

氏 名	藤 野 宗 昭 よじ の もと あき
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	論 工 博 第 1037 号
学位授与の日付	昭 和 53 年 1 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	鋼の熱疲労に関する基礎的研究

論文調査委員 (主査) 教 授 平 修 二 教 授 田 村 今 男 教 授 山 田 敏 郎

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、鋼が温度サイクルを受けた場合に生ずる熱疲労の強度特性を、ひずみサイクルによって生ずる一定温度下の低サイクル疲労の強度特性にもとづいて、実験的に明らかにした研究の結果をまとめたものであって、緒論、7章および結論からなっている。

緒論では、本研究の目的と研究方法について述べている。

第1章では、このような熱疲労に関する基礎的研究を実施するために必要な熱疲労試験装置の開発および試験方法の確立を行い、熱疲労強度を支配するひずみ範囲、上限温度、温度変動の範囲および温度とひずみの位相を任意に設定・制御して熱疲労試験を実施することが可能となったことを述べている。

第2章では、機械構造用炭素鋼 S15C およびオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304および SUS347 鋼の三角ひずみ波形下の高温低サイクル疲労特性におよぼす温度およびひずみ速度の影響について述べている。S15C 鋼では約400°C 以上、SUS304および347鋼では約600°C 以上の転位の再配列や消滅が容易となり、粒界すべりが認められるようになる高温度域では、疲労破損繰返し数は温度の上昇にともなって減少し、同時にひずみ速度の低下にともなって減少する。これらの実験結果より高温低サイクル疲労寿命に対する温度効果とひずみ速度効果の間には相関関係のあることを示している。

第3章では、非対称三角ひずみ波形を用いて実験することにより、高温低サイクル疲労特性におよぼす1サイクル中のひずみ速度変動の影響を調べ、対称ひずみ波形下の高温低サイクル疲労特性との関係を検討した結果を述べている。高温低サイクル疲労寿命は引張期間と圧縮期間のひずみ速度の大きさが等しい対称三角ひずみ波形下の疲労の場合に最も長寿命となり、引張期間のひずみ速度の方が圧縮期間のそれよりも大きい fast-slow 波形の場合はそれに次ぎ、ひずみ速度がその逆である slow-fast 波形の場合には最も短寿命となる傾向にあることを見出している。この実験結果にもとづいて、非対称ひずみ波形下の疲労における1サイクルあたりの損傷は、それぞれ引張期間のひずみ速度および圧縮期間のひずみ速度に等しいひずみ速度をもつ二種類の対称ひずみ波形下の損傷の平均値と、それら損傷の差に比

例する値とを加算したものに等しいことを明らかにしている。すなわち、1サイクル中のひずみ速度変動によって、対称ひずみ波形の場合には認められない付加的損傷が発生することを見出している。

第4章では、熱疲労強度におよぼすひずみ範囲、上限温度、温度変動の範囲、および温度とひずみの位相の影響を調べ、一定温度下の高温低サイクル疲労強度との関係を検討した結果を述べている。その結果、熱疲労における上限温度が高温低サイクル疲労寿命の温度依存性およびひずみ速度依存性の著しい高温度域に属する場合には、昇温時に引張変形、降温時に圧縮変形を受ける *in-phase* 熱疲労の寿命が顕著に低下するとともに、逆の *out-of-phase* 熱疲労寿命もかなり低下し、いずれも平均温度に等しい高温低サイクル疲労寿命よりも短寿命になるばかりでなく、上限温度に等しい高温低サイクル疲労寿命よりも短寿命となることもあることを見出している。さらに、前章におけると同様に、熱疲労における1サイクルあたりの損傷は、それぞれ下限温度および上限温度に等しい一定温度下の高温低サイクル疲労の損傷の平均値とそれら損傷の差に比例する値とを加算したものに等しいことを明らかにし、熱疲労における1サイクル中の温度変動は非対称波形高温低サイクル疲労におけるひずみ速度変動にもとづくものと同種の付加的損傷が発生すると述べている。

上記高温低サイクル疲労および熱疲労における付加的損傷が顕著に認められるようになるのは試験材料が主に粒界き裂によって破壊する場合であることを明らかにし、第5章では付加的損傷の発生原因を微視的観点から検討することを目的として SUS304鋼の試験片表面における粒界すべり挙動を真空中の疲労試験によって詳細に観測した結果について述べている。対称三角ひずみ波形下の高温低サイクル疲労においてはほとんど認められない粒界すべりの蓄積が、非対称ひずみ波形下の高温低サイクル疲労および熱疲労においては繰返し数の増加とともに顕著に認められるようになり、これが粒界三重点あるいは粒界上の棚の部分で過大なひずみ集中を生ずることによってボイド形成あるいはくさび形の粒界き裂の早期発生の原因となっていることを明らかにしている。

