

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Mechanics of paraffin droplet impacted and solidified on metal substrate
著者(和文)	康 超
Author(English)	Chao Kang
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11740号, 授与年月日:2022年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:阪口 基己,轟 章,佐藤 千明,伏信 一慶,井上 裕嗣
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11740号, Conferred date:2022/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	KANG Chao		
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	阪口 基己	准教授	審査員	井上 裕嗣	教授
	審査員	轟 章	教授			
		佐藤 千明	教授			
伏信 一慶		教授				

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Mechanics of paraffin droplet impacted and solidified on metal substrate」と題し、全7章で構成されている。

第1章「Introduction」では、本研究の背景と目的を論じている。まず、ジェットエンジン高温部材の遮熱コーティングに用いられるセラミックス溶射技術について、溶射では溶融させた材料粒子を基材表面に吹き付けて衝突、急速冷却、凝固、堆積させること、成膜された溶射皮膜には割れや剥離といった損傷が生じることがあり、この損傷は溶射時に発達する皮膜の残留応力に大きく左右されることを説明している。つぎに、この残留応力の実測を試みたこれまでの研究を総括するとともに、溶融した単一の粒子が基材に衝突して急冷凝固する過程は時間と寸法のスケールが小さいため測定は事実上不可能であることを指摘している。そこで、溶融パラフィンを用いたモデル実験と数値シミュレーションによって、単一液滴の凝固・密着時の応力発達挙動と凝固した皮膜の破壊現象を明らかにすることを本論文の目的として定めている。

第2章「Material properties of paraffin waxes」では、モデル実験に採用した2種類のパラフィンの物性値を測定している。具体的には、工業用パラフィンと市販のろうをモデル材料として選定し、それぞれの融点、比熱、融解熱、熱伝導率、線膨張係数を測定するとともに、4点曲げ試験により0°Cから融点直下の温度範囲で縦弾性係数、最大引張強度、ならびに、クリープ特性を測定している。

第3章「Drop experiment」では、独自に開発した実験装置を用いた溶融パラフィンの滴下実験を行い、パラフィンの凝固・密着過程で生じる残留ひずみの計測と割れ・剥離挙動の観察を行っている。この滴下実験装置では、アルミニウム製容器の外周をヒータで加熱し、容器内で溶融させたパラフィンを容器下部の吐出口から金属基材の中央に滴下する。マイクロメータヘッドを利用したバルブによって吐出口を開閉して滴下量を制御し、滴下高さを変えることで基材への衝突速度を制御できる。基材裏面にはひずみゲージと熱電対を貼付し、液滴の凝固・密着過程で生じるひずみと温度変化を測定する。この装置を用いた一連の滴下実験により、基材温度が低く、滴下高さが低く、液滴温度が低いほど基材裏面で計測される引張残留ひずみが大きくなり、市販のろうの場合は凝固皮膜に割れが生じ、工業用パラフィンの場合は基材/皮膜界面が剥離することを示している。

第4章「Scraping test to measure adhesion strength」では、第3章の滴下実験で割れや剥離が発生しなかった滴下条件を対象にして、基材/皮膜界面に工具を押し当てて皮膜を削り取る剥離試験を提案し、滴下条件が密着強度に与える影響を定量評価している。まず、基材温度、液滴の滴下高さ、温度が密着強度に与える影響を評価し、基材温度が高く、滴下高さが高く、液滴温度が高いほど密着強度は大きくなり、この傾向は第3章で示した凝固・密着過程での剥離のしにくさと定性的に一致することを示している。続いて、クリープ変形を利用して皮膜中の引張残留応力を意図的に解放させた皮膜に対する剥離試験を行い、引張残留応力には基材/皮膜界面の密着強度を低下させる効果があることを明らかにしている。

第5章「Elastic FEM simulation to evaluate cracking and debonding」では、弾性有限要素解析により凝固皮膜の残留応力分布を定量的に評価している。まず、実測したパラフィン皮膜の形状を2次元軸対称モデルで再現し、第2章で測定した機械的特性を考慮した有限要素モデルを構築している。続いて、第3章で計測した基材裏面のひずみを基に弾性解析を行い、凝

固皮膜には2~4 MPa程度の面内引張応力が発生すること、この面内引張応力と第2章で測定したパラフィンの引張強度を比較すると凝固密着過程で生じる皮膜の割れを定量的に説明できることを明らかにしている。また、基材/皮膜界面に働く垂直応力とせん断応力は、基材温度が低く、滴下高さが低いほど大きくなること、この傾向は第3章で示した滴下実験での剥離のしにくさや第4章で示した剥離試験での密着強度の大きさと定性的に一致することも明らかにしている。

第6章「Coupled thermo-mechanical simulation to evaluate residual strain」では、第2章で測定した熱物性を加味した熱構造連成有限要素解析を行い、第3章の滴下実験で計測したひずみの数値シミュレーションによる再現を試みている。その結果、凝固皮膜のクリープ変形を考慮しても、基材裏面のひずみの計算結果は実験結果より2倍程度大きくなるが、これは有限要素モデルが基材/皮膜界面の微小な空隙や局所的な剥離を反映できていないためであると推察している。また、実験結果と計算結果の乖離が小さい滴下条件では凝固・密着過程での割れや剥離が生じにくく、剥離強度も高くなる傾向があることを明らかにしている。

第7章「Conclusions」では、本研究の成果を総括するとともに、今後の課題と解決策を論じている。

以上を要するに、本論文は、液滴の凝固・密着過程での残留応力の発達挙動と凝固皮膜に発生する破壊現象を対象にして、溶融パラフィンを用いたモデル実験によりさまざまな滴下条件の影響を明確化するとともに、有限要素解析によりその実験結果を定量的に説明付けることに成功しており、工学的および工業的に貢献するところが大きい。よって、博士(工学)の学位論文として十分な価値があると認められる。