

論文の内容の要旨

近年、高温機器に対しては経済性の追及やエネルギー問題から高温化、長寿命化の要求がある。それに応えるためには、高温機器の部材として使用される鉄鋼材料の高温高サイクル疲労における高寿命域での破壊について明らかにしておかなければならない。高サイクル疲労特性としてステップを有する2段のS-N曲線になる場合のあることが報告されているが、2段のS-N曲線となった高寿命域での破壊形態や破壊機構などには不明な点が多く残されている。そこで本研究では、高温環境下における2段S-N曲線の高寿命域での破壊形態を詳細に観察し、その破壊形態に及ぼす影響因子について調べ、破壊機構を明らかにした。

先ず、オーステナイトステンレス鋼の700°Cにおける高サイクル疲労特性としては、2段のS-N曲線になることは明らかにされていたが、高寿命域での破壊形態については明らかにされていなかった。そこで、ステンレス鋼SUS321-Bを供試材として観察を行い、2段S-N曲線の低応力高寿命域では、破面にフィッシュアイが観察される内部破壊になることを示した。内部破壊の場合、破面に形成されるフィッシュアイの大きさは起点位置の表面からの深さに依存し、表面直下に起点がある場合は小さなフィッシュアイを伴う破面となるが、いずれの場合もき裂発生の起点は、非金属介在物が集合した領域であった。

大きなフィッシュアイを伴う内部破壊では、フィッシュアイ周りの破面は強く酸化されずに破壊にいたるが、小さなフィッシュアイを伴う内部破壊では、フィッシュアイの周りに酸化度合いの強い半円状領域が形成された。またフィッシュアイが試験片表面に到達後、表面き裂として進展する前にフィッシュアイ面が酸化物で覆われ閉塞状態のき裂になるが、その近傍に新たなき裂が発生し進展することで破壊にいたる場合もあった。フィッシュアイが試験片表面に到達後、フィッシュアイ面が酸化物で覆われ閉塞状態のき裂になり、き裂の進展を停留させるという現象が初めて確認された。表面直下に形成されたフィッシュアイが試験片表面に到達後、表面き裂として進展するか、フィッシュアイ面が酸化物で覆われ閉塞状態のき裂になるかを支配する因子として、表面き裂になった時点におけるき裂の進展を支配するき裂先端の応力拡大係数と、進展を抑制する効果のあるき裂面における酸化物の形成が考えられた。このような結果は他のオーステナイトステンレス鋼においても同様に認められ、再現性のある現象であることが明らかになった。また、400°Cで2段のS-N曲線となる低合金鋼SCMV2-2NTに対しても同様な結果が得られた。さらに、同鋼で観察された同一破面に20数個のフィッシュアイが形成される破面についても、その多くのフィッシュアイは表面き裂になってもき裂面が酸化物で覆われ閉塞状態のき裂になったものであることを明らかにした。

高温疲労において内部で発生・成長したフィッシュアイが、試験片表面に到達して表面き裂となり、表面き裂として進展する過程でフィッシュアイ面の酸化によって閉塞状態のき裂になり、き裂進展を停留させる現象が起こることを初めて明らかにしたことは、鉄鋼材料の高温における疲労限の意味を考える上で貴重な知見を与えるもので、工学的意義は大きい。

論文審査の結果の要旨

本論文は、高温機器用鉄鋼材料の高温疲労において認められる 2 段 S-N 曲線の高寿命域での破壊形態に関する研究をまとめたもので、7 つの章で構成されている。強度を高めた鋼や表面のみに強化処理を施した鋼の常温における疲労特性としては、2 段の S-N 曲線になり、その高寿命域で認められる破壊形態は主に内部破壊で、き裂は鋼中内部に存在する非金属介在物などの欠陥を起点として発生し、起点を中心としてほぼ同心円状に進展する過程を経て部材表面に到達し、その後表面き裂となって進展して破壊に至る。その結果、破面にはフィッシュアイと呼ばれる独特な様相が観察される。

第 1 章「緒論」では、本研究の背景と目的を述べている。本研究の背景として、近年、高温機器に対しては経済性の追及やエネルギー問題から高温化、長寿命化の要求があること、それらの要求に応えるため、高温機器の部材として使用される鉄鋼材料の高温高サイクル疲労における高寿命域での破壊について明らかにする必要があることが記されている。さらに高温下における高サイクル疲労特性としては、ステップを有する 2 段の S-N 曲線となることが報告されているが、2 段の S-N 曲線となった高寿命域でフィッシュアイを伴う内部形態となるのか、なるとすればその要因や破壊機構など、不明な点が多く残されていることを指摘している。

このような背景から本研究の目的として、これまで具体的な観察例の報告が少ない高温環境下における 2 段 S-N 曲線の高寿命域での破壊形態を明らかにすることを挙げ、高強度化や表面強化処理が施されていない高温機器用鉄鋼材料を対象として、高温疲労における 2 段 S-N 曲線との関連のもと、高寿命域での破壊形態について詳細に観察し、その破壊形態に及ぼす影響因子について調べ、疲労破壊機構を明らかにすることを述べている。

