

電熱スラスタ用3D造形タングステン合金ヒータの材料特性評価

Material Characterization of 3D-Printed Tungsten Alloy Heaters for Electrothermal Thrusters

○岡田 健太郎・Hillstrom, Alexander (名大・院), 杵淵 紀世志 (名大)

中田 大将 (室蘭工大)

蘇亜拉図・酒井 仁史 (NTTデータ ザムテクノロジーズ)

○Kentaro Okada, Hillstrom, Alexander, Kiyoshi Kinefuchi (Nagoya University)

Daisuke Nakata (Muroran Institute of Technology)

Suyalatu, Hitoshi Sakai (NTT Data XAM Technologies)

Abstract

Experiments were conducted using a resistojet with an additive manufactured multilayer wall heater. Since the pure tungsten heater is fragile to mechanical shock, the heater was made of pure tantalum and tantalum/tungsten alloy instead. The thruster performance of the three heaters was compared and it was found that the heater material did not affect the performance. However, degradation and damage were found on the tantalum and tantalum/tungsten alloy heaters after the test, hence, elemental analysis of the heater surface was performed to determine the cause. It was found that nitriding and oxidation had a significant effect on tantalum and tantalum alloy, while almost no damage was observed on the pure tungsten heater. It became clear that heater material selection must take into account not only structural resistance, but also considerations such as oxidation and nitriding, as well as the test environment.

1. はじめに

電気推進の中で電熱加速型の一つであるレジストジェットは、ヒータで推進剤を加熱しノズルから噴出することで推力を得るという特徴を持つ。原理上、軽量で低コスト、また多くの推進剤が利用可能である。ただし、他の電気推進では比推力が1000秒以上、寿命が数千時間であるのに対し、実用化されているレジストジェットの代表例であるMR502は、比推力が200秒程度、寿命が400時間程度である。そこで我々は長寿命化を目指し、MR502等で用いられている脆弱な細線ヒータを、図1のような金属3Dプリンタで作成した多層壁ヒータに置換することでロバスト化を目指している。多層壁は電流によりジュール加熱され、外周から導入された推進剤は多層壁間を流動することにより加熱され、最終的にノズルより噴射することで水旅行を得る。多層化により中心部程高温となり、本

質的に高い断熱特性を有している。一方、これまで多層壁ヒータで使用していた純タングステン(以下、純W)では、打上げ時にかかる衝撃に対し脆弱であることがわかっている。そこで材料を純タンタル(以下、純Ta)やタンタルタングステン合金(以下、TaW合金)に変更し、衝撃への耐性を確認した。そこで本研究ではこれまで用いてきた純Wに対し、純TaやTaW合金のヒータの推進及び材料特性等を調査した。

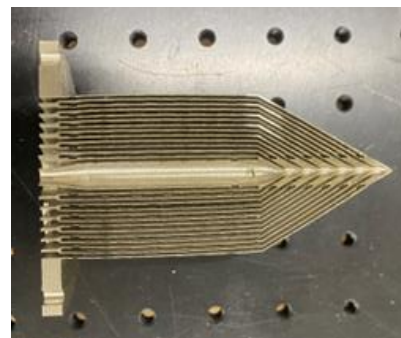


図1 多層壁ヒータ(旧設計, インコネル718)

2. 実験装置

図2に今回製作した純TaヒータとTaW合金ヒータを示す。本ヒータはeos社のレーザ3次元積層造形機を用い製作した。12層の同心円状の薄肉壁により構成されている。実験ではノズルスロット部から直径1mmのK型シーース熱電対を挿入し、最内層の温度を直接計測した。噴射試験では窒素ガスを用い、一部の試験ではアルゴンも使用した。マスフローコントローラにより流量 10SLM 一定とした。ヒータ電流は 50,100,110,120Aとした。また、今回のスラストは一切断熱せずに実験を行った。

