

| | | |
|------------|----------------------------|---------------|
| | はやし のりゆき | |
| 氏名 | 林 慎之 | |
| 授与学位 | 博士(工学) | |
| 学位授与年月日 | 平成15年3月24日 | |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第4条第1項 | |
| 研究科, 専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科(博士課程)機械電子工学専攻 | |
| 学位論文題目 | 高温用耐摩耗材料の高温エロージョン機構の研究 | |
| 指導教官 | 東北大学教授 加藤 康司 | |
| 論文審査委員 | 主査 東北大学教授 加藤 康司 | 東北大学教授 渡邊 忠雄 |
| | 東北大学教授 横堀 壽光 | 東北大学助教授 足立 幸志 |

論文内容要旨

現在、全世界におけるエネルギー需要は急速に増加する傾向にある。全世界的に見た場合、エネルギーの化石燃料への依存が高いが、可採年数を考慮すると今後石炭火力発電が最も長年に渡って使用される可能性がある。一方、地球温暖化防止などの厳しい環境規制から、発電プラントの高効率化が強く求められており、効率向上のためプラントの温度が年々上昇する傾向にある。

ところで、石炭火力発電プラントでは、固形燃料である石炭や石炭の燃焼灰、流動剤の砂など、多くの粉体を使用する。そのため、粉体に含まれる硬質粒子のくり返し衝突によって生じる粉体エロージョンと呼ばれる摩耗が、プラントの寿命に対して大きな影響を与える。また、前述のように、プラントの高温化が進んでいるため、高温条件下での粉体エロージョン防止が石炭火力発電プラントを長期使用する上で重要な技術となる。

粉体エロージョンを防止する方法として、摩耗する部材に対して耐摩耗材を適用する方法が考えられる。高温条件を考慮した場合、高温での硬度低下が著しい金属や耐熱衝撃性が低いセラミックスに比べ、高温でも高硬度、高破壊靱性を維持できるサーメット(金属とセラミックスを複合化した材料)や金属中に硬質物質を分散した合金などが、耐エロージョン材料として有望である。しかし、サーメットなどの複合材料の粉体エロージョンに関する研究はこれまで十分ではなく、エロージョン機構の解明などがなされていない現状である。

そこで本研究では、まず各種材料の高温エロージョン特性を評価するのに適した試験装置を開発し、その装置を利用して高温用耐エロージョン材料として期待されるサーメットを含む各種材料の高温エロージョン特性とエロージョン機構を評価した。また、粉体エロージョン機構の予測を行うための基礎データを、高温でのスクラッチ試験、単粒子衝突試験が実施可能な装置を用いて取得し、エロージョン機構予測に関するマップ化を実施した。

本研究で得られた結果の概要を以下に示す。

1. 各種材料の高温エロージョン特性に関するデータを取得する装置として、遠心式高温エロージョン試験装置を開発した。

本装置は、従来多くの研究において使用されてきた吹付け式の高温エロージョン試験装置に比べ

粒子衝突速度の設定が容易であり、また 1 回の試験で試験片温度をパラメータにしたデータを取得できるなどの特長を有する。また、円筒型の試験片を用いることにより、1 個の試験片の形状を計測するだけで、粒子衝突角度をパラメータにした粉体エロージョンのデータを取得できること、試験片を直接カートリッジヒータで加熱するため、加熱時間を短縮できるとともに、試験に必要な電力の節約もできることなどの特長を有する。

ところで、今回開発した遠心式高温エロージョン試験装置は粒子を衝突させる方法や試験片の加熱方法などが従来多く用いられてきた吹付け式エロージョン試験装置と異なるため、試験データが異なる可能性がある。そこで、遠心式高温エロージョン試験装置による試験データの解析方法につき検討し、本装置によるデータと吹付け式エロージョン試験装置で得たデータを定量的、定性的に比較した。その結果、今回開発した遠心式高温エロージョン試験装置と吹付け式の高温エロージョン試験装置では定量的にほぼ一致するエロージョン率（単位衝突粒子重量当たりの摩耗体積）が得られること、遠心式高温エロージョン試験装置にて得たエロージョン率の粒子衝突速度への依存指数は従来の報告事例と定量的に一致することがわかった。また、高温条件にて Cr の含有量が異なる鋼のエロージョン率を遠心式高温エロージョン試験装置にて評価したところ、エロージョン率の Cr 含有量への依存性が吹付け式エロージョン試験装置にて取得したデータと定性的に一致することがわかった。

以上の結果から、今回開発した遠心式高温エロージョン試験装置は各種材料の高温エロージョン特性を迅速、高効率に評価する方法として有効であることが判明した。

- 金属材料の耐摩耗性を向上させる方法として、金属中に炭化物などの硬質成分を分散させる方法があるが、このようにして製作された材料の粉体エロージョン機構、耐エロージョン性向上のための材料組織の最適設計指針などについては十分に示されていない。そこで、組織が異なる金属相をマトリックスとする耐摩耗材料を肉盛および焼結により製作し、耐エロージョン性に及ぼす組織の影響につき調査し、粉体エロージョン機構の検討を行った。

