

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560078

研究課題名(和文) 粒界の弾塑性変形を解明に基づくその応力腐食割れにおける決定的な役割

研究課題名(英文) Role of Grain Boundary in Stress Corrosion Cracking based upon Elastic-Plastic Fracture Mechanics

研究代表者

呂 戦鹏 (Lu, Zhanpeng)

東北大学・未来科学技術共同研究センター・客員教授

研究者番号：30419999

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：288 純水中の182合金溶接金属を対象とし、き裂進展方向をT-SならびにT-Lとした場合のき裂進展速度を溶存酸素並びに溶存水素濃度毎に求めた。供試材においては、高傾角のランダム粒界が主であった。両方向の試験片において得られたき裂はデンドライト境界に沿っていた。T-S方向におけるき裂進展速度はT-L方向に比べて著しく速かった。T-S方向におけるき裂においては、応力負荷方向に対して垂直に進展しているものも観察できた。また、溶存酸素濃度の低下に伴い、き裂進展速度は遅くなった。

研究成果の概要(英文)：Stress corrosion cracking growth rates of Alloy 182 weld metals in T-S and T-L orientations in 288°C pure water with various dissolved oxygen and hydrogen concentrations were measured. High angle random boundaries are dominant in Alloy 182. Extensive inter-dendritic stress corrosion cracking paths on the side surfaces and fracture surfaces of both T-S and T-L orientation specimens. Crack growth rates of the T-S specimen are significantly higher than those of the T-L specimen. The crack growth path in the T-S orientation specimen is apparently perpendicular to the applied loading direction, which appears to be parallel to the loading direction in the T-L specimen. The crack growth rate decreased significantly with decreasing dissolved oxygen concentration.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：弾塑性 応力腐食割れ 環境強度 結晶粒界 高温水

1. 研究開始当初の背景

実験結果により予変形の影響は、変形量および変形モードに依存することが示された。変形した微視組織と、粒界応力腐食割れ (IG-SCC) の活性経路および動力学との基本的な関係は今後明確化されるべきである。冷間加工および温間加工により圧延されたステンレス鋼、Ni 基超合金における異なる試験面において、き裂進展速度は顕著に異なる。加えて、変形した微視組織は、IG-SCC の経路に顕著な影響を与えることが判明した。冷間加工により微視組織的にバンド構造を有する 690 合金は、S-L および S-T の圧延方向それぞれにおいて著しく大きな SCC 成長速度を示すことが報告されている。結晶粒界の変形と局所変形は IG-SCC に影響を与えることが示されている。また、最近の研究において、不均質構造は、冷間加工された 316NG 鋼、および 316NG 鋼の溶接熱影響部 (HAZ) における SCC の優先経路となりうることも示されている。

本研究では、特に粒界特性や局所変形性の様な結晶粒界の違いについて、明確に特徴づけられた材料を使用して SCC 試験を行う。実験結果に基づき、結晶粒界構造を考慮した解析手法を用いることで考察を行う。後方電子散乱回折法 (EBSD) により、微視組織の解析を行う。メソスコピックな弾塑性解析には、EBSD 及びその他の手法を用いる。さらに、塑性変形に及ぼす予変形の影響、水質との相互作用について調査する。界面酸化動力学、特に応力加速固相酸化メカニズムに基づいた理論的な SCC モデルを基礎とし、局所的な塑性変形と、微視組織および SCC 動力学との相互関係を定量化する。

2. 研究の目的

高温水中における、多結晶合金のメソスコピックな弾塑性変形が SCC の優先経路及び動力学に及ぼす影響を、SCC 試験、微視的な結晶構造の解析、理論的な SCC モデルにより考慮する。粒界の微視組織の特性としての粒界の応力・ひずみ速度、メソスコピックな弾塑性変形、粒界における酸化動力学、などの相互作用を明かにする。本研究の結果は、軽水炉における非鋭敏化ステンレス鋼及び Ni 基超合金の様な材料の粒界制御による耐 SCC 材料の開発に役立てるため、メソスコピックスケールでの SCC 予測に関する科学的な知見を提供する。

3. 研究の方法

基準材及びひずみ硬化させた供試材の微細構造は、後方散乱電子回路 (EBSD) によって分析する。き裂進展速度試験は、高温水環境中で行われ、交流電気ポテンシャル法による