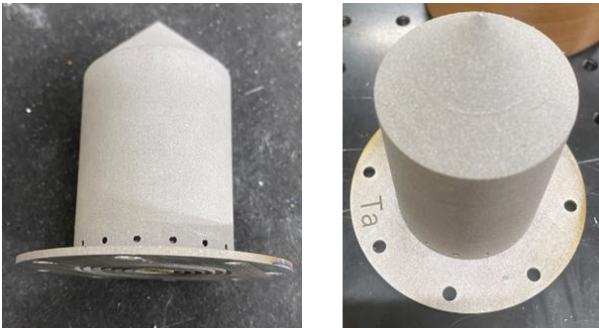


図2 多層壁ヒータ
(左:TaW合金、右:純Ta)

3. 実験結果

3.1 推進性能

図3にヒータ材質ごとの噴射温度(プレナム温度 T_p)に対する比推力を示す。ヒータ材質が推力性能に影響を及ぼすことはないことが分かる。すなわち、今回使用したヒータ材質においては、熱伝導率等の物性の違いによる熱効率への影響は小さいと言える。また実験結果は理論通り $I_{sp} \propto \sqrt{T_p}$ の傾向を示している。先行研究では純Wヒータを使用した際、プレナム温度は2000K強で $I_{sp}=154s$ [1]であった。今回とのスラストスタンドやスラストの設計の差異が熱損失に影響したものと考えられる。

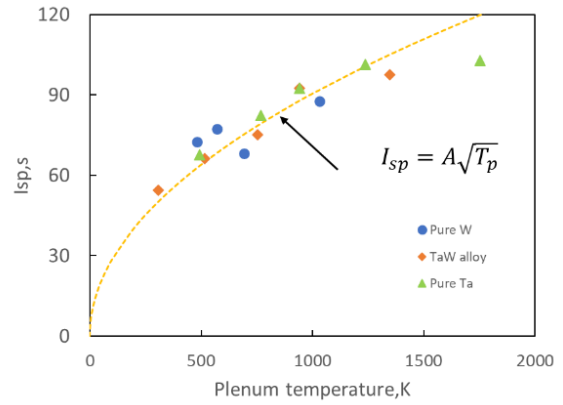


図3 比推力結果(推進剤:窒素ガス)

3.2 ヒータ電気抵抗の変化

ヒータの各層の電気抵抗の一例として純Taの計測結果を図4に示す。図4より作動を重ねるたびにヒータの電気抵抗値が全体的に上昇していること、内層の高温になる部分ほど大きく電気抵抗値が上昇していることが分かる。このような電気抵抗の変化は純Wヒータの時には見られなかったが、TaW合金では同様に作動ごとに抵抗が上昇した。なお、図4において最内層(横軸7)は、強度に配慮し厚肉としており、電気抵抗が6より小さくなっている。

また、Taを含むヒータは複数回作動を行った後、状態を観察すると最内層が図2のような色とは異なり、黒く脆化し破損が生じた。そこで、破損が生じた原因を元素分析によって調査することとした。

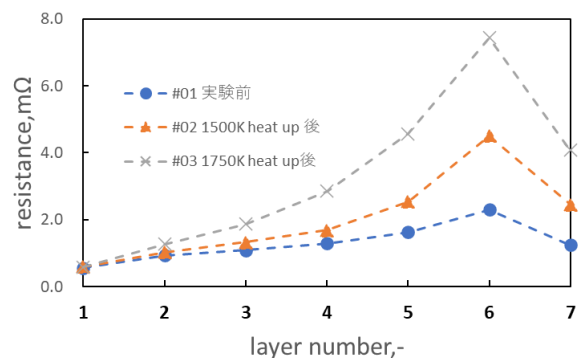


図4 純Taヒータの各層の電気抵抗値の変化
左:外層側、右:内層側

3.3 元素分析結果

ヒータが変色し破損が生じたことから破損の原因を酸化や窒化が原因と推測し、酸素と窒素に着目して元素分析を行った。元素分析には酸素窒素分析装置を用いた。これは、高温で試料を融解させ、発生したCO、CO₂、N₂を検出することで酸素と窒素を定量する装置である。元素分析の結果を表1に示す。