高温エロージョン試験には 5 種類の肉盛材と 1 種類の焼結材を供したが、試験の結果大きな硬質相を含有する肉盛材の耐エロージョン性が高く、最も組織が微細であった焼結材の耐エロージョン性が最も劣っていた。また、粉体エロージョンを受けた摩耗面を観察したところ、肉盛材では金属相が選択的に摩耗していること、金属相の内部でプレートレット (platelet) と呼ばれるかえり状の塑性変形部が認められた。

以上の試験結果から、金属相をマトリックスとする耐摩耗材料のエロージョン機構は、金属相における platelet 機構であることが明らかになった。そこで、金属相における platelet 形成に関するモデル化を行い、金属相の硬さ、硬質相の間隔、硬質相の面積率などを含む platelet 形成に関する過酷さを表すパラメータ S_{pm} を考案した。本パラメータと高温エロージョン試験から得たエロージョン率の関係を調べたところ、 S_{pm} が増加するとともにエロージョン率も増加する傾向にあることがわかった。従って、金属相の耐エロージョン性を向上させるためには S_{pm} の値が小さくなるように材料の設計を実施すればよいことが示された。具体的には、以下のような材料組織の設計を行うと耐エロージョン性の向上が図れる。

- 金属相の硬さを高くする。
 - 硬質相の間隔を小さくし、粒子衝突時の変形が材料内部まで及ぶようにする。
 - 硬質相の面積率（含有量）を増加させ、金属相に衝突する粒子の割合を減少させる。
3. 耐摩耗材のより高温への適用、耐エロージョン性の向上の要求が高まっている。この要求に応える手段として、高温への適用性改善についてはNi合金やCo合金などの耐熱合金を金属相マトリックスとして適用すること、耐エロージョン性の向上については硬質成分の含有率を向上できる焼結などのプロセスにより、硬質相を多量に含む材料を製作することが挙げられる。しかし、Ni合金やCo合金を含有する焼結サーメットの高温エロージョン特性および高温エロージョン機構については、現状十分に解明されていない。そこで、Ni合金、Co合金を含有する焼結サーメットを含む各種材料の高温エロージョン試験を実施し、高温エロージョン特性および高温エロージョン機構の評価を行った。
- 試験には、金属材料（鋼、高Cr鋳鉄）、硬質肉盛材（Fe基、Ni基）、焼結サーメット、セラミックス（アルミナ）を供し、粒子サイズ、粒子衝突速度、粒子衝突角度などが粉体エロージョンに与える影響につき調査した。
- 試験の結果、平均粒径が23 μm のシリカを衝突させた場合には、セラミックス（アルミナ）と焼結サーメットの耐エロージョン性が優れていた。また、比エロージョン量（単位粒子衝突エネルギー当たりの摩耗体積）を硬さ比（エロージョンを受ける材料の硬さ/衝突する粒子の硬さ）で整理したところ、硬さ比の増加とともに比エロージョン量が減少する傾向が認められた。
- 一方、平均粒径800 μm の珪砂を衝突させた場合には、セラミックスは優れた耐エロージョン性を示すが、焼結サーメットは耐エロージョン性が金属材料並みまで低下する場合があった。また、セラミックスの比エロージョン量は平均粒径23 μm のシリカが衝突した場合と平均粒径が800 μm の珪砂が衝突した場合で大きな変化が無かったが、焼結サーメットの比エロージョン量は平均粒径が増加した場合10~100倍増加した。なお、平均粒径が800 μm の珪砂が衝突する場合でも、室温の条件であれば焼結サーメットの耐エロージョン性は良好であった。
- エロージョン試験後の摩耗面を観察したところ、耐エロージョン性が良好であった条件での焼結サーメットの摩耗面はなめらかであるのに対し、耐エロージョン性が低下した条件での焼結サーメットの摩耗面では微小破壊が発生し、面が非常にあれていた。
- 以上の結果から、焼結サーメットはサイズが小さい粒子が衝突する場合や室温の条件では耐エロージョン性が良好であるが、高温でサイズが大きい粒子が衝突する場合には微小破壊の発生により激しいエロージョンが発生することがわかった。
4. 焼結サーメットは、粒子の衝突条件や温度条件により耐エロージョン性が大きく変化することがわかったが、その原因と焼結サーメットの耐エロージョン材料としての適用限界を明らかにするため、高温条件下でのスクラッチ試験および単粒子衝突試験を実施し、高温エロージョン試験と類似の微小破壊の発生に関する検証試験を実施した。また、スクラッチ試験、単粒子衝突試験などの基礎試験データを利用して、焼結サーメットの激しいエロージョンが発生する条件に関するマップ化を実施した。

