

称号及び氏名 博士（工学） 辻 宣佳

学位授与の日付 平成 21 年 3 月 31 日

論文名 「Research on Fatigue and Wear Performance of Combined Surface Modified Titanium Alloy」  
(複合表面改質したチタン合金の疲労と摩耗特性に関する研究)

論文審査委員 主査 教授 高杉 隆幸

副査 教授 中平 敦

副査 教授 沼倉 宏

副査 准教授 辻川 正人

## 論文要旨

チタン合金は、高比強度と優れた耐食性を合わせ持つ上、熱処理により幅広い材料特性を付与できることから、航空宇宙分野での構造材料として使用されている。近年、環境負荷低減化、省エネルギー化、省資源化などの背景から、輸送機の軽量化による燃費改善志向や高寿命化に対する要求が高まり、チタン合金の構造部材としての適用がますます期待されている。しかし、チタン合金は、その特有の物性および表面特性から、摩擦係数が高く、耐摩耗性に劣るため、摺動部品としての適用は問題視されてきた。そこで、このような欠点を補うため、チタン合金を対象にした表面硬化法の研究が数多く行われている。このうち、比較的高温で行われる窒化や浸炭および酸化などによる熱拡散処理は、表面硬化層がチタン合金基材と一体化するため、その密着性に問題が無く、適用例も多い。しかしながら、このような熱拡散処理により、チタン合金表面に硬化層を形成させると、耐摩耗性は著しく改善される一方で、新たな問題として、表面層の脆弱化や圧縮残留応力の消失など、主に表面改質層の特性に起因する疲労強度の低下が生ずる。著者らは、以前の研究において、プラズマを利用した熱拡散処理を比較的低温で行うことにより、耐摩耗性を改善し、そして疲労強度の劣化を防止できることを報告しているが、疲労強度の向上までには至っていない。疲労特性は、材料の金属組織や環境因子などにも影響を受けるが、表面特性が及ぼす影響は非常に大きい。すなわち、摺動部品としてのチタン合金の利用拡大を図るためには、表面改質技術を高度化および複合化させ、耐摩耗性と疲労強度の両方に抵抗力のある表面層を形成させることが重要であると考え、プラズマを利用した低温拡散硬化処理により耐摩耗特性を付与した後、表面層を冷間加工することにより、疲労強度が改善できると着想するに至った。

本研究は、航空機用構造材料として使用される典型的な $\alpha + \beta$ 型合金であるTi-6Al-4V合金を取上げ、耐疲労特性と耐摩耗特性の両方の向上を目標に、プラズマを利用した熱拡散処理であるプラズマ浸炭と冷間圧延および機械的表面処理を複合的に適用し、その高寿命化・高性能化のための指標を示すために行ったものである。

本論文は全6章により構成されており、以下にその概要を示す。

第1章は序論であり、研究の背景、本研究の意義、目的および構成の概要について述べた。

第2章では、Ti-6Al-4V合金の焼鈍材で製作された薄板試験片をプラズマ浸炭し、その後に軽度のロール圧延を行い、表面硬化層にクラックを発生させることなくスキンプラス圧延できる条件を検討した。得られた条件において、複合表面改質処理を行った試験片の表面特性や金属組織を調査し、耐疲労特性、耐摩耗特性に及ぼす効果を調査検討した。その結果、圧延率が約0.6%の条件において、表面に有害な欠陥を発生させることなく、冷間圧延が可能になることを明らかにした。冷間圧延効果により、表面近傍に圧縮残留応力が付与され、疲労強度が向上すると同時に、複合改質の相乗効果により、表面硬さが大幅に上昇し、耐摩耗性が大幅に改善できることを明らかにした。

第3章では、プラズマ浸炭と機械的表面処理の一種であるディープ・ローリングとの複合改質処理について検討を行った。第1節では、Ti-6Al-4V合金の溶体化時効材で製作された砂時計型丸棒試験片に対して、低温プラズマ浸炭を行った後、ボールポイントツールによるディープ・ローリングを適用した。複合改質した試験片の表面性状、金属組織、圧縮残留応力、加工硬化および微小硬さの変化について検討を行い、疲労寿命と摩耗特性に及ぼす効果を調査した。その結果、最表面はディープ・ローリングにより平滑化され、最表面から約 $500\mu\text{m}$ の深さまで圧縮残留応力と高い転位密度の影響が及んでいること、それらの相乗効果により、疲労強度は大幅に向上し、耐摩耗性もなお一層向上することを明らかにした。疲労特性の調査において、ディープ・ローリングを行った試験片は、 $10^6$ サイクル以上の高寿命域とそれ未満の低寿命域では、破壊モードが異なり、高応力負荷側の低寿命域では表面破壊するのに対し、低応力負荷側の高寿命域では、表面改質効果により表面が強化されたため、亀裂の起点が内部に移行し、その疲労破壊表面はフィッシュアイ型の様相を呈した。この結果、疲労特性を示すS-N曲線は $10^5$ と $10^6$ サイクル域を境界として2段階になることを示した。第2節では、環状V型切欠きを有する溶体化時効材の丸棒試験片（応力集中係数 $K_t = 2.8$ ）に対して、低温プラズマ浸炭を行った後、V溝部にローラー型ツールによるディープ・ローリングを施した。複合表面改質したV溝部の表面特性および金属組織を調査し、本複合改質処理の切欠き疲労特性に及ぼす効果および疲労破壊のメカニズムについて調査検討した。V溝底の最表面はディープ・ローリングにより平滑化され、複合処理による相乗効果により硬さが増加することを明らかにした。表面から約 $350\mu\text{m}$ 深さの圧縮残留応力と加工硬化による影響層が、疲労亀裂発生と伝播を効果的に遅延させ、切欠き疲労強度を大幅に向上させることを解明した。

