

鉄鋼材料のエロージョン摩耗特性

学位論文内容の要旨

粉粒体の衝突により材料表面が損傷除去される摩耗現象をエロージョンという。エロージョン摩耗には、多くの要因が関与し、現れる特性が複雑に変化する。このため粉粒体の流送が多くの利用例があり、エロージョンによる管路等の損耗、損傷事例が多数生じているにも拘わらず、最大損傷部位や、摩耗寿命を的確に推定する工学的手法がないのが現状である。本論文では、対象材料として工業的に最も多量に用いられる鉄鋼材料を取上げ、特に摩耗量の衝突角度による変化に着目したエロージョン摩耗実験を行い、また摩耗の過程を詳細に観察した。これによって、代表的な鉄鋼材料、摩耗条件についてエロージョン摩耗の機構を把握、理解し、材質および粉粒体の特性によって変化する角度依存性の理由を明らかにした。また、摩耗寿命の推定法を提案した。

第1章では、エロージョン摩耗特性とその評価に関する研究の意義について述べ、これまでの研究を概観してその問題点を指摘するとともに、特に本研究の目的を示し、鉄鋼材料のエロージョン摩耗に関する基礎的な研究の必要性について述べた。

第2章では、鉄鋼材料のエロージョン摩耗の基本的な実験手法及び摩耗量の評価法を提案した。ブラスト試験機と鋼球グリットを用い、まず軟鋼材(SS400)を対象とした。摩耗量の評価には、単位粒子量当たりの体積損傷量で定義される「損傷速度」を用いた。実験結果によれば、軟鋼材の損傷速度は、衝突角度 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ で最大、 60° 近傍で一旦極小となり、 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ で再び極大値をとる特徴的な角度依存性を示す。提案した実験手法、評価方法の有効性が示され、また軟鋼材のエロージョン現象の基本的特性が理解された。

第3章では、軟鋼について広く用いられる炭素鋼およびその熱処理材、曲り管および管継手等に多用される球状黒鉛鋳鉄、化学工業等で用いられるステンレス鋼について、同様のエロージョン実験を行った。その結果によれば、炭素鋼は低角度側と高角度側に2つのピークを持つ双峰型の損傷速度曲線を示し、損傷速度の最大値は、材料硬さが高いほど小さい。S45C 焼入れ材は、低角度側で高く、高角度側で減少する角度依存性を示した。損傷速度は SS 材の約 $1/10$ であるが、硬さが衝突粒子である鋼球グリットより高いにも拘わらず、エロージョン摩耗が生じる。一方、球状黒鉛鋳鉄の損傷速度は SS 材の数倍で、 60° 近傍で最大になる。オーステンパ球状黒鉛鋳鉄では、加工誘起マルテンサイトの生成によって表面硬度が増加し、耐摩耗性が向上する。フェライト系およびマルテンサイト系ステンレス鋼の角度依存性は、SS 材と同様に双峰型であるが、最大摩耗量は高角度側である。一方、オーステナイト系ステンレス鋼は 20° で最大摩耗量を示し、高角度側では単調に減少する。このように、鉄鋼材料はその組織と硬さによって著しく

異なる摩耗量および衝突角度依存性を示すことが明らかになった。また、損傷速度を支配する最大の要因は試料の硬さであるけれども、加工硬化後の硬さによって評価すべきことが示された。

第4章では2つ割り試験片の断面観察によって、エロージョン摩耗の進行過程を詳細に観察した。軟鋼のエロージョン摩耗は、表面部組織が次第に塑性変形し、ブラスト方向に突起部が生成され、これが伸延、脱落することによって進行する。低角度側と高角度側で表面部の塑性変形、摩耗の様相が異なるが、いずれの場合も時間当たりの表面層の除去深さはほぼ一定であり、これを摩耗進展速度と定義した。材料の肉厚減少の目安となる摩耗進展速度は、損傷速度の傾向と一致し、損傷速度から算出できる平均摩耗深さと摩耗進展速度との間にも明瞭な直線関係がある。