表1 元素分析結果

種類(ヒータ材質/状態)	使用ガス	酸素[ppm]	窒素[ppm]	原因
TaW合金/使用前	N ₂	484.0	17.95	
TaW合金/使用后	N ₂	2221	17479	窒化
TaW合金/使用后	Ar	12365	3985	酸化
純Ta/使用后	N ₂	6157	25383	窒化

使用前と、推進剤窒素にて作動後とを比較すると、大幅に窒素の検出量が増加していることが分かる。したがって、推進剤の窒化ガスによって高温化で窒化が進み破損が生じた可能性が高い。また、窒素で作動させたものとアルゴンで作動させたものを確認するとアルゴンで作動させたものでは、酸素の検出量が大幅に増加していることが分かる。これまで純Wヒータ使用時にはこのような酸化、窒化による劣化や電気抵抗の変化は観察されなかったため、ヒータの急冷による変形を抑止するために、ヒータ電源とともに推進剤も停止する運用としていた。同様の運用をTaを含むヒータでも行ったため、推進剤停止と共に背景空気がヒータ内へ流入し、酸化を引き起こした可能性が考えられる。

また、純Wヒータを確認すると図5のように着色が確認された。色性から、酸化の度合いによってそれぞれの層の色が変化したと考えられる [2]。しかし、Wでは電気抵抗の変化はなく、一方前述の通りTa及びTaW合金では電気抵抗の上昇が認められた。Ta及びTaW合金では酸化・窒化によりヒータ肉厚の減肉が生じた可能性が考えられる。減肉により電流が流れる断面積が減少し、電気抵抗が上昇した可能性がある。一方、WはTaと比べ、高温時の酸化は生じるものの、減肉は生じず、電気抵抗の変化が無く、ロバ

ストと言える。

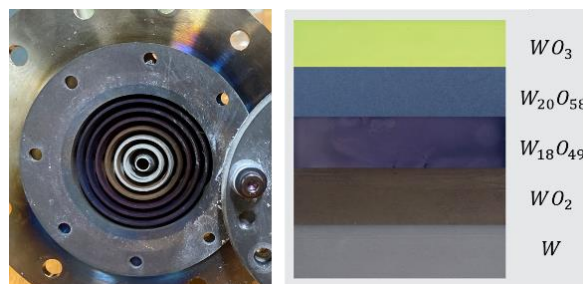


図5 純Wヒータ底面と参加による色性の変化

まとめ

本研究では、金属積層造形による多層壁ヒータを備えた電熱スラスタについて、純W、純Ta、及びTaW合金の3種のヒータについて推進性能と材料特性を比較し、以下の結論を得た。

3種のヒータの推進性能を比較した結果、ヒータの材質は性能にはほぼ影響しないことがわかった。一方、試験後のTa、TaW合金では電気抵抗の変化と脆化による損傷が認められた。ヒータ表面の元素分析を行った結果、窒化と酸化がTa、TaW合金では電気抵抗や材料強度に影響を及ぼしたのに対し、純Wでは式性の変化は観察されたものの電気抵抗や脆化は見られなかった。

ヒータ材料の選定には、構造的な耐性だけでなく、酸化や窒化、さらに試験環境も考慮しなければならないことが示され、今後の設計に反映すべき知見が得られた。

謝辞

本研究はJAXA/ISAS工学委員会戦略的開発研究の支援を受けて実施された。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] K. Kinefuchi, D. Nakata, G. Coral, Suyalatu, H. Sakai, R. Tsukizaki, K. Nishiyama, “Additive-manufactured single-piece thin multi-layer tungsten heater for an electrothermal thruster,” Cite as: Rev. Sci. Instrum. 92, 114501, 2021.
- [2] M. Weil, W.-D. Schubert, “The Beautiful Colours of Tungsten Oxide,” *ITIA Newsletter*, 2013.