第4章では、溶体化時効材で製作された砂時計型丸棒試験片に対して、低温プラズマ浸炭と微粒子による高速ショット・ピーニングの複合処理を適用した。最表面はショット・ピーニングにより無数のディンプルが形成され表面粗さは増加したが、ディンプルの大きさと深さは微小であった。圧縮残留応力と加工硬化の深さ方向への分布は、最表面近傍において非常に高い値を示したが、深さ方向に急に低下し、その影響深さは約 $100\mu\text{m}$ であった。しかしながら、最表面近傍の高い圧縮残留応力と

高い転位密度の付与効果により、疲労強度は大幅に向上した。疲労特性の調査において、ショット・ピーニングを行った試験片も、ディープ・ローリングを行った試験片と同じ挙動を示し、S-N曲線が2段階になることを明らかにした。複合改質した試験片の耐摩耗性は、表面粗さの増加にもかかわらず、表面層硬さの効果的な増加により向上した。

第5章では、複合表面改質処理を航空機構造体の締結に使用されるTi-6Al-4V合金製ボルトに適用し、その製造プロセスを確立すると共に、その機械的性質に及ぼす表面改質の効果を調べた。その結果、改質ボルトは現行のボルトより、疲労強度が高く、良好な締結性能が実現できることを明らかにした。

第6章では、総括および結論として各章の結果を要約して示した。

本研究により、チタン合金の疲労強度と耐摩耗性の双方を向上できることを示すことができたとともに、実用化に向けて、本複合表面改質を行うための各種技術的な情報も提示できた。従って、本研究はチタン合金の高機能化のための複合表面改質プロセスの確立、ひいては同材料の用途拡大および航空宇宙産業の発展に寄与するものであると考える。

## 審査結果の要旨

本論文は、航空機用構造材料として使用されている典型的な $\alpha + \beta$ 型合金であるTi-6Al-4V合金を取上げ、耐疲労特性と耐摩耗特性の両方の向上を目標に、プラズマ浸炭と冷間圧延および機械的表面処理を複合的に適用し、その高寿命化・高性能化のための指針を得るために研究したものであり、以下の成果を得た。

- (1) Ti-6Al-4V合金焼鈍材をプラズマ浸炭し、その後に軽度のロール圧延を行った試験片の表面特性や金属組織を調査し、耐疲労特性、耐摩耗特性に及ぼす効果を調査検討した。その結果、圧延率が約0.6%の条件において、表面に有害な欠陥を発生させることなく、冷間圧延が可能なることを明らかにした。冷間圧延効果により、表面近傍に圧縮残留応力が付与されるために、疲労強度が向上すると同時に、表面硬さが大幅に上昇し、耐摩耗特性が著しく改善できることを明らかにした。
  - (2) 丸棒形状と環状V型切欠きを有するTi-6Al-4V合金溶体化時効材の試験片を用いて、プラズマ浸炭とディープ・ローリングとの複合改質処理について検討を行った。丸棒平滑最表面あるいはV溝底最表面はディープ・ローリングにより平滑化され、最表面から一定深さまで達する圧縮残留応力と加工硬化の影響層により、疲労亀裂発生と伝播が効果的に遅延でき、疲労強度は大幅に向上し、耐摩耗性も向上することを明らかにした。
  - (3) 丸棒形状からなるTi-6Al-4V合金溶体化時効材の試験片を用いて、プラズマ浸炭とショット・ピーニングの複合処理を適用した。最表面近傍の高い圧縮残留応力と加工硬化の付与効果により、疲労強度は大幅に向上した。
  - (4) 複合表面処理を航空機構造体の締結に使用されるTi-6Al-4V合金製ボルトに適用し、その製造プロセスを確立すると共に、機械的性質に及ぼす表面改質の効果を調べた。その結果、改質ボルトは現行のボルトより、疲労強度が高く、良好な締結性能が実現できることを明らかにした。
- 以上の研究成果は、当該軽量高強度チタン合金の耐摩耗と耐疲労強度の向上に新規な表面改質技術を与えるとともに、航空機用締結部品への使用拡大の道を拓き、航空機製造産業に貢献すること大である。また、申請者が自立して研究活動を行うに必要な能力と学識とを有することを証したものである。