以上の結果から、次のような寿命算定が可能となる。(1) ブラスト試験機を使用して 30° 、 60° および 80° の3角度でエロージョン摩耗実験を行い、損傷速度を求める。(2) 損傷速度から平均摩耗深さを算定する。(3) 平均摩耗深さから肉厚減少を算定できる。実際にはさらに、次章に述べるように粒子の特性が変わった場合の角度依存性変化の方向を予測する必要があるが、簡易的な寿命予測が可能であり、管路等の摩耗対策に応用することができる。

第5章では、衝突粒子側の特性による摩耗量および角度依存特性の変化を検討した。衝突粒子の寸法については、標準粒径 $660\mu\text{m}$ の場合、軟鋼の角度依存性は双峰型であるが、粒径 $990\mu\text{m}$ の大粒子では、高角度側の摩耗が増大し、逆に $370\mu\text{m}$ の小粒子では、低角度側の摩耗が大きくなる。衝突粒子の硬さについては、標準グリット (420HV) での軟鋼の双峰型特性が、HV800の焼入れ硬化グリットでは右上がりの傾向になる。一方、S45C 焼入れ材では、標準グリットでは 30° 近傍で最大摩耗となるのに対し、800HVの焼入れグリットでは 80° 近傍で最大になる。

このような衝突粒子及び対象材料の組合せによる摩耗特性の変化を理解するために、エロージョン摩耗を、低角度側で生じる切削型と、高角度側で生じる変形型の2つの摩耗の和と考えることを提唱した。粒子の硬さ、寸法等の要因が2つの摩耗形式に対して異なる影響を及ぼすと考えることにより、複雑な現象を統一的に理解することができる。第5章ではさらに、多角形鋼グリットによる試験を行ったが、その結果は上の2つの摩耗機構によって良く理解することができた。

第6章では、エロージョン摩耗の角度依存性を、2次元に近似した単一粒子と試料の衝突による塑性変形量の有限要素法解析と関連付けて理解することを試みた。それによれば、表面圧痕近傍の塑性変形量の和は、粒子と試料の間に摩擦がある場合とない場合でその角度依存性が異なる。摩擦がある場合には、表面部の変形量は衝突角度 20° 近傍で最大値をとり、高角度側で減少した。一方、摩擦がない場合は角度 90° で最大になった。摩擦がある場合の表面塑性変形の傾向は切削型の摩耗特性に類似であり、摩擦が無い場合は変形型摩耗の傾向と類似である。すなわち、エロージョン摩耗の2つの形態は、摩擦に伴う変形と摩擦によらない変形に対応し、特徴的な角度依存性はそれらの組合せによって生じることが理解される。球状黒鉛鋳鉄をモデル化した同様の解析では、衝突角度 $60^\circ \sim 70^\circ$ で塑性変形量が最大となり、実験結果と類似である。解析は2次元近似であるけれども、エロージョン摩耗の特徴的な角度依存特性が定性的に理解される。

第7章は総括であり、本研究で得られた成果の要点をまとめ、さらに残された問題点と今後の展望を述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 野 口 徹
副 査 教 授 石 川 博 将
副 査 教 授 篠 原 邦 夫
副 査 教 授 工 藤 昌 行

学 位 論 文 題 名

鉄鋼材料のエロージョン摩耗特性

粉粒体の衝突により材料表面が損傷除去される摩耗現象をエロージョン摩耗という。これには多くの要因が関与し、現れる特性が複雑に変化するため、粉粒体の流送管路等でエロージョンによる損耗、損傷事例が多数生じているにも拘わらず、損傷部位や摩耗寿命を的確に推定する手法がない。本論文では最も重要な工業材料である鉄鋼材料を対象とし、特に粒子の衝突角度による摩耗量の変化に着目したエロージョン摩耗実験を行って、摩耗が生じる機構および、鉄鋼の組織・材料特性と粉粒体の特性によって変わる角度依存性の理由を明らかにし、簡易的な摩耗寿命の推定法を提案したものである。

