高 Cr 鋼溶接継手の Type IV 損傷と組織

Microstructures and Type IV creep damage of high Cr steel welds

○本郷宏通 物質・材料研究機構

Hiromichi HONGO, National Inst. for Materials Sci.

田淵 正明 物質・材料研究機構

Masaaki TABUCHI, National Inst. for Materials Sci.

高橋由起夫 電力中央研究所

Yukio TAKAHASHI, Central Res. Of Electric Power Industry

Key Words: High Cr steel, Welded joint, Creep, Creep damage, Void, Type IV

Mod.9Cr-1Mo 鋼の 2 種類の溶接継手について、550、600 および 650℃でクリープ破断試験を行い、Type IV 破壊した試験片について損傷の分布を調査した。また、FEM 解析を行い、損傷分布の調査結果との比較を行った。H 開先の溶接継手のボイドは、板厚の約 1/4 付近で最も多く観察され、表面や板厚中央ではあまり観察されなかった。U 開先のボイドは表面ではあまり観察されず、板厚中央付近で均一に観察された。Type IV 損傷の分布には、細粒 HAZ にクリープひずみが集中すること、多軸応力が作用することの両方が影響を与えているものと考えられた。

1. 緒言

高 Cr フェライト系耐熱鋼の溶接継手では、溶接施工時の熱履歴により、溶接熱影響部(HAZ)に細粒組織が形成される。高温で長時間使用される発電プラント等では、細粒の HAZ に発生する Type IV 損傷が問題となっており、多くの研究が行われている。しかし、損傷の発生・成長のメカニズムやプロセスに及ぼす開先形状の影響についての検討は少ない。

本研究では、高 Cr フェライト系耐熱鋼溶接継手の HAZ に生じる Type-IV 損傷に着目し、材料試験、組織解析、損傷計測および FEM 解析などによりその発生機構を調査した。

2. 供試継手および実験方法

本研究では、板厚 25mm の Mod.9Cr-1Mo 鋼板を用いて H 開先(Double U groove)および U 開先(Single U groove)の 2 種類の溶接継手を、ガスタングステンアーク溶接(GTAW)で作成し、供試継手とした。供試継手から、溶接金属部が試験片中央に位置するように、厚さ 17.5mm、幅 5mm、平行部 100mm の小型平板溶接継手試験片を採取し、クリープ破断試験を 550、600 および 650℃で行った。H 開先の溶接継手については、大型平板溶接継手試験片(厚さ: 21mm、幅: 21mm、平行部: 100mm)を採取してクリープ中断試験を 600℃、90MPa の条件で行った。H および U 開先の溶接継手試験片中央断面のマクロ組織を Fig. 1 に示した。

クリープ損傷(ボイド、き裂)の観察はレーザー顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて行った。クリープ損傷の測定は、板幅中心を溶接線と直交する方向に切断した断面について行った。クリープ破断した試験片については、破断しなかった側の HAZ 近傍について測定した。レーザー顕微鏡で、50 倍の対物レンズを用いて、HAZ の光量画像を連続的に取得した。取得した画像について、画像解析ソフトウェアを使用してクリープ損傷の定量を行った。また、母材および再現 HAZ 材の実験データから得られた材料定数を用いて FEM クリープ解析を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 損傷分布

Type IV 破壊したいずれの溶接継手試験片も、ボイドはインタークリティカル HAZ および細粒 HAZ の領域で観察され、母材、軟化域および粗粒 HAZ ではほとんど観察されなかった。Fig. 2 にクリープ中断試験を行った H 開先継手における、ボイド数とボイド面積率の板厚方向の分布を示した。いずれの中断時間においてもボイドは表面近傍では少なく、板厚の約 1/4 付近で最も多く、板厚の中心部では減少することがわかった。U 開先の溶接継手のボイド数の分布を Fig. 3 に示した。ボイドは表面近傍では少なく、表面約 2mm から板厚中心でほぼ均一に分布していた。

3.2 FEM 解析

H および U 開先の溶接継手試験片の応力-ひずみ分布の FEM 解析を行った。クリープ構成式には Norton 則を用いた。再現 HAZ 材および母材のクリープ指数 n 、定数 A は実験から求めた値を使用した。溶接金属のクリープデータは未取得のため、母材で代用した。H 開先の溶接継手については、大型平板試験片のクリープ中断条件と同じ 600℃、90MPa で 3 次元解析を行い、実験と同様に板幅中心部の応力-ひずみ分布を調査した。Fig. 4 に、板幅中心断面の HAZ における応力多軸度および相当クリープひずみの分布の時間変化を示す。クリープひずみは、試料表面付近よりも僅かに内側で最も大きく、板厚の 1/4 にかけて減少する。一方、応力多軸度は板

Fig. 1 Cross sectional view of the welded joint specimens.

厚の 1/4 から板厚中心部において大きい。実験では、ボイドはいずれの時間においても板厚の 1/4 付近で最も多く発生し、表面近傍および板厚中央部ではあまり観察されなかった。U 開先の溶接継手試験片については、600℃、80MPa で 3 次元解析を行った。Fig. 5 に破断した溶接継手の HAZ 近傍のマクロ組織と相当クリープひずみおよび応力多軸度の分布を併せて示した。相当クリープひずみは表面近傍で最も大きく、表面から約 2mm まで減少する。応力多軸度は表面から内部に向かい約 2mm まで増加し、中央ではほぼ一定の値を示した。一方、破断材では HAZ の表面から 2mm 付近にクラックが観察された(Fig.5(c))。従って、細粒 HAZ にクリープひずみが集中すること、多軸応力が作用することの両方が Type IV 損傷の分布に影響を与えているものと考えられた。

4. 結言

高 Cr 鋼溶接継手の Type IV 損傷のプロセスやメカニズムを明らかにすることを目的として、H および U 開先の Mod.9Cr-1Mo 鋼溶接継手のクリープ中断およびクリープ破断試験を行い、その損傷分布を調べるとともに FEM 解析を行い、以下の結果を得た。

- (1) Type IV 破断した溶接継手のクリープボイドは、インタークリティカル HAZ および細粒 HAZ で観察され、その他の領域ではあまり観察されなかった。
- (2) H 開先の溶接継手のクリープボイドは板厚の約 1/4 付近で最も多く観察され、表面や板厚中央ではあまり観察され

Fig. 2 Measured distributions of creep voids in the welded joint with double U groove during creep at 600℃ for 90MPa.

Fig. 3 Measured distributions of creep voids in the welded joint with single U groove for 600℃ at 100MPa.

- れなかった。U 開先の溶接継手のクリープボイドは表面約 2mm から中心部で多く観察された。
- (3) 相当クリープひずみは、試験片表面近傍で大きく、内部では小さくなる。一方、応力多軸度は板厚の 1/4 から中央で、約 3 の値を示した。
 - (4) Type IV 損傷の分布には、細粒 HAZ にクリープひずみが集中すること、多軸応力が作用することの両方が影響を与えているものと考えられた。

謝辞 本研究は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの委託事業として、(財)電力中央研究所が実施した平成 19 年度「次世代高温原子力プラント溶接構造に対する防止技術の開発」の成果である。

Fig. 4 Distribution of equivalent creep strain and stress triaxial factor in HAZ in the thickness direction of the welded joint with double U groove crept at 600℃ for 90MPa.

Fig. 5 Distribution of stress triaxial factor and equivalent creep strain in HAZ in the thickness direction of the welded joint with double U groove crept at 600℃ for 80MPa.