

## 学位論文題名

## 溶射を利用した異種材料の接合法に関する研究

## 学位論文内容の要旨

本研究は、溶射を利用した新しい接合法(溶射接合法)を提案し、接合体の基礎的な性状を調べるとともに接合機構を考察して本法の有効性を確認し、さらに実製品への応用を図ったものである。

第1章では、機械材料に対して適用されている各接合技術の現状と問題点を述べ、溶射接合法と機構的に関連するろう接法の現状を示し、また、熔融金属を接合相手材とする方法の研究、実用例について詳述した。本章ではさらに、溶射接合法の特徴とその有効性について概説した。

第2章では、市販のNi基自溶合金(JIS MSFNi3相当)を用いた軟鋼同士の溶射接合を行い、その場合の接合部性状を調べ、それに基づいて本法における接合過程を考察した。Ar雰囲気中で接合した場合、双方の溶射皮膜は融合し、溶射ままの皮膜に存在した気孔および酸化物がない緻密な層となり、また、母材とは拡散層を形成した接合部が得られる。引張試験によると、接合強度は皮膜の熔融温度近傍で最大となり、それ以外の温度域では低下する傾向を示した。この場合、大部分が拡散層から破断する。この拡散層からの破断は、接合前の皮膜と母材との界面に存在した分離箇所が接合後もそのまま同一箇所に残存した空隙のためである。接合雰囲気を大気中および真空中とした場合も接合部組織、強度に差が見られず、本法によって大気中、無加圧状態でも十分に良好な接合体を得ることが実証された。これは簡便、低コストな接合法を提案する上で本法が極めて有効なことを示唆するものである。

次に、自溶合金溶射被覆材の密着性を溶射接合法によって評価することを提案し、引張試験により検証した。それによると、同一の溶射材料を被覆してもブラスト材、母材の種類によって破断箇所が異なり、また、強度に差が生じた。本法によって、自溶合金溶射被覆材の境界部も含めた総合評価が可能となったことが明らかとなった。

第3章では、金属/金属系およびセラミックス/金属系の異種材料の接合を試みた。まず、第2章と同じ溶射材料を用いて球状黒鉛鋳鉄と軟鋼とを接合し、本法が異種材料の接合にも十分に適用できることを実証した。接合部の溶射層には硬い析出物が生成し、温度の上昇につれて凝集、粗大化した。これによって接合強度は低下し、また、高強度を示す温度域が狭められた。析出物はクロム炭化物、クロムホウ化物、あるいはこれらの複合化物とされ、その形成元素であるCr、CおよびBの含有量を極力低減した溶射材料を開発することによりさらに良好な接合部を得ることが示唆された。そこで、Ni基合金の機械的特性に及ぼすCrおよびBの影響を調べ、その結果を基に新しいNi基の合金粉末を試作した。本粉末による接合では、高強度を示す接合温度が市販粉末の場合よりも高温側へ移動するが、強度が大幅に向上し、高強度を示す温度範囲も広がることが明らかとなった。これらのことから、試作材料が本接合法において極めて有効な材料であることが確認できた。

次に、アルミニウム合金の溶射皮膜を用いてアルミナ/軟鋼、アルミナ/チタンを接合し、接合部の基本的な性状を調べ、本法の適用性と問題点を検討した。溶射皮膜は加熱過

程で熔融し、元の皮膜内に存在した気孔および酸化物が消失し、緻密な層が形成された。また、アルミナ母材にクラックが認められず、良好な接合部を有した。曲げ試験によると、アルミナ／軟鋼、アルミナ／チタンともに皮膜の融点近傍で最大の強度を示し、その前後では低下した。金属母材と溶射層間には合金層が生成し、その厚さは温度の上昇につれて増加した。この場合、いずれの条件でも軟鋼での合金層がチタンでのそれに比べて厚く生成する。皮膜の融点以上で接合したアルミナ／軟鋼ではほとんどが合金層から破断し、合金層の形成が強度低下の大きな要因となった。したがって、本法による接合部の強度向上を図る上では合金層の成長を極力阻止する材料の設計および開発が必要である。

第4章では、Ni基の自溶合金を溶射被覆した鋼管および棒の外周を片状黒鉛鑄鉄および球状黒鉛鑄鉄で鑄ぐるみ、得られた接合体の基礎的な性状を調べ、本法の有効性と問題点を検討した。それによると、無処理の場合には接合される条件が狭い範囲に限られるが、溶射処理によって良好な接合がなされた。鑄ぐるみ鑄鉄と芯材との体積比が小さく、鑄鉄の凝固、冷却が急速な場合、接合界面近傍の鑄鉄側では皮膜拡散層、急冷凝固組織などが見られ、皮膜拡散層内には析出物およびマルテンサイト組織が認められた。これらによって拡散層は高い硬さを示したが、押し抜きせん断試験によれば接合強度は実用上十分であった。鑄ぐるみにおいて、接合の良否は容積比、鑄造条件等に著しく依存するが、溶射によって接合性を大幅に改善することが確認され、その有効性が明らかとなった。

