

氏名	すぎ うら りゅう じ 杉 浦 隆 次
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 17 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械知能工学専攻
学位論文題目	W 添加 9-12%Cr 鋼のクリープき裂成長寿命に及ぼす脆化効果
指導教員	東北大学教授 横堀 壽光
論文審査委員	主査 東北大学教授 横堀 壽光 東北大学教授 坂 真澄 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学助教授 連川 貞弘

論文内容要旨

火力発電プラント用耐熱鋼は過去 50 数年間多くの開発研究が行われ、著しい進歩をとげてきた。その結果、火力発電プラントは高温・高圧化され、その発電効率は急速に改善された。1950 年頃の火力発電プラントの蒸気温度・圧力は 450~480°C・4~12MPa 程度であったが、1967 年には低 Cr (1~2.25%) 鋼が開発され超臨界圧 (SC:Super Critical Steam Condition, 24.1MPa, 538°C/566°C) のプラントが出現した。

現在では超臨界圧プラントの蒸気条件をより一層向上させた超々臨界圧 (USC:Ultra Super Critical Steam Condition, 32MPa, 600/630°C) のプラント導入が世界的な目標になり、高効率タービンおよびボイラ用耐熱材料として W 添加 9-12Cr フェライト系耐熱鋼が開発されている。

この開発された W 添加 9-12Cr フェライト系耐熱鋼について、平滑材を用いた引張試験やシャルピー衝撃試験等による基本的な機械的性質や組織の経時変化に関する研究は報告されている。しかし、これら開発された材料を実際に超々臨界圧タービンおよびボイラ部位に使用する場合、何らかの外的負荷によりき裂が発生し損傷する可能性がある。その一方では、経済的な面でライフサイクルコストの低減につながる高温部品の長寿命化や定期点検間隔の延長が求められている。

このような観点から、W 添加 12Cr フェライト系耐熱鋼の CT 試験片を用いた平面応力および平面ひずみ条件下におけるクリープき裂成長の研究が行われ、クリープき裂成長速度則およびクリープき裂成長寿命則が導かれてきた。

しかし、実際のプラント等、機器構造物を構成する部材は単軸負荷条件下においても、3 次元構造による力学的負荷の局所性に起因して、局所的に多軸応力が負荷される場合が想定される。この多軸応力はしばしば構造脆性を誘起し、機器構造物の安全性、信頼性を損なう可能性がある。このような多軸応力条件

下で生じるき裂成長特性は、CT 試験片等、平板試験片で生じるき裂成長特性と異なった特性が発現することが考えられる。

また、材料組織学的には、開発された W 添加 9-12Cr フェライト系耐熱鋼の高温クリープき裂成長寿命は、供試材の作成段階において生じる添加元素や材料の結晶粒、ラスマルテンサイト組織などの強化因子の大きさと分布の相違による影響も受けると考えられる。このことは、クリープき裂成長抵抗に関する組織感性を高め、高温クリープき裂成長寿命における力学法則からのばらつきを大きくする原因になりうる。このようなばらつきは、高温クリープき裂成長寿命予測の高精度化に対する障害としての課題を提起する。さらに、この強化機構を発現させるラスマルテンサイト組織は長時間にわたるクリープ変形中に、成長、粗大化し、その強化作用が減じる経年劣化等のような材質的脆性を生じさせる原因となる。

そこで、本研究では、W 添加 9-12Cr フェライト系耐熱鋼の高温クリープにおける力学的性能評価を行った。クリープき裂成長寿命におよぼす脆化効果を 1)局所的多軸応力等の構造力学的要因による場合と、2)経年劣化等の材質的要因による場合とについて調べ、W 添加 12Cr フェライト系耐熱鋼のクリープき裂成長寿命に及ぼす脆化効果について明らかにした。

クリープき裂成長特性に及ぼす構造脆化効果については、局所的多軸応力下での試験として環状切欠き試験片を用いた単軸引張応力下でのき裂成長試験を行い、クリープき裂成長速度特性およびクリープき裂成長寿命則を導いた。また、タービンロータ部位の従来鋼であるクリープ高延性材料 Cr-Mo-V 鋼のき裂成長特性と比較した。さらに、3次元有限要素法による弾塑性クリープ解析により、切欠き近傍の多軸応力状態を解析し、クリープき裂成長特性に及ぼす構造脆性効果について考察した。

クリープき裂成長特性に及ぼす材質的脆化効果については、添加元素や強化組織が異なる種々の W 添加 9-12Cr 鋼に対して、高温クリープき裂成長試験を行い、クリープき裂成長寿命則に及ぼす添加元素や結晶粒径、ラスマルテンサイト組織等の強化組織の影響を明らかにした。さらに、経年劣化材を用いたクリープき裂成長試験を行い、クリープき裂成長特性に及ぼす材質的脆化効果について考察した。

