

主論文の要約

論文題目 FCC系耐熱材料溶接継手の塑性ひずみ定
量化に関する研究

氏名 野村 恭兵

論文内容の要約

本研究では、現在、石炭火力発電用ボイラに用いられている耐熱用金属材料の中でも、特に面心立方格子(Face Centered Cubic : FCC)を有するオーステナイト系耐熱鋼および次世代石炭火力発電用候補材料である Ni 基合金の溶接継手において、溶接熱影響部(Heat Affected Zone : HAZ)に導入される塑性ひずみ量を定量化する手法を確立することを目的とした。塑性ひずみの定量化手法としては、Electron Back Scatterd Diffraction(EBSD)法および X-ray Diffraction(XRD)法の 2 種類である。塑性ひずみ定量化の具体的な手順として、はじめに、オーステナイト系耐熱鋼および Ni 基合金に既知の塑性ひずみを付与し、その試料に対して EBSD 方位差パラメータおよび XRD 法による総転位密度を測定する。得られた結果と塑性ひずみ量の関係を求めた。その結果、EBSD および XRD 法のどちらを用いても塑性ひずみ量を定量化できることが明らかとなった。次に、実際の溶接継手に導入された塑性ひずみとそのクリーブ破断強度にどのような挙動を示すかも明らかにするため、Ni 基合金 HR6W の溶接継手を作製し、そこから切り出した試験片を用いてクリーブ破断試験を行った。また、試験前の溶接継手について EBSD および XRD 法により塑性ひずみの評価も行った。その結果、Ni 基合金 HR6W 溶接継手のクリーブ破断強度は母材と同等以上で、継手に導入された塑性ひずみはクリーブ破断強度を上昇させることを明らかにした。以下、各章の具体的内容を述べる。

第 1 章では、日本国内にて使用されている主要な発電手法を述べるとともに、特に石炭火力発電に注目し、その役割および課題を述べた。具体的には、現在実用化されている最新技術である Ultra-Super Critical(USC)発電条件について、現状を述べた。また、次世代火力発電技術として世界中で開発が進められている Advanced-Ultra Super Critical(A-USC)

発電条件の状況についても開発目標、スケジュールおよびその開発進捗状況をまとめた。次に、実発電プラントにおけるボイラの概要を説明したのち、USC ボイラに用いられているフェライト系耐熱鋼およびオーステナイト系耐熱鋼の溶接継手における現状を述べた。その上で、オーステナイト系耐熱鋼および今後 A-USC において適用が検討されている Ni 基合金候補材料の溶接継手における塑性ひずみ量を定量化することの重要性を述べた。さらに、EBSD 法および XRD 法による塑性ひずみ定量化手法を提案し、本研究の目的を述べた。

第 2 章では、FCC 格子を有するオーステナイトステンレス鋼における材料、結晶粒径および EBSD 測定条件が EBSD パラメータに及ぼす影響を系統的に調査することを目的とした。そのために、既知の引張ひずみを付与した試片を用いて EBSD 測定を行い、EBSD にて得られる方位差パラメータと塑性ひずみ量の関係について検討した。また、各パラメータの結晶粒径依存性についても検討した。その結果、結晶粒内の平均的な変形量を表すパラメータである Distortion 法によって得られる Misorientation_{ave} および EBSD 方位差パラメータ GOS_{ave}(area)は、塑性ひずみ量の増加に伴い単調に増加し、鋼種・結晶粒径に依存しないパラメータであることが明らかとなった。従って、この GOS_{ave}(area)を用いることで結晶粒径に依存せず溶接継手の塑性ひずみ量を定量化することが出来る。一方、結晶粒内の局所的な変形を表す KAM_{ave}は、塑性ひずみ量の増加に伴い、単調に増加するが、結晶粒径に依存することが明らかとなった。これら EBSD 方位差パラメータ GOS_{ave}(area)および KAM_{ave}は、Ashby の提案した塑性ひずみ量と方位差をもたらず GN 転位密度の関係を表す式によって表現でき、GN 転位を捉えたパラメータであることが明らかとなった。