き裂の長さモニタリングを併用し実施する。き裂進展速度は、機械的特性及び酸化動力学を併用した理論モデルに基づき分析した。

4. 研究成果

(1) き裂経路に及ぼす局所変形と水質の影響

供試材となる 316L ステンレス鋼および 600 合金のランダム粒界と低シグマ対応粒界 (CSLB) に代表される粒界性格、粒界近傍の結晶方位差とその分布、予変形を調べた (Fig. 1-3)。微視組織中の不均質性を評価するとともに、粒界における弾塑性挙動の評価に用いるパラメータの妥当性を検討した。316L ステンレス鋼と 600 合金のひずみ硬化による予変形、ひずみの局在化は、Kernel Average Misorientation (KAM) 値または方位差角の分布で評価することとした。SCC き裂進展試験は、環境として酸素富化ならびに水素添加環境とした。試験後の表面および断面の観察から活性割れ経路を明らかにする。以上により、結晶粒界変形、局所酸化、および応力集中の相互作用を、応力腐食割れ進展試験、割れ経路解析、割れ動力学評価に基づき通じて検討する。

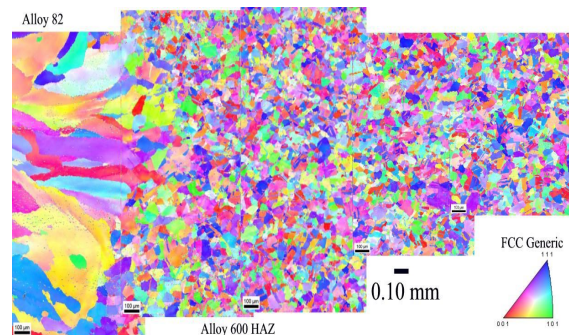


Fig.1 600 合金/182 合金溶接部熱影響部の後方電子散乱回折法による評価

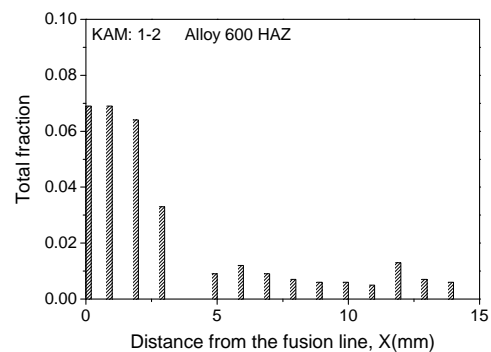


Fig.2 600 合金熱影響部における KAM 値の分布

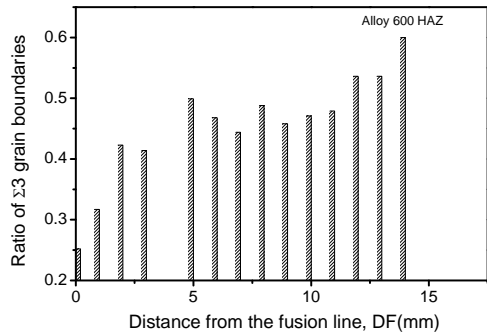


Fig.3 600 合金熱影響部における対応粒界頻度の分布

(2) 模擬加圧水型原子炉一次冷却水環境における Ni 基合金のき裂進展モデル化

材料信頼性プログラム(MRP)においては、600 合金について、応力腐食割れの規格線図を MRP55 に定めている。また、82/182/132 合金については、MRP115 に定めている。応力拡大係数、温度と活性化エネルギーは MRP55 ならびに MRP155 に含まれている。今回の研究では、き裂進展速度と応力拡大係数の基礎的な相関を、理論モデルと実験データのスクリーニングにより定量化させる。600 合金とそれらの溶接金属のき裂進展速度の理論予測結果は実験データと整合が見られた。

(3) 182 合金の高温水中 SCC 経路に及ぼす樹枝状組織の方位と電気化学的状態の影響評価

182 合金における T-S 方向ならびに T-L 方向のき裂進展速度を 288 純水中で計測した。進展速度に及ぼす溶存酸素と溶存水素濃度の影響を定量的に明らかにした。破面は Fig.4 から 5 に示す。182 合金では、高傾角ランダム粒界が主であった。また、割れはデンドライド境界に沿っていた。T-S 方向におけるき裂進展速度は T-L 方向に比べて著しく速かった。T-S 方向におけるき裂においては、応力負荷方向に対して垂直に進展しているものも観察できた。また、溶存酸素濃度を 2 ppm から 0.2 ppm に低下させると、き裂進展速度も遅くなった。溶存水素は電気ポテンシャル法で評価されるき裂長さを遷移的に減少させる効果が生じ、き裂先端部における界面の状況が遷移することに起因すると考えられた。