以下に得られた結論を示す。

1) タービンロータ部位の従来鋼であるクリープ延性材料 Cr-Mo-V 鋼の環状切欠き試験片の荷重線変位量は、CT 試験片の荷重線変位量に比べて、変位が抑制され、環状切欠きによる多軸応力効果（構造脆性効果）が顕著に発現することが示された。それに対して、W 添加 12Cr フェライト系耐熱鋼の環状切欠き試験片の荷重線変位量は、CT 試験片の荷重線変位量とほぼ同じ値を示し、環状切欠きにより誘起される多軸応力効果（構造脆性効果）は顕著に発現しなかった。

2) タービンロータ部位の従来鋼であるクリープ延性材料 Cr-Mo-V 鋼の環状切欠き試験片におけるクリープき裂成長速度則は、CT 試験片の場合と定性的にも定量的にも異なる形で定式化され、変形が抑制された組織強化型耐熱材料の CT 試験片と同じ形の表式となった。それに対して、組織強化型耐熱材料である W 添加 12Cr フェライト系耐熱鋼の環状切欠き試験片におけるクリープき裂成長速度則は、延性材料と異なり CT 試験片の場合のクリープき裂成長速度則と定性的に同じ形で定式化され、活性化エネルギー等の物性定数が定量的に若干異なるだけであった。

3) クリープダクティリティーを定量評価する QL^* パラメータを導き、W 添加 12Cr フェライト系耐熱鋼およびクリープ延性材料の Cr-Mo-V 鋼の環状切欠き試験片と CT 試験片におけるクリープダクティリティー評価を行った。その結果、クリープ高延性材料である Cr-Mo-V 鋼の環状切欠き試験片のクリープダクティリティーは、CT 試験片のものに比べ低下し、環状切欠きの効果（構造脆化効果）によって、顕著にクリープ変形が抑制されることが示された。一方、組織強化型材料の W 添加 12Cr フェライト系耐熱鋼においては、材料強化組織によるクリープ変形抑止効果により、CT 試験片のクリープダクティリティーは Cr-Mo-V 鋼におけるクリープダクティリティーより低下することが示された。しかし、環状切欠き試験片と CT 試験片の QL^* 値はあまり変わらず、環状切欠き効果（構造脆性効果）は顕著に見られないことが示された。

4) 3次元弾塑性クリープ有限要素解析による環状切欠き試験片および CT 試験片の切欠き近傍の応力解析を行い、力学的観点からクリープき裂成長寿命におよぼす多軸応力効果について明らかにした。その結果、Cr-Mo-V 鋼および W 添加 12Cr フェライト系耐熱鋼における環状切欠き試験片の応力多軸度 TF 値は、CT 試験片の TF 値に比べて高い値を示した。これは、環状切欠きによる塑性拘束が多軸応力場を誘起することを示している。したがって、結論 1)~3)で得た延性材料で顕著に見られた構造脆性効果は、この多軸応力効果によるものであることが示された。しかし、W 添加 12Cr フェライト系耐熱鋼は、ラスマルテンサイト組織等による材料組織強化機構を有しているため、この効果により応力多軸度 TF の増加に伴う構造脆性効果の発現を抑制し、実験結果に見られるようなクリープダクティリティーの低下を抑制する効果を示すことがわかった。

5) 添加元素や強化組織が異なる種々の W 添加 9-12Cr 鋼に対して、高温クリープき裂成長試験を行い、クリープき裂成長寿命則に及ぼす添加元素や結晶粒径、ラスマルテンサイト組織等の強化組織の影響を明らかにした。その結果、Mo 当量一定の下での Mo の絶対量にクリープき裂成長寿命は敏感であることが示された。その Mo の効果は、クリープき裂成長寿命則に対してその構成則を変えることなく比例

倍の効果として効くことが示された。また、鋼塊重量の大きさなどによる冷却速度の相違は、結晶粒の大きさや強化組織であるラス構造などの微視組織に影響を与え、クリープき裂成長寿命の活性化エネルギーや応力のべき乗指数に定量的に影響を与えることが示された。さらに、これらの影響を考慮に入れたクリープき裂成長寿命予測式を導くことができた。このクリープき裂成長寿命予測式を用いることにより、100%のクリープき裂成長寿命のばらつきが17%になり83%の精度向上が達成された。

6) 加熱処理を施し経年による脆化を模擬したW添加12Crフェライト系耐熱鋼加熱脆化模擬材に対しクリープき裂成長試験を行った。その結果、 Q^* パラメータによるクリープき裂成長速度評価より、経年劣化の効果は、クリープき裂成長速度則の活性化エネルギーや応力のべき乗指数を変えることなく、比例倍の加速特性として表されることが示された。また、この経年劣化による加速効果は硬度低下特性と対応していることがわかった。硬度低下を示す場合は、上述と同様にクリープき裂成長寿命は Q^* に対してほぼ定数倍の特性として表される。一方、硬度低下を示さない場合は、 Q^* による評価でクリープき裂成長速度の変化は生じないことが示された。

