す。また、負荷中の試験片の変形を非接触で面測定することを目的として、デジタル画像相関法 (DIC) に

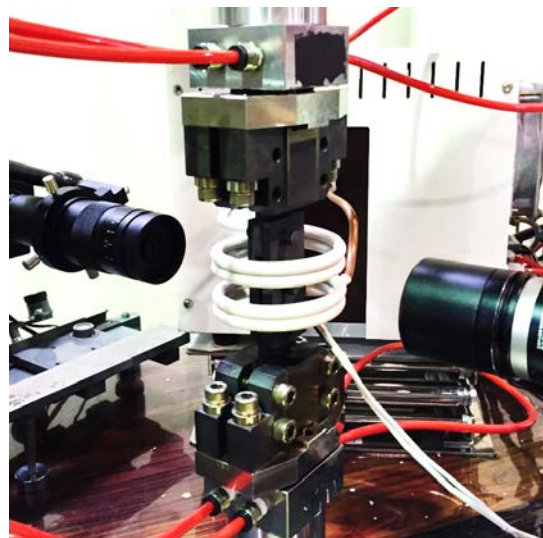


図 1 本研究で用いた疲労き裂進展試験系の概観。

着目し、き裂先端のひずみ場を 0.05% の精度で計測できる測定系を構築した。

(2) 疲労き裂進展試験

まず、Ni 基超合金の単結晶材を対象にし、負荷方向とき裂進展方向の結晶方位の組合せを変えた 4 種類の試験片に対する室温での疲労き裂進展試験を行い、1 次結晶方位と 2 次結晶方位がき裂進展挙動に与える影響を検討した。また、同様の実験を 450 $^{\circ}$ C と 700 $^{\circ}$ C で行い、試験温度が与える影響についても検討した。

つぎに、一方向凝固材の casting 方向から垂直な面から切り出した試験片に対する疲労き裂進展試験を行い、初期ノッチ先端の結晶粒の方位が異なるように意図的に異なる方向からサンプルを切り出しながら、き裂進展におよぼす結晶粒の方位と結晶粒界の幾何学的性状の影響について検討し、単結晶材から得られた結果と統合して、き裂進展とすべり、および、結晶粒界との相互作用について考察を加えた。

(3) FEM による疲労き裂進展駆動力の評価

実験で観察された疲労き裂進展挙動に定量的な説明付けを行うことを目的として、有限要素モデルを用いた破壊力学的解析を行った。まず、き裂の形状や 3 次元的な傾きを再現した有限要素モデルを作成し、弾性異方性を考慮した弾塑性解析によりき裂先端応力場を計算した。また、き裂先端での塑性異方性についても考慮に入れるため、き裂先端でのすべり系活動量を算出できる結晶塑性モデルを構築し、実験で観察されたき裂進展経路や進展速度に合理的な説明を与えられるかについて検討した。

4. 研究成果

(1) 単結晶材の疲労き裂進展におよぼす結晶方位と温度の影響

負荷方向とき裂進展方向の組合せの異なる4種の単結晶材に対する疲労き裂進展試験を行った結果、いずれの試験片においても疲労き裂進展は{111}すべり面に沿った第I段階型の進展形態を示し、三次元的に傾いたき裂は Mode I, Mode II, Mode III 成分を含んだ混合モードとなること、そのモード混合比は一次結晶方位と二次結晶方位の組み合わせに依存したすべり面の配置によって決まることが明らかになった。測定された疲労き裂進展速度 (da/dN) とせん断応力拡大係数範囲 (ΔK_I) の関係を図2に示す。進展速度は一次結晶方位と二次結晶方位に強く依存し、負荷方向が<100>方位、進展方向が<110>方位の場合には進展速度が大きくなる傾向があることが明らかとなった。ただし、 ΔK_I を用いて評価しても結晶方位によって進展速度に大きな差異が生じていることから、き裂が進展する{111}面上の最大せん断応力や実き裂長さを考慮しただけでは、第I段階疲労き裂の進展速度に対する結晶方位の影響は評価できないと言える。

