粉末混入加工液中の放電を利用した潤滑面形成法

Fabrication of Lubricant Layer by Electrical Discharge Machining with Powder Suspended in Working Fluid

03107

研究代表者 豊田工業大学工学部 助教授 古 谷 克 司 Katsushi Furutani

Solid lubricants, such as molybdenum disulfide (MoS_2), gold, silver or polytetrafluoroethylene (PTFE) are often used on the sliding parts exposed in the space environment. When MoS_2 powder is mixed in the working oil, MoS_2 layer can be deposited on stainless steel during the finishing electrical discharge machining (EDM) process. The deposition process must be clear to improve the endurance of the lubricant layer. When the electric field was applied between the electrodes, MoS_2 powder reciprocated. Eventually, the powder was concentrated on the positive electrode side. Therefore, the positive polarity is preferable for the tool electrode. Then, the influence of the working oil flow was investigated by rotating a copper disk electrode. MoS_2 was observed on steel under all conditions. The reciprocating friction test in air was carried out to investigate the influence of machining time and measured point of the deposited layer. The lubrication duration was decreased with an increase of the rotation speed of the electrode. Because the lubrication duration was saturated over 30 min, the deposited MoS_2 was removed during deposition in the case of machining for a long time. The influence of the thermal properties of the specimen was also investigated. MoS_2 could be deposited on the metals with lower melting point than MoS_2 .

研究目的

近年、宇宙環境において使用可能な自律機械への要求が高まりつつある。たとえば、1998年から建設が始まった国際宇宙ステーションにおいて、日本は暴露実験モジュール (JEM) を備えており、そこでさまざまな実験が計画されている。実験対象を操作するためには、宇宙環境内で動作可能なマニピュレータが必要となる。それを実現するために解決すべき問題の一つが、関節部などのしゅう動部の潤滑である。宇宙環境に暴露される機器のしゅう動部では、蒸発損失や宇宙放射線による劣化が問題となるため固体潤滑剤が用いられることも多い。たとえば、二硫化モリブデン (MoS_2)、金、銀、鉛などの軟質金属や PTFE など

ある。通常環境下では、潤滑油やグリースに混合する、複合材とする、被膜を形成するという方法がとられる。宇宙環境への暴露試験のためには MoS_2 スパッタ膜を形成し用いた例がある。スパッタリングでは、被処理材全体が加熱されるため、熱ひずみが発生したり、寸法が制限される場合がある。

一方、研究代表者らはこれまでに形彫放電加工によって電極材料を被加工物表面に移行堆積して母材とは異なる機能層をその表面上に形成する方法について研究を行ってきた。粉末混入放電加工液を用いた放電加工法では、圧粉体電極を用いずにタングステンカーバイドなどの堆積加工することに成功した。また、それまでは硬質膜の形成のみを対象としていたが、固体潤滑剤である二硫化モリブデンを放電加工液に混入する

ことにより、潤滑層を形成するとともに表面粗さの改善が同時に可能であることを見出した。しかし、最適加工条件が十分に明らかになっておらず、一般に用いられるスパッタリングや焼成法との性能比較をする必要がある。

そこで本研究は、二硫化モリブデン粉末を混入した放電加工法で、要求される形状に強固で均質な潤滑性機能表層を付与することを目的とした。

提案する液中放電表面処理法では、材料表面が局部的に高温になるが全体の温度は上昇しないため、他のPVDやCVDなどの処理法におけるように熱変形を生じない。そのため、高精度が要求される金属による構造体へのセラミックス被覆など新しい表面処理技術として期待が高だけでなく、処理部位を限定できるため複雑な形状に対する処理も可能となる。

研究成果の概要

1. 極間の粉末挙動の観察

極間の加工くずの挙動が放電加工特性に大きな影響を与えることが報告されている。そのため、ビデオマ

図1 二硫化モリブデン粉末挙動の観察

図2 油膜を利用した粉末挙動の観察

イクロスコプを用いて平行電極間における MoS_2 粉末の挙動を観察した。

図1に示すように、長さ30mm、厚さ5mmの2枚の銅電極を、エポキシ系接着剤でシャーレの底に平行に固定した。極間距離は1mmとした。粒径 $100\mu\text{m}$ 以下の MoS_2 粉末を混入した加工液 EDF-K（新日本石油製）をシャーレに注ぎ、300Vの直流電圧を極間に印加した。 MoS_2 粒子は極間で往復運動をしながら徐々に陽極に集まる傾向が見られた。しかし、重力の影響により2分程度でほとんどの粉末がシャーレの底に沈降した。

そこで、図2に示すように、長さ5mm、厚さ0.5mmの銅電極の間に表面張力で加工液の膜を張り、その中に MoS_2 の粉末を入れて挙動を観察した。極間距離は1mm、極間電圧は300Vとした。この場合も陽極に MoS_2 が集まった。また、凝集した粉末が陰極側へ伸びる柱状化現象も観察された。