第 2 章「オーステナイトステンレス鋼 SUS321-B の 2 段 S-N 曲線における疲労破壊形態」では、オーステナイトステンレス鋼の 700°C における高サイクル疲労特性としては、2 段の S-N 曲線になることは明らかにされていたが、2 段 S-N 曲線の高寿命域での破壊形態が内部破壊となるかどうかは具体的な事例をもっては報告されていなかったため、オーステナイトステンレス鋼 SUS321-B を供試材として 700°C において疲労試験を行い、2 段 S-N 曲線の高寿命域での破壊形態を調べた結果と考察が記されている。その中で、2 段 S-N 曲線の高応力低寿命域では試験片表面でき裂が発生し破壊にいたる表面破壊になるが、低応力高寿命域では破面にフィッシュアイを伴う内部破壊になることを示した。内部破壊の場合、破面に形成されるフィッシュアイの大きさは起点位置の表面からの深さに依存し、表面直下に起点がある場合は小さなフィッシュアイを伴う破面となるが、いずれの場合もき裂発生の起点は、非金属介在物が集合した領域であることを明らかにした。

第 3 章「オーステナイトステンレス鋼 SUS321-B の 700°C における疲労破壊形態に及ぼす酸化効果」では、前章の結果としてフィッシュアイが試験片表面に到達し表面き裂になってからの進展は、き裂面が酸化されることの影響を強く受けることが予想されたので、そのような観点からの観察・考察を進めている。大きなフィッシュアイを伴う内部破壊では、フィッ

フィッシュアイ周りの破面は強く酸化されずに破壊にいたるが、小さなフィッシュアイを伴う内部破壊では、フィッシュアイの周りに酸化度合いの強い半円状領域が形成されることや、新たな破壊形態のあることを明らかにしている。それは、フィッシュアイが試験片表面に到達後、表面き裂として進展する前にフィッシュアイ面が酸化物で覆われ閉塞状態のき裂になるが、その近傍に新たなき裂が発生し進展することで破壊にいたるものであった。フィッシュアイが試験片表面に到達後、フィッシュアイ面が酸化物で覆われ閉塞状態のき裂になることで、表面き裂としての進展が停留させられるという現象は初めて確認されたもので、工学的に重要な意味を持つものである。そして、表面直下に形成されたフィッシュアイが試験片表面に到達後、表面き裂として進展するか、フィッシュアイ面が酸化物で覆われ閉塞状態のき裂になるかを支配する因子として、表面き裂になった時点におけるき裂の進展を支配するき裂先端の応力拡大係数と、進展を抑制する効果のあるき裂面における酸化物の形成を挙げている。

第4章「オーステナイトステンレス鋼の高温高サイクル疲労における破壊形態」では、前章および前々章で得られたステンレス鋼 SUS321-B の 700°C における 2 段 S-N 曲線の高寿命域での疲労破壊形態に関する結果が、他のステンレス鋼においても認められる結果なのか確認するために、オーステナイトステンレス鋼 SUS304-HP を供試材として実験、観察を進め、同様な結果が得られたことで、これらが再現性のある結果であることを示している。

第5章「低合金鋼 SCM V2-2NT の 400°C における 2 段 S-N 曲線の高寿命域での疲労破壊形態」では、前章までに得られたオーステナイトステンレス鋼のフィッシュアイを伴う疲労破面に及ぼす酸化効果について、400°C で 2 段の S-N 曲線となる低合金鋼 SCM V2-2NT に対しても認められる現象なのか確認すべく観察を行い、同様な結果を得ている。また、同鋼で観察された同一破面に 20 数個のフィッシュアイが形成される破面についても、その多くのフィッシュアイは表面き裂になってもき裂面が酸化物で覆われ閉塞状態のき裂になったことによるものであることを明らかにしている。

第6章「本研究により得られた成果の工学的意義と課題」では、高温におけるフィッシュアイを伴う破壊形態においては、内部で発生・成長したフィッシュアイが試験片表面に到達して表面き裂となり、表面き裂として進展する過程において、フィッシュアイ面の酸化によって閉塞状態のき裂になり、き裂進展を停留させる現象が起こることを初めて明らかにしたことは、鉄鋼材料の高温における疲労限の意味を考える上で貴重な知見を与えるもので工学的意義は大きいとしている。また残された課題としては、表面き裂となったフィッシュアイが閉塞状態のき裂になるか否かの限界条件を明らかにすることを挙げている。

第7章「総括」では、本研究により得られた成果についてまとめている。

以上、本論文は高温機器用鉄鋼材料の高温疲労において認められる 2 段 S-N 曲線の高寿命域での破壊形態について、詳細な観察・分析を通して明らかにし、新たな知見を得るとともに破壊機構に対する見解を述べており、その内容には独創性、工学的有用性が認められる。

よって本論文は、博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。