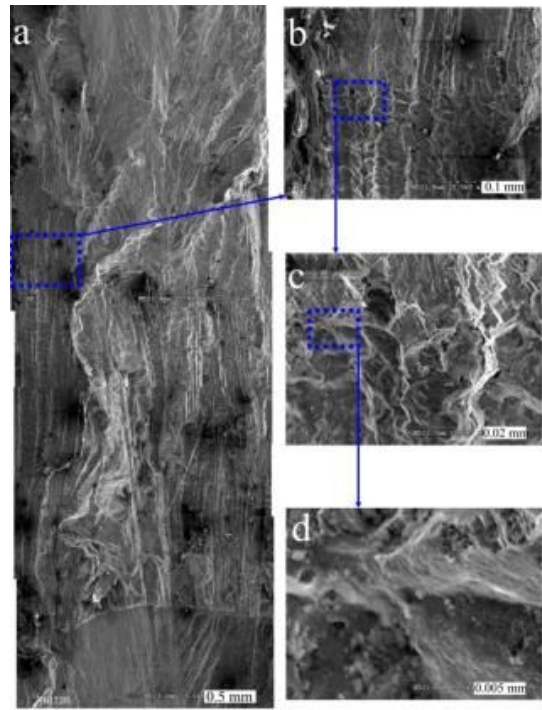


Fig. 4. 破面形態(試験片 T6122B、T-S 方向)

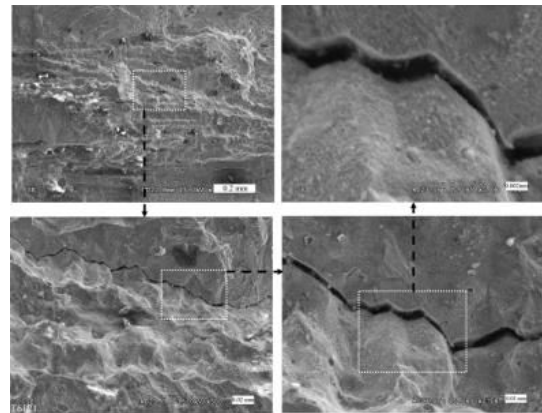


Fig. 5. 破面形態(試験片 T6121、T-L 方向)

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)

Zhanpeng Lu, Tetsuo Shoji, He Xue, Chaoyang Fu, Deterministic Formulation of the Effect of Stress Intensity Factor on PWSCC of Ni-Base Alloys and Weld Metals. Journal of Pressure Vessel Technology, 査読有, Vol.135, No.2, 2013, 021402.

DOI: 10.1115/1.4007471

Zhanpeng Lu, Tetsuo Shoji, Seiya Yamazaki, Kazuhiro Ogawa, Characterization of microstructure, local deformation and microchemistry in Alloy 600 heat-affected zone and stress corrosion cracking in high temperature water, Corrosion Science,

査読有, Vol.58, 2012, 211-228.
DOI:10.1016/j.corsci.2012.01.029
Zhanpeng Lu, Tetsuo Shoji, He Xue,
Fanjiang Meng, Chaoyang Fu, Yoichi
Takeda, Koji Negishi, Synergistic
effects of local strain-hardening and
dissolved oxygen on stress corrosion
cracking of 316NG weld heat-affected
zones in simulated BWR environments, J.
Nuclear Materials, 査読有, Vol.423,
2012, 28-39.
DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.12.030

[学会発表](計4件)

Zhanpeng Lu, Tetsuo Shoji, Effects of
dendrite orientation and water
chemistry on stress corrosion cracking
path and kinetics of Alloy 182 weld
metal in high-temperature water, 16th
International Conference on
Environmental Degradation of Materials
in Nuclear Power Systems-Water Reactors,
August 11 - 15, 2013, USA.

Zhanpeng Lu, Tetsuo Shoji, Shuang Xia,
Meiyi Yao, Bangxin Zhou, Effects of
Prior-deformation and Water Chemistry
on Stress Corrosion Cracking of
Austenitic Alloys In High Temperature
Water. 21th International Conference on
Nuclear Engineering (ICONE21), July
29-August 2, 2013, China.

Zhanpeng Lu, Tetsuo Shoji, Seiya
Yamazaki, Fanjiang Meng, Tichun Dan,
Yoichi Takeda, Koji Negishi.
Deformation Mode and Microstructure on
Stress Corrosion Cracking Path and
Kinetics in High Temperature Water
Environments, 15th International
Conference on Environmental
Degradation of Materials in Nuclear
Power Systems-Water Reactors, August
7-11, 2011, USA.

Zhanpeng Lu, Tetsuo Shoji, He Xue and
Chaoyang Fu, Mechanistic Formulation of
PWSCC Growth Rates of Ni-Base Alloys and
Weld Metals, ASME 2011 Pressure Vessels
and Piping Conference, July 17-21, 2011,
USA.

[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0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

呂 戦鵬 (Lu, Zhanpeng)
東北大学・未来科学技術共同研究セン
ター・客員教授
研究者番号：30419999

(2) 研究分担者

庄子 哲雄 (Shoji, Tetsuo)
東北大学・未来科学技術共同研究セン
ター・教授
研究者番号：80091700

竹田 陽一 (Takeda, Yoichi)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40374970

(3) 連携研究者