つぎに、試験温度が単結晶材の疲労き裂進展特性に与える影響を検討するため、室温の実験と同様の4種の方位を持つ試験片に対して450°Cと700°Cでの実験を行った。その結果、450°Cおよび700°Cでは、低 ΔK_I 領域においては全ての試験片で第II段階型のき裂進展挙動が観察されたが、3種の試験片では、き裂先端の ΔK_I が一定の値に達すると第I段階型のき裂進展へと遷移した。第II段階疲労き裂の進展速度を試験片ごとに比較すると、負荷方向の結晶方位が<100>の場合は700°Cの方がわずかに高く、負荷方向の結晶方位が<110>の場合は700°Cでの進展速度が450°Cよりも5倍程度高かった。この現象は、き裂の進展方向に対する γ' 析出相の配向を考慮することで、合理的に説明できた。

(2) 多結晶材の疲労き裂進展に与える粒内結晶方位と結晶粒界の影響

多結晶材の室温での疲労き裂進展特性に与える結晶粒のサイズや結晶方位、結晶粒界の影響について実験的に検討した。具体的には、一方向凝固材の鋳造方向と垂直な面からCT試験片とCCT試験片を切り出し、試験片に含まれる結晶粒の方位や結晶粒径を系統的に変化させながらき裂先端での応力拡大係数範囲 (ΔK) を一定に保持した疲労き裂進展試験を行った。実験で得られた進展速度を、き裂が結晶粒内で進展した場合と結晶粒界近傍を進展した場合で分類し、それぞれの進展挙動について考察した。その結果、き裂が粒内を進展する場合は、すべり面に沿って直線状に進展するときの進展速度が大きく、分岐・屈曲をとまなうときは小さくなること、

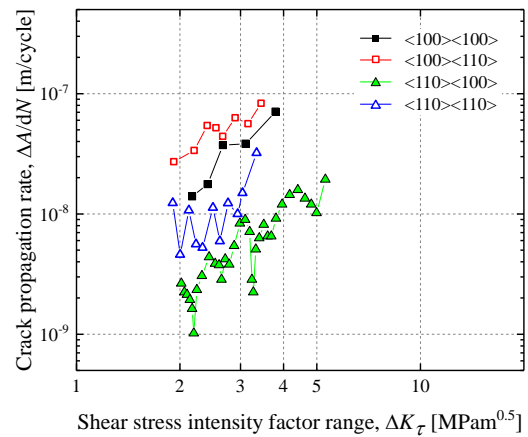


図2 単結晶材に対する室温での疲労き裂進展試験の結果。き裂進展速度 (da/dN) は負荷方向とき裂進展方向の結晶方位に強く依存する。

いずれの進展形態の場合も負荷軸方向が<100>方位に配向する結晶粒では進展速度が大きく、<100>方位に配向する粒では小さくなることが明らかとなった。また、結晶粒界近傍ではき裂進展速度が低下し、この低下の度合いは隣接する結晶粒の方位差や表面から観察されるき裂面の傾斜角では評価できず、粒界での3次元的なすべり面角度差やねじれ角を用いることで定性的に評価できることも明らかとなった。

(3) 有限要素結晶塑性解析による第I段階疲労き裂進展に対する定量評価

第I段階疲労き裂に与える結晶方位および粒界の影響を評価することを目的とし、実験結果を基にき裂の3次元的な傾きを再現した有限要素モデルを作成し、弾塑性解析ならびに結晶塑性解析を行い、結晶方位の影響を検討した。まず、き裂面を再現した3次元有限要素モデルを用いた弾塑性解析を行い、き裂先端応力場から算出した開口型応力拡大係数とせん断型応力拡大係数を用いてき裂進展速度を評価した。その結果、き裂先端に広がる co-planar なすべり面上のせん断型応力拡大係数を用いるとき裂進展速度をある程