第1章ではエロージョン摩耗に関する従来の研究を概観して問題点を指摘し、鉄鋼材料のエロージョン摩耗に関する研究の必要性を述べ、本研究の目的と意義を示した。

第2章では、鉄鋼材料のエロージョン摩耗の基本的な実験手法及び摩耗量の評価法を提案している。汎用性の高い試験法を用い、軟鋼材を対象として、単位粒子質量当たりの体積損傷量である「損傷速度」を評価した。その結果、軟鋼材の損傷速度が衝突角度 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ と $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の2つの角度領域で極大値をとる双峰型の角度依存性を示すことを明らかにした。これにより、提案した実験手法、評価方法の有効性が示され、軟鋼材のエロージョン現象の基本的特性が理解された。

第3章では、炭素鋼等種々の鉄鋼材料について、同様のエロージョン実験を行った。その結果によれば、各材料はその組織と硬さによって著しく異なる損傷速度および衝突角度依存性を示す。すなわち、炭素鋼とフェライト系およびマルテンサイト系ステンレス鋼は双峰型、オーステナイト系ステンレス鋼と焼入れ鋼は低角度ピーク型、鋳鉄は 60° 近傍に最大値をもつ単峰型の角度依存性を示す。損傷速度は一般に試料硬さが高いほど小さいが、鋳鉄は著しく摩耗量が多く、さらに加工硬化、加工誘起マルテンサイ

トの生成などの組織変化が摩耗量に大きく影響することを明らかにしている。また試料の硬さが粒子硬さより高くても摩耗が生じること、および耐摩耗性の評価には試料の初期硬さよりも加工硬化後の硬さを用いるべきことを見い出している。

第4章では、考案した手法によってエロージョン摩耗の進行過程を詳細に観察し、表面部の塑性変形、突起の生成、伸延、脱落というエロージョン摩耗の基本機構を明らかにしている。また低角度側と高角度側で塑性変形の様相が異なること、しかしいずれの場合も粒子質量当たりの表面層の除去深さはほぼ一定で、これを摩耗進展速度と定義し、平均摩耗深さとの間に明瞭な直線関係があることを見出した。その結果から、低、中、高の3角度でのエロージョン実験から肉厚減少量を算定することを提案している。

第5章では、衝突粒子の特性による摩耗量および角度依存特性の変化を検討している。すなわち、粒子の寸法および硬さによって衝突角度依存の傾向と損傷速度が最大となる角度が変わることを見い出した。このような摩耗特性の変化を理解するため、エロージョン摩耗を、低角度側で生じる切削型摩耗と、高角度側で生じる変形型摩耗の2つの摩耗の和と考えることを提唱している。粒子の硬さ、寸法等の要因が2つの摩耗形式に対して異なる影響を及ぼすと考えることにより、複雑な現象を統一的に理解できることを示し、多角形鋼グリットによる実験で、その妥当性を確認している。本章で得られた角度依存特性と前章の結果を併せることにより、簡易的な寿命予測が可能になる。

第6章では、2次元に近似した単一粒子と試料の衝突による圧痕近傍の塑性変形量を有限要素法により解析し、角度依存性を理解することを試みている。それによれば、圧痕近傍の相当塑性ひずみの和と衝突角度の関係は、粒子と試料の間の摩擦の有無によって異なり、摩擦がある場合には切削型の摩耗に、また、摩擦がない場合は変形型の摩耗に類似の特性となる。球状黒鉛鋳鉄を模したモデルでは70°付近で最大値を示し、摩耗実験の結果と類似であった。このようにエロージョン摩耗の特徴的な角度依存特性が、定性的ではあるけれども、力学的な観点からも理解できることが示された。

第7章は総括であり、本研究で得られた成果の要点をまとめ、さらに今後の発展のための課題と展望を述べている。

以上のように本論文は、これまで詳細が不明であった鉄鋼材料のエロージョン摩耗について、摩耗が生じる機構と、種々の要因によって変化する衝突角度依存性の理由を明らかにすると共に、摩耗量と摩耗寿命を簡便に評価推定する手法を提案したものであって、機械材料工学ならびに設備管理工学の分野に貢献するところ大である。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。