以上のことより、工作物表面の MoS_2 濃度を増加させるためには、工作物の極性を正にすればよいと言える。

2. 各種金属に対する MoS_2 粉末混入放電加工

MoS_2 潤滑層を形成するのに支配的な物性値を検討するため、各種金属へ潤滑層形成を試みた。

放電加工機には形彫放電加工機を用いた。粉末を混入した加工槽の加工液 EDF-K はポンプを用いて $3.17 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ で循環させた。加工槽の寸法は $150 \times 150 \times 300 \text{mm}$ で $6 \times 10^{-3} \text{m}^3$ の加工液で満たした。加工条件は表1とした。

通常の放電（除去）加工で影響を与えるとされる融点と熱伝導率で形成の可否を整理した結果を図3に示す。 μ は融点と熱伝導率の積で、この値が大きいほど

表1 MoS₂ 粉末混入放電加工条件

Electrode polarity	Negative
Electrode	Cu ϕ 16 mm
Discharge current	2 A
Pulse duration	2 μ s
Pulse interval	8 μ s
Open gap voltage	320 V
Jump height	0.8 mm
Jump time	1 s

図3 熱的物性値が堆積特性に与える影響

加工されにくい傾向がある。X線回折でMoS₂が検出されたものを●、検出されなかったものを×で示す。WC-Co焼結体ではMoS₂が検出された。しかし、焼結体であるため、WCとCoのどちらかもしくは両方が堆積に寄与するのかが明確でない。そのため、WCとCoの個々の物性値を▲で示した。MoS₂は熱伝導率が小さいため、横軸上になる。融点がMoS₂より高いか、ほぼ同じ物質ではMoS₂は観察されなかった。これは、被加工物の表面が放電による熱で熔融したときに、その熱でMoS₂が分解・消失してしまったためであると考えられる。融点の低い被加工物では、それが熔融したときにMoS₂が入り込み、付着したと考えられる。また、形成される潤滑層は数 μ m程度と非常に薄いため、熱伝導率の影響を大きく受けなかったと考えられる。潤滑限界回数は、加工時間が30分を超えると飽和した。

3. 付着プロセスの推定

以上の結果から考えられる付着プロセスを図4に示

図4 付着プロセス

す。放電加工を安定化するために、電極はサーボ動作により上下動するほか、ジャンプ動作も加えた。

まず(1)で電極が被加工物に近づいた状態で放電が起きると泡が発生し、(2)のように成長する。放電の継続中は極間が狭く、泡は排出されることはない。ノズルにより供給される加工液は極間に十分供給されることはないため、電極周縁部の方がMoS₂の濃度が高くなり、付着量が多くなる。(3)のジャンプ動作時には極間が広がるため、周囲から加工液が流入するとともにノズルからも供給される。この流れにより、上流側および中心部分の粉末濃度が増加するとともに、泡は下流へ流される。再び(4)で極間が狭くなるとときに加工液は排出される。一般に同じ物質では、液体の状態より気体の状態の方が熱伝導率が低いため、残った泡の近傍で放電が発生した場合には、加工液による冷却効果が期待できなくなる。そのため放電点近傍の温度が高くなり、MoS₂は消失・分解しやすくなる。これが繰り返されることにより、中央部と上流側の方がMoS₂の付着が進むと考えられる。

このように、粉末濃度の場所による不均一と、泡による冷却効果の低下がばらつきの原因になっている可能性がある。

4. 回転電極の適用

4.1 実験方法

丸棒状の銅電極を用いて行なうMoS₂粉末混入放電加工により形成した潤滑層は、加工面の場所により潤滑性能が異なることが明らかになっている。これは、極間全面において粉末濃度が異なるためであると考えられる。また、粉末濃度が高いと考えられる吐出口側

図5 回転電極を用いた実験装置

では、 MoS_2 の付着が多く確認され潤滑性能も他の箇所と比べ良好であった。回転電極を用いると、加工液が極間にかきこまれ MoS_2 粒子が極間に入りやすくなると考えられる。

回転電極の軸はボールベアリングで固定することで、振れを 900min^{-1} で $8.5\mu\text{m}$ 以下に抑えた。電極は $\phi 250\text{mm} \times 12\text{mm}$ の銅円板を使用した。この電極をDCモータで回転させ、回転数はタコジェネレータにより読み取った。実験装置の構成図を図5に示す。試料は $30 \times 30 \times 5\text{mm}$ のSUS304で、表面を最大高さ粗さ $0.3\mu\text{mRz}$ となるように研磨した。

摩擦試験のために自作した往復摩擦試験機では、テーブルに固定した試料をクランク機構により往復運動させ、処理面と銅球（SUS2）をしょう動させた。そのとき銅球に働く摩擦力をそれを保持するはりのたわみから検出して摩擦力を測定した。押し付け力は銅球を支持するピストンにおもりを取り付けることで変更できる。摩擦試験の条件を表2に示す。