第5章では、溶射を施し鑄ぐるみ接合する場合の接合条件を明らかにすることを目的として、実測温度を境界条件とする差分法を用いて界面の温度経過と溶湯の凝固の進行状況を解析し、接合過程を推察した。また、この結果に基づいて溶射材成分(Ni)の拡散量を求め、実測値と接合部組織を照合した。界面近傍の溶湯の凝固過程には、凝固が徐々に進行する場合、一旦急速凝固が終了した後再熱によって再熔融する場合、および急速凝固し、再熔融がない場合の三つのタイプがある。固液共存の溶湯と高温の鋼が一定時間接する前二者の場合に接合が可能であり、液相状態の溶射皮膜の介在が接合可能な固相率と時間の範囲を大幅に拡大する。Ni拡散の計算値と組織観察による実測値は良く一致し、これからも接合過程を考察できた。溶射の利用は熱的および寸法的条件に対する敏感性を大幅に緩和する効果がある。

本章ではさらに、鑄ぐるみにおける溶射材料各成分の接合部性状に対する効果を調べ、その実験結果および考察からCo基合金を試作し、それによる鑄ぐるみを実施した。この結果によると、皮膜拡散層のマルテンサイトの発生防止および析出物の減少が図られ、強度が向上したことから、本試作粉末の鑄ぐるみ用溶射材としての有効性が認められた。

第6章では溶射接合法による実製品への応用として、固体接合法および溶湯接合法の両手法による実験、試作例のいくつかを示した。固体接合法ではポンプ用インペラの製造、薄肉ステンレス鋼管の継手および超硬合金と鋼との接合を実証し、本法の有効性を示した。溶湯接合法では複合化した流水用配管の製造および自動車部品の試作を実施した。これらの実験によって、溶射を利用した本接合法が実製品の高品質化、高付加価値化に対して十分に適応できることを実証した。

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、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 鶴 飼 隆 好  
副 査 教 授 成 田 敏 夫  
副 査 教 授 石 井 邦 宜

学 位 論 文 題 名

## 溶射を利用した異種材料の接合法に関する研究

機械構造物部材に対する要求が益々高度化する今日、特性の異なる異種材料の複合化は材料および材料加工技術における最重要課題のひとつである。接合は巨視的な材料複合化手法のひとつであり、部材の高機能・多機能化を図る上で極めて有効であって、今後の発展が期待される技術である。

本研究は、従来、耐熱、耐食、耐摩耗性等の向上のための表面処理法のひとつとして用いられている溶射を、異種材料接合の際の界面挿入材として利用する「溶射接合法」を提唱し、その基礎技術を確立するとともに、この手法による接合過程と接合機構を解明し、さらに実製品への応用を図ったもので、7章から構成されている。

第1章では、機械材料に適用される各種接合技術の現状について述べ、特に、本研究で提案する新手法と関連の深い、ろう接法および鑄造材料の接合法における諸問題を詳述した。これに基づいて、新たに溶射接合法を提案し、その可能性、有効性を述べた。

第2章では、市販のNi基自溶合金をガスフレーム溶射した試料を用い、真空中、Arガス中および大気中で鋼/鋼の同種材料接合を行い、いずれも良好な接合状態を得た。接合部の顕微鏡組織および強度の調査により、接合の過程、接合機構を解明し、最大強度の得られる接合条件を明らかにした。これらによって本手法の基本的特性と、実用上の広い適応性を示した。

第3章では、同じ手法を、まず鋼と難接合材料である鑄鉄の異種材料接合に適用し、良好な結果を得ている。ここでは溶射材料の成分により接合部に形成される種々の金属組織と、これらが接合部の強度に及ぼす影響について詳細に検討した。この結果に基づいて接合用の新しい溶射合金粉末を試作し、実験によりその効果を確認した。さらに同様の手法をAl基合金粉末を用いた鋼/アルミナセラミックス、およびTi/アルミナセラミックスの接合に適用し、接合部の組織と強度を調査した。いずれも適切な接合条件の選択により良好な接合状態が得られることを確認し、本手法が異種材料の接合にも応用できることを示した。

第4章では、同手法を鋼/鑄鉄溶湯の鑄ぐるみ接合（固相-液相接合）に応用した結果について述べている。心材（被接合材）として軟鋼およびステンレス鋼、鑄ぐるみ材とし

て片状および球状黒鉛鑄鉄を用い、種々の形状、寸法条件および熱的条件における接合状態の良否、接合部組織、強度について詳細に調査した。接合部の性状は容積比および鑄造条件に著しく依存し、大気中で良好な接合が得られる条件範囲は限定されるが、溶射によって接合性が向上し、また種々の条件に対する感受性が大幅に緩和されることを明らかにした。

第5章では、鑄ぐるみ接合の場合に対して行った、差分法による凝固解析について述べている。これにより、界面での溶湯の凝固進行には、緩慢凝固、一旦凝固後再溶融、および急速凝固、の3形態があることを示した。また、このような接合機構と接合の良否の関係、ならびにこれらに対する溶射皮膜の寄与を明らかにした。計算結果は溶射合金成分の濃度分布測定および顕微鏡組織観察によって検証された。以上の結果に基づいて、良好な接合が得られる熱的な条件の範囲を示し、溶射接合法の有効性に理論的な根拠を与えた。

第6章では、本手法をいくつかの機械部品に適用した例を述べた。固体接合の例としてポンプインペラの試作および超硬合金と鋼の接合を行い、鑄ぐるみ接合の例としては複合鑄鉄管、自動車部品等を製作した。いずれも良好な接合状態が得られ、所定の機能を有することが確められた。

第7章は本研究の総括である。

以上のように、本論文は、同種および異種材料の接合に応用しうる新しい手法として溶射接合法を提案し、その有効性を実験的に確認するとともに、接合機構について理論的に考察して多くの有益な知見を得たものであって、機械材料工学および材料加工学に寄与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。