

MIM 製 Ti-6Al-4V 合金の疲労強度の向上

工藤, 健太郎

<https://hdl.handle.net/2324/1959125>

出版情報 : Kyushu University, 2018, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 工藤 健太郎

論 文 名 : MIM 製 Ti-6Al-4V 合金の疲労強度の向上

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

Ti-6Al-4V 合金 (Ti : Titanium, Al : Aluminum, V : Vanadium) は軽量高強度, 高耐食性, 生体適合性等の面で優れた物理的特性を有しており, 航空宇宙産業や化学プラント, 生体用材料として利用されている. しかしながら, 材料自体の価格に加え, 機械加工コストが高いという欠点を有している. そのため, 複雑形状を有する金属部品の大量生産に適した加工法である金属粉末射出成形法 (MIM: Metal Injection Molding) の適用が期待されている. しかしながら, MIM によって作製した Ti-6Al-4V 合金は引張強度および伸びといった静的強度特性は鍛造材同等であるものの, 疲労強度が鍛造材の半分程度と著しく低いことが知られており, MIM 製 Ti-6Al-4V 合金の構造用部品への適用には疲労強度の改善が必要である. 従来, 焼結 Ti-6Al-4V 合金の疲労強度の改善には溶体化時効処理による組織微細化および HIP (Hot Isostatic Pressing) 処理等の緻密化処理による気孔除去が行われてきた. しかしながら, ネットシェイプ加工を前提とした MIM 製品に対して, 水冷を必要とする溶体化時効処理の適用は表面酸化の問題があり容易ではない. 加えて, HIP 処理はコスト高となることから, 気孔の残存した焼結材の状態を高疲労強度を得られることが理想的である. そこで, 本研究においては MIM 製 Ti-6Al-4V 合金に適した疲労強度向上技術の確立を目的として, 粉末冶金プロセスにおける組織微細化手法について検討を実施した. 具体的には, 通常粉末よりも微細な粉末の利用による結晶粒および気孔の微細化, β 安定化元素とピン止め粒子形成元素の複合添加による旧 β 粒および $\alpha + \beta$ ラメラ組織の微細化, 残存 α 相のピン止め効果を利用しての旧 β 粒成長抑制を目的とした $\alpha + \beta$ 二相域の焼結による組織微細化, 水素化脱水素処理による Ti-H (H : Hydrogen) 系の共析変態を利用した組織微細化について検討を行った. また, 従来研究では, 気孔が無く, 微細組織であれば疲労強度に優れることは明らかであるものの, 気孔の量および径の許容範囲や影響の度合, どの程度の結晶粒微細化が必要であるのかといった点において, 定量的な評価はされておらず, 気孔を有している焼結体に対する微細構造の設計指針は明確には示されていない. そこで本研究においては, 気孔や組織といった焼結体の微細構造が疲労強度に与える影響度を定量的に明らかにし, 焼結体の微細構造設計指針を与えることを併せて目的とした.

第 1 章においては金属 Ti の特性に始まり, Ti-6Al-4V 合金を MIM に適用するメリット, MIM 製 Ti-6Al-4V 合金の研究動向および疲労強度の支配因子, そして本研究の目的について論じた. 続く第 2 章では MIM 製 Ti-6Al-4V 合金焼結体の作製方法および評価方法について述べた.

第 3 章においては, これまで MIM に利用されていた粉末よりも粒径の小さい Ti-6Al-4V 合金粉末を使用して, 焼結体を作製し, 評価を行った. 微細粉末を使用すると, 通常粒径の粉末よりも, 低温・短時間の焼結で十分な相対密度が得られ, 気孔径および結晶粒径の微細な焼結体を作製出来ることを示した. 1373 K 焼結体は, その相対密度が 95.7 % と比較的低いものの, その疲労強度は 375 MPa と通常粉末製焼結体の 291 MPa よりも高い疲労強度を示すことを明らかにした.