4.2 実験

表1の加工条件で粉末混入放電加工を行なった。電極の回転数は0, 100, 200, 400, 900min^{-1} として加

表2 大気中における摩擦試験条件

Cycle time of reciprocating motion	1 s
Stroke	6.5mm
Ambient temperature	18-28°C
Humidity	13-16%
Ball diameter	7.9mm
Vertical load	0.22N

工を行なった。摩擦試験をするため広い加工面が必要となる。そこで、最初z方向に加工した後、z方向にサーボをかけながら電極をx方向に15mm加工した。各回転数の放電加工の時間が約1時間になるように設定した。放電加工を行なった試料は、アセトンで浸し超音波洗浄を10分間行ない、その後エタノールで拭いた。

図6に加工面の写真を示す。同図(a)の加工面の丸で囲まれた箇所には放電集中が見られた。同図(c)の加工面ではx方向に最大でうねり平均深さは $0.5\mu\text{m}$ 、間隔は5mmであった。回転数と表面粗さの関係を図7に示す。加工面の粗さは加工面の中央部5か所の調査を行なった。回転数による表面粗さの関係において大きな変化は見られなかった。加工面のX線回折解析を行なった。電極の回転数を 200min^{-1} とした場合の例を図8に示す。この結果より、加工面に MoS_2 が付着していた。また、電極材料であるCuのピークは検出されなかった。

次に各試料の加工面の中央部に対して摩擦試験を3か所ずつ行なった。摩擦係数が0.3を超えると急激に摩擦係数が増加するので、このときの往復回数を潤滑限界回数と定義した。各回転数と潤滑回数の例を図9に、電極の回転数と潤滑限界回数の関係を図10に示す。これより、潤滑限界回数は回転数を増加させると減少する傾向があることが分かった。回転しない場合には、絶縁が回復するまでに放電が発生する異常放電

図6 加工結果の例

図7 表面粗さと回転数の関係

図9 摩擦試験における摩擦係数の変化

図8 加工面のX線回折

図10 潤滑限界回数と回転数の関係

が観察された。回転数が 900min^{-1} の場合には、異常放電は観察されなかったが、心ぶれにより電極が被加工物に接触して短絡する状態が観察されることがあった。回転させない電極と被加工物の距離は実測で心ぶれ量より大きい $50\mu\text{m}$ 程度であるが、回転電極を取り付けた放電加工機主軸上下動の周波数が低いため、いったん短絡すると表面が削り取られ、潤滑層が形成されにくかったと考えられる。しかし、回転させない場合には異常放電が発生し、これは表面粗さを低下させる原因になるため、避ける必要がある。

5. まとめ

MoS_2 粉末混入放電加工による潤滑層形成プロセスを解明するために加工現象を観察した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) MoS_2 粉末は、電界を印加すると電極間で往復運動した後、陽極に集まった。また、電極間で柱状になる現象も観察された。
- (2) 堆積可能な材料の物性値を比較した結果、融点が MoS_2 より低い材料には堆積可能であることが明らかになった。

- (3) 回転電極の回転数を増加させると、潤滑限界回数は減少した。しかし、放電集中を避けるためには電極を回転させた方がよかった。

今後の研究の見通し

上記の結果より、加工液の流れが少ないほうが粉末濃度が高くなり、その結果潤滑特性が向上すると考えられる。したがって、そのため、回転電極以外の細線電極による加工を試みる必要がある。堆積特性の改善のためには、被処理材表面の前処理や堆積を促進するような物質を加工液に添加することも有効であると考えられる。また、他の粉末を用いて堆積実験を行うことにより、粉末や被処理材の物性値が体積特性に与える影響が明らかになると考えられる。

今回は大気中のみの摩擦試験を行ったが、今後は真空中でも摩擦試験を行い、潤滑特性を明らかにする予定である。

論文・学会発表

- 1) Katsushi Furutani: "Electrical conditions of electrical discharge machining with powder suspended in working oil for titanium carbide accretion process", Proceedings of International Conference on Precision Engineering 2003/04, Singapore, pp. 532-538, p. 545, 2004
- 2) 古谷克司, 清水要祐: 「粉末混入放電加工による仕上げ面および潤滑面の同時形成 (第2報) —状態の観察による付着プロセスの推定—」, 精密工学会誌, 70, 5, pp. 683-688, 2004
- 3) 佐藤公道, 古谷克司, 三枝嘉孝: 「粉末混入放電加工による仕上げ面および潤滑面の同時形成 (第4報) 回転電極の適用」, 2004年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 375-376, 2004
- 4) 佐藤公道, 古谷克司, 三枝嘉孝: 「粉末混入放電加工における堆積メカニズムの解析—放電エネルギーと加工時間の関係—」, 電気加工学会全国大会 (2004) 講演論文集, pp. 49-52, 2004
- 5) 佐藤公道, 古谷克司, 三枝嘉孝: 「Ti粉末混入放電加工における堆積メカニズムの解析」, 2005年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 1331-1332, 2005