7) 経年劣化効果によるクリープき裂成長寿命特性の変化は、結論5)のクリープき裂成長寿命に及ぼす結晶粒径依存効果特性と適合した形で表すことができた。この結果を基にして、本研究で用いた経年劣化域の材料では、結晶粒径の変化は、活性化エネルギーを変えることなくクリープき裂成長寿命則に比例倍の影響を及ぼす領域にあることが示され、すなわち、経年劣化によりクリープき裂成長寿命則が比例倍的に加速される理由が明確になった。さらに、本結果より、経年劣化により結晶粒が大きく変化して、活性化エネルギーにも影響を及ぼす経年劣化域においても、き裂成長寿命則がどのように変化するかを予測することが可能であることも示された。

論文審査結果の要旨

W 添加 12%Cr 鋼は、発電プラント用ボイラ・タービンロータ鋼として開発され、将来の使用が期待されている組織強化型耐熱材料であるが、本材料を実用化する場合に必要なクリープき裂成長寿命則を求めることはほとんど試みられていない。著者は、実機への適用に際して重要となる W 添加 12%Cr 鋼のクリープき裂成長寿命に及ぼす脆化効果を 1)局所的多軸応力等の構造力学的要因による場合、2)経年劣化等の材質的・環境的・経時的要因による場合について調べ、本材料のき裂成長寿命に及ぼす脆化効果について明らかにしている。本論文はこれらの成果についてまとめたものであり、全編 6 章よりなる。

第 1 章は緒論であり、本研究の背景および目的と意義について述べている。

第 2 章では、W 添加 12%Cr 鋼の環状切欠き試験片を用いてクリープき裂成長試験を行い、多軸応力条件下でのクリープき裂成長寿命則の構築を行っている。また、本材料のクリープき裂成長寿命則は、多軸応力が生じても定性的には同じ形で定式化され、多軸応力効果はき裂成長寿命則に定量的な相違としてのみ発現することを示している。一方、クリープ延性材料である Cr-Mo-V 鋼のクリープき裂成長寿命則に及ぼす多軸応力効果は定性的に大きな影響を与え、両者で多軸応力効果の発現挙動が異なることを示している。本結果は構造脆性という概念提示の基礎となる重要な成果である。

第 3 章では、実験特性から得られたクリープダクティリティーと 3 次元弾塑性クリープ有限要素解析による環状切欠きおよび CT 試験片の切欠き近傍の多軸応力場の解析からクリープき裂成長寿命に及ぼす多軸応力効果を明らかにしている。その結果、クリープ延性材料では、多軸応力効果による構造脆性効果が顕著に発現するのに対し、W 添加 12%Cr 鋼では、本材料特有の材料組織強化機構により多軸応力が作用しても構造脆性効果は顕著に発現せず、クリープ変形の抑制とダクティリティーの向上が図られていることを示している。本結果は構造脆性という概念の提示と本材料の耐熱鋼としての力学的優位性を示すもので工学的に有用な成果である。

第 4 章では、製作時における添加元素成分や強化組織の相違による種々の W 添加 12%Cr 鋼に対して、クリープき裂成長試験を行い、クリープき裂成長寿命に及ぼす添加元素の影響を明らかにし、クリープき裂成長寿命に大きな影響を及ぼす添加元素を特定している。また、結晶粒径やラスマルテンサイト組織等、クリープき裂成長寿命則へ及ぼす材料組織の影響についても明らかにしている。これらの効果を組み入れたクリープき裂成長寿命則により予測精度は約 1 オーダほど改善され、高精度寿命予測という工学的観点からも有用な成果となっている。

第 5 章では、経年による脆化を模擬した加熱処理を施した W 添加 12%Cr 鋼加熱脆化模擬材に対してクリープき裂成長試験を行い、クリープき裂成長寿命則に及ぼす経年劣化効果について明らかにしている。その結果、経年劣化の効果は、クリープき裂成長寿命則に対して比例倍の加速効果として表されることを示している。また、この加速効果は経年劣化による結晶粒の変化に起因していることを示している。さらにこの効果は、第 4 章で導出した材料組織の変化を考慮したクリープき裂成長寿命則により表すことができ、経年劣化を含めた高精度のクリープき裂成長寿命則を構築できることが示され、工学的に有用な成果となっている。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、構造脆性という概念を新たに提示して、従来の材質的脆化を含めてクリープき裂成長寿命に及ぼす脆化効果を特定すると共に、高精度なクリープき裂成長寿命則を確立したものである。ここで得られた成果は、プラント等、機器構造物の安全性、信頼性の向上に有益なものであり、機械知能工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。