第4章では β 安定化元素であるMoとピン止め粒子(TiB)を形成する元素であるBを添加して焼結体を作製した。4 mass%のMoと0.4 mass%のBを添加することで、焼結時の旧 β 粒の成長は抑制され、非常に高い相対密度を示す焼結体を作製できた。また、旧 β 粒およびラメラ組織の双方が微細化し、平均結晶粒径は20 μm 以下を示した。そのため、優れた引張強度特性と疲労強度が得られ、4Mo-0.4B-8h材で425 MPa、4Mo-0.4B-HIP材で470 MPaの疲労強度を達成した。

第5章においては $\alpha+\beta$ 二相域にて焼結を施して焼結体を作製した。 $\alpha+\beta$ 域にて焼結を施すことにより、残存した等軸状の α 相のピン止め効果によって焼結時の旧 β 粒成長は抑制され、等軸状の組織を示す焼結体を作製できることが明らかとなった。ただし、焼結温度が低いために、86.4 ks以上の長時間焼結が必要ではあったものの、相対密度は95%を超え、カプセル無しでHIP処理可能な密度へと到達した。1253 K-48hは480 MPaの疲労強度を示し、焼結材としては非常に高い疲労強度を示した。また、1253 K-24h-HIPは引張強度964 MPa、伸び18.1%と、 β 単相域焼結体と比較して、優れた強度・延性バランスを示した。更に、疲労強度は530 MPaを示し、溶製材規格値を超える疲労強度を示した。

第6章では、水素化脱水素処理をMIM製Ti-6Al-4V合金に対して施し、組織微細化および高強度化を図った。水素化脱水素処理を施すことで、粗大な旧 β 粒と、粒内にごく微細な等軸組織を有する焼結体を作製することができた。水素化脱水素処理材は引張強度1030 MPaと優れている一方、伸びは6%と低い水準に留まった。この原因は旧 β 粒界からの延性破壊であり、塑性変形が粒界近傍に集中し、破断に至っていることが明らかとなった。疲労強度は水素化脱水素処理によって改善し、焼結体で470 MPa、HIP材に至っては635 MPaと非常に優れた疲労強度を示した。

第7章では第3章から第6章にて得られた結果をもとに、MIM製Ti-6Al-4V合金の高サイクル疲労強度に与える気孔および結晶粒の影響について定量的な検討を加えた。結晶粒径と疲労強度の関係を整理したところ、HIP処理を施した材料についてはホールペッチ則と類似した関係が見られた。その一方、気孔の残存している焼結材に関しては、ある一定以上、結晶粒が細くなると疲労強度が低下する傾向が見られた。この、疲労強度の低下が見られた材料では、同時に大気孔を起点としてき裂が発生していることが確認され、気孔の影響が大きくなっていると推察された。そこで、「最大気孔径/結晶粒径の比」と「疲労強度比」によって整理を行ったところ、本研究で作製した焼結体において、一律で「最大気孔径/結晶粒径の比」が2を超えると疲労強度が低下することが明らかとなった。また、疲労破壊がファセット面から発生していた焼結体に関して、疲労強度比と相対密度で整理を行ったところ、ほぼ線形近似できることが明らかとなり、疲労強度についてはMIM材のような高密度かつ気孔が微細な材料においても依然として気孔の量(相対密度)が疲労強度に影響しており、相対密度1%当たり3.5%の疲労強度低下をもたらすことが明確になった。

第8章では以上の結果を要約した。

本論文における一連の研究成果は、粉末特性、合金組成、焼結プロセス、熱処理プロセスといった粉末冶金プロセスにおける多面的な手法にて、MIM製Ti-6Al-4V合金の疲労強度を改善する具体的な施策を提案し、実証した。更に、焼結体の疲労強度の支配因子を明らかにしていることから、高疲労強度焼結体の微細構造の設計指針として工業的にも大いに有用性があり、MIM製Ti-6Al-4V合金の構造用部品への適用を促すための技術的・学術的支援となるものである。