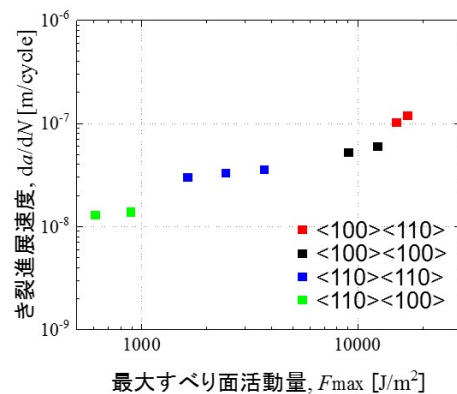


図3 結晶塑性解析で算出したすべり面活動量による単結晶材でのき裂進展速度の評価結果。

度整理できるが、開口型応力拡大係数では整理できないことが明らかとなった。つぎに、塑性異方性を考慮した結晶塑性モデルを有限要素解析に適用し、き裂先端に位置する八面体すべり系でのそれぞれのすべり量を個別に評価した。12種のすべり系すべてのすべり量を個別に評価し、独自に提案したすべり面活動量を表すパラメータにより単結晶材の疲労き裂進展速度をプロットした結果を図3に示す。4種の結晶方位を持つ試験片でのき裂進展速度が右肩上がりの狭いデータバンド内に収まっており、すべり面活動量を用いることで粒内を進展するき裂の進展速度を良好に整理できることが明らかとなった。

つぎに、これらの結晶塑性解析を用いて多結晶材での粒界近傍での疲労き裂進展挙動に対する解析を行った結果、粒界手前での進展速度の増加と減少を定性的に説明できた。ただし、粒界近傍でのき裂進展駆動力を正確に評価するには、すべり面活動量の算出方法やメッシュ形状など計算条件について検討する課題も多い。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 阪口基己, 神山大知, 横口太郎, 駒村僚太, 井上裕嗣, “単結晶 Ni 基超合金の第 I 段階疲労き裂進展に及ぼす結晶方位の影響”, 材料, (2017), 査読有, 採択決定
- ② Motoki Sakaguchi, Ryota Komamura, Yuta Hosaka, Hirotsugu Inoue, “Stage I Fatigue Crack Propagation in a Single Crystal and a Directional Solidified Ni-base Superalloy”, Superalloys, Vol. 1, (2016), pp. 639-646, 査読有
- ③ 向井康博, 香川裕之, 阪口基己, 岡崎正和, “Ni 基単結晶超合金のき裂先端変形挙動に及ぼす γ/γ' 複合組織の影響”, 材料, 日本材料学会, Vol. 64, (2015), No. 2, pp. 120, 査読有

[学会発表] (計7件)

- ① M. Sakaguchi, M. Higaki, R. Komamura, H. Inoue, M. Okazaki, “Crystal plasticity assessment to Stage I fatigue crack propagation in a single crystal Nickel-base superalloy”, LCF 8th, (June, 2017), Dresden, Germany
- ② 鈴木子游, 河野恭平, 阪口基己, 井上裕嗣, “単結晶 Ni 基超合金の中低温域での疲労き裂進展に与える温度環境の影響”, 日本材料学会第 66 期学術講演会, (2017 年 5 月), 名古屋

- ③ 檜垣真奈, 松浪賢史, 阪口基己, 金子秀明, 唐戸孝典, 鈴木健太, “多結晶 Ni 基超合金の粒内き裂進展に与える結晶方位と結晶粒界の影響”, 日本材料学会第 66 期学術講演会, (2017 年 5 月), 名古屋
- ④ 駒村僚太, 阪口基己, 黒川悠, 井上裕嗣, “Ni 基超合金のせん断型疲労き裂進展に対する結晶塑性有限要素解析”, 日本材料学会 第 54 回高温強度シンポジウム, (2016 年 12 月), 松山
- ⑤ 駒村僚太, 檜垣真奈, 阪口基己, 井上裕嗣, “Ni 基超合金のせん断型疲労き裂進展における結晶学的パラメータの影響評価”, M&M2016 材料力学カンファレンス, (2016 年 10 月), 神戸
- ⑥ 河野恭平, 阪口基己, 井上裕嗣, 単結晶 Ni 基超合金の第 I 段階疲労き裂進展における温度と結晶方位の影響, 日本機械学会関東支部第 22 期総会講演会, (2016 年 3 月), 東京
- ⑦ 横口太郎, 河野恭平, 阪口基己, 井上裕嗣, “単結晶 Ni 基超合金の第 I 段階疲労き裂進展における結晶方位の影響”, 日本材料学会第 53 回高温強度シンポジウム, (2015 年 12 月), 石川

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

氏名：阪口 基己 (Sakaguchi, Motoki)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：60452083

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()