第6章では、熱疲労試験をその途中の数段階で中断して、試験片の縦切断面を顕微鏡で観察して得られた試料表面および内部の微細き裂の成長挙動について述べている。上限温度における高温低サイクル疲労に比して、熱疲労においてはより早期に多数の微細なき裂が発生し、それらが合体・成長することによってより速かに試験片を破断させる点を明らかにしている。

第7章では、疲労の後半期において特徴的である巨視き裂の伝ば挙動をより詳細に調べるために、切欠き試験片による単一き裂の伝ば試験を実施し、特に *in-phase* 熱疲労におけるき裂の伝ば速度は、主き裂の前方に発生する多数の粒界微細き裂によって加速されることを明らかにしている。このような熱疲労におけるき裂成長特性も第5章に示された粒界すべりの蓄積の容易さに起因している。

最後の結論は、この論文の総括である。

論文審査の結果の要旨

鋼の熱疲労は高温機器の破損または破壊をもたらす高温強度現象の中で最も重要であり、同時に最も複雑かつ多岐にわたる強度因子に支配される現象である。本論文は低炭素鋼 S15C およびステンレス鋼 SUS 304および347について、繰返しひずみなどの力学的条件と温度サイクルなどの熱的条件を独立

に設定かつ制御し、両条件を幾通りにも組合せて、広範囲の条件下での熱疲労試験を実施し、熱疲労強度を支配する主要因子を明らかにすることを目的とした実験的研究をとりまとめたもので、主な成果を要約すると次のとおりである。

1) いずれの材料についても、熱サイクルの上限温度がクリープが顕著になる温度領域に入ると、熱疲労の破損繰返し数はその温度サイクルの平均温度に等しい一定温度下の高温低サイクル疲労の破損繰返し数に比して最大 $1/10$ 程度に減少する。さらに安全側として上限温度に等しい一定温度高温低サイクル疲労と比較しても熱疲労の方が短寿命になる場合が多い。この傾向は昇温時に引張変形、降温時に圧縮変形をうける in-phase 熱疲労において特に顕著であることを明らかにしている。

2) 上記の事実は、一定温度・対称ひずみ波形下の高温低サイクル疲労では認められない余分の損傷が熱疲労の場合に付加されることを示しており、この熱疲労における付加的損傷は、高温における粒界すべりが温度およびひずみサイクルの繰返しとともに昇温時に変形する方向に蓄積し、それによって粒界三重点あるいは粒界上の棚に微細き裂あるいはボイドを容易に発生し、これら微細き裂の合体・成長を促進するために生ずることを実証している。

3) 非対称三角ひずみ波形下の高温低サイクル疲労試験によって、1 サイクル中の引張りひずみ速度が圧縮ひずみ速度より遅い slow-fast 波形の場合は、高温引張り—低温圧縮の in-phase 熱疲労にほぼ一致する強度を示し、粒界すべりの蓄積や粒界き裂の発生、成長挙動も両者が極めて類似している。また逆に fast-slow 波形の場合は高温圧縮—低温引張りの out-of-phase 熱疲労とよい対応を示している。

4) 上記のことより、鋼の熱疲労強度を支配する主要な因子は、一つに、温度サイクル条件そのものではなく、巨視力学的な塑性ひずみ範囲の大きさであること、他の一つに1サイクル中の温度変化にともなう結晶粒界すべりのような材料内局所の変形の蓄積に起因する損傷であることを明らかにした。これら両因子はともに一定温度下の対称および非対称三角ひずみ波形高温低サイクル疲労試験の結果によって評価できることを示し、熱疲労寿命を推定するための実験式を提案した。

以上要するに本論文は、高温疲労における温度効果とひずみ速度効果の間に相関関係のあることを明らかにし、比較的实验実施の容易な対称および非対称三角ひずみ波形の高温低サイクル疲労に関するデータに基づいて複雑かつ多種条件下の熱疲労寿命を推定することができることを明らかにしたものであって、学術上、また工業上寄与するところが大きい。

よって、本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。