焼結サーメットのスクラッチ試験の結果、微小破壊はスクラッチするピンの食込み深さが大きくなると発生することがわかった。これは、大きな粒子が衝突し、粒子の食込み深さが増大した場合に微小破壊が発生する高温エロージョン試験の結果と対応する。また、微小破壊が発生する臨界の食込み深さは、温度にはほとんど依存しない。

一方、焼結サーメットの単粒子衝突試験の結果、高温エロージョン試験に供したのと同じ珪砂を衝突させた場合、粒子衝突速度が速いなど条件が過酷な場合には1回の粒子衝突でも微小破壊が発生することがわかった。しかし、球形のアルミナ（粒径1mm）を衝突させた場合には、衝突速度を80m/sまで増加させても微小破壊は発生しなかった。また、粒子衝突時に形成されるくぼみの体積から焼結サーメットの動的な硬さを調べたところ、温度が室温から500℃に上昇すると動的な硬さは約半分に低下することがわかった。

以上の結果から、焼結サーメットは温度の上昇により動的な硬さが低下し、粒子衝突時に材料表面に発生するひずみが増大し、微小破壊が発生するというメカニズムが推定される。そこで、微小破壊の発生条件を粒子の食込み深さをクライテリアにして検討したところ、動的な硬さ比が1以下で粒子衝突時の食込み深さがスクラッチ試験で得た微小破壊発生の臨界食込み深さを超えた場合に比エロージョン量が増大することがわかった。また、微小破壊発生時のひずみの大きさを検討したところ、約0.02であることがわかった。

以上に述べたように、本研究の結果、金属相をマトリックスとする耐摩耗材料の耐エロージョン性向上に関する材料設計指針、および焼結サーメットの耐エロージョン材料としての適用限界に関する知見を得た。この結果をフローチャートに表し、耐エロージョン材料の選定手順を示した。

論文審査結果の要旨

資源の可採年数から、今後も長期間にわたり使用が予想される石炭焼き発電プラントにおいては、高効率化のための高温化が進み、今後高温環境下での灰や砂などによる粉体エロージョンが深刻化すると予想されている。高温環境下で優れた耐エロージョン性を示す材料として、炭化物などを多量に含む合金や焼結サーメットなどが考えられるが、これらの複合材料に関するエロージョン機構の解明は非常に不十分な現状である。このような背景の下に、本研究は数多くの材料を迅速かつ高効率に評価可能な高温エロージョン試験装置を考案し、金属相をマトリックスとする硬質材料と焼結サーメットを中心に高温環境下でのエロージョン機構を実験に基づき明らかにし、さらに高温耐エロージョン材料の選定方法を示した。本論文は、この研究成果をまとめたもので、全文7章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第2章では、迅速かつ高効率に高温環境下での粉体エロージョン特性を評価可能である遠心式高温エロージョン試験装置の開発について述べ、本試験装置による試験条件の設定法及び従来試験結果とのデータの対比を行い、本試験装置の有効性を示している。これは、高温条件下での粉体エロージョンの実験的評価の観点から、有用な成果である。

第3章では、金属相をマトリックスとする硬質肉盛材、焼結材の高温環境下での粉体エロージョン機構を調べ、金属相をマトリックスとする複合材料の金属相におけるプレートレット (platelet) 形成に関する過酷さを表すパラメータを考案し、本パラメータの値を減少させることでエロージョン量を減少できること明らかにしている。これは、耐エロージョン材料の設計の観点から、重要な知見である。

第4章では、焼結サーメットを含む各種材料の高温環境下での粉体エロージョン機構を調べ、焼結サーメットは粒径 $23 \cdot \mu\text{m}$ の微小な粒子が衝突する場合には優れた耐エロージョン性を示すが、粒径 $800 \cdot \mu\text{m}$ の大きな粒子が衝突する場合には焼結サーメット表面の微小破壊により耐エロージョン性が著しく低下することを見出している。

第5章では、第4章で得た焼結サーメットの微視的なエロージョン機構を明らかにするため、高温条件用のスクラッチ試験機、高速単粒子衝突試験機を考案および製作し、焼結サーメットを対象にした基礎的な損傷評価試験を実施している。その結果、スクラッチ試験および単粒子衝突試験の基礎的評価試験により、焼結サーメットの激しいエロージョンの発生条件が粒子の食込み深さと材料の動的な硬さを用いたマップ上で分類可能であることを世界で初めて明らかにしている。これは焼結サーメットについて耐エロージョン材料として適用可能な条件を定量化する上で、有効かつ非常に重要な知見である。

第6章では、第5章までに得た知見を基に、高温環境下で使用する耐エロージョン材料の選定方法をフローチャートにより示している。これは、耐エロージョン材料の設計と選定を行う上で、有用な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は高温環境下での粉体エロージョン特性評価を迅速かつ高効率に実施する試験手法を提案し、高温用耐エロージョン材料として期待される金属とセラミックスの複合材料の高温エロージョン機構を明らかにし、かつエロージョンの支配因子および材料の適用限界を実験に基づき明らかにしたものであり、トライボロジー及び機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。