第 3 章では、オーステナイト系耐熱鋼を対象として、XRD により得られる総転位密度を用いて塑性ひずみ量を定量化することを目的として、総転位密度と塑性ひずみ量の相関について検討した。この XRD 法の特徴は、EBSD 法と異なり材料の比較的広い領域における総転位密度が計測可能な点と、総転位密度のみならず、転位性状も評価できる点にある。そこで、EBSD 方位差パラメータで得られる情報を補完することも含めて検討した。その結果、XRD 法で得られる総転位密度は、塑性ひずみ量の増加とともに単調に増加することが明らかとなった。また、総転位密度の増加率は結晶粒径依存性を示し、結晶粒径が小さいほどその傾きも大きくなることが明らかとなった。この傾向は、EBSD 法による方位差パラメータの傾向と一致した。また、XRD 法から得られる転位性状は、初期材では、刃状転位とらせん転位の混合状態であることを示したが、引張ひずみ量の増加とともにらせん転位の割合が増加し、塑性ひずみ量 5%以上ではらせん転位が主体となることも明らかとなった。さらに、EBSD 方位差パラメータ KAM_{ave}を用いて算出した塑性ひずみ量 15%における GN 転位密度の粒径間差と XRD による総転位密度の粒径間差を比較した。その結果、総転位密度の粒径依存性は、GN 転位密度変化に起因していることが明らかとなった。

第4章では、第2章および第3章にて検討したオーステナイト系耐熱鋼の塑性ひずみ量とEBSD方位差パラメータおよびXRD総転位密度との関係がNi合金HR6Wにおいても成立するか否かを明らかにすることを目的とした。この目的のために結晶粒径の異なる3種類のHR6Wを用いてEBSD方位差パラメータ $GOS_{ave}(area)$ およびXRD法による総転位密度と塑性ひずみ量の関係をそれぞれ検討した。さらに、HR6Wを用いて溶接継手を作製し、得られた溶接HAZに導入される塑性ひずみ量の定量化も試みた。その結果、Ni合金HR6Wにおいてもオーステナイト系耐熱鋼同様、塑性ひずみ量とEBSD方位差パラメータ $\Delta GOS_{ave}(area)$ およびXRD法による総転位密度の関係は、塑性ひずみ量の増加とともに単調に増加した。また、EBSD方位差パラメータ $GOS_{ave}(area)$ に粒径依存性はなく、XRD総転位密度は結晶粒径に依存することを明らかにした。すなわち、オーステナイト系耐熱鋼同様、HAZの塑性ひずみ量を定量化できることができたことがわかった。そこで、溶接継手のHAZに導入された塑性ひずみ量を、EBSD方位差パラメータおよびXRD総転位密度を用いて定量化することを試みた。その結果、HAZには最大およそ4.5%の塑性ひずみが導入されていることが明らかになった。さらに、EBSD法およびXRD法を用いて算出した塑性ひずみ量の結果は、両測定法で非常に良い一致を示した。

第5章では、A-USC候補材料であるNi合金HR6W溶接継手を用い、溶接継手のクリープ破断強度を明らかにするとともに、破断材の破壊形態および組織の特徴について検討した。その結果、HR6W溶接継手のクリープ破断強度は、700~800°Cの温度域で破断時間10000h程度まで、母材の平均破断強度と同等以上であることが明らかとなった。マクロ組織観察の結果、破断位置はすべてボンド部から10mm以上離れた母材領域であることも明らかとなった。ミクロ組織観察の結果、ボンド部より1~10mmのHAZでは、クラックおよびクリープポイドは観察されなかったが、10mm以上離れた母材部においてはクラックが観察され、破断部に近づくとともに、クラックの長さおよび数は増加することが明らかとなった。加えて、HR6Wのクリープ強度を高めているLaves相および $M_{23}C_6$ 炭化物の析出形態に着目して観察したところ、結晶粒界における析出物の粒界被覆率は、HAZにおいて一定であるが、10mm以上離れた母材部では低下することが明らかとなった。一方、結晶粒内に析出しているLaves相の平均粒子径はボンド部からの距離によらず一定であるが、 $M_{23}C_6$ 炭化物の平均粒子径はボンド部から離れるほど粗大化していることも明らかとなった。すなわち、溶接継手のHAZにおいてクラック等が観察されなかった理由は、粒内の $M_{23}C_6$ 炭化物が母材部と比べ微細に析出していたこと、および粒界被覆率が高かったことの両者により、粒内および粒界析出強化の寄与が大きかったためであると結論された。

第6章では、この論文の総括を述べている。