



Title	Material Model Development for Accurate Analysis of Cold Spraying Induced Dynamic Plasticity
Author(s)	王, 倩
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/85409
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (WANG QIAN)	
Title	Material Model Development for Accurate Analysis of Cold Spraying Induced Dynamic Plasticity (コールドスプレーの動的塑性挙動を高精度解析するための材料モデル開発)
<p>Abstract of Thesis</p> <p>Cold spraying (CS) is a solid-state deposition process in which micron-sized particles are consolidated through extreme deformation caused by supersonic impact to avoid melting-induced drawbacks and retain the microstructure of feedstock powder. Quantitative CS modeling is imperative to reproduce various CS phenomena and reveal the related mechanisms. One of the keys to quantifying CS modeling is the material model. In this dissertation, a new material model, the Ma-Wang (MW) material model, was developed specifically for CS. This model takes full account of the effects of large-scale strain, full-range strain rate, and the temperature, allowing to accurately reproduce extreme deformation, grain refinement, and energy conversion in CS. The thesis consists of the following six chapters.</p> <p>In Chapter 1, a brief overview of the current status of CS was given. Accordingly, the current challenges and limitations were outlined to pinpoint the necessity of developing a new material model for CS.</p> <p>In Chapter 2, a new material model, the MW material model, was developed specifically for CS based on dislocation dynamics, considering the coupling effects of four terms: strain hardening, normal-range strain rate hardening, ultra-high strain rate hardening, and thermal softening/hardening. The systematic determination method of model parameters was described, and the model parameters for two of the most classical CS materials, pure Cu and Al6061-T6, were identified.</p> <p>In Chapter 3, the MW material model was embedded into an existing finite element code and applied directly to CS simulations. The prediction accuracy of this model was verified by comparing the simulated Cu microparticle deformation morphologies with experimentally observed ones. The influence of each term in this model was probed separately to reveal that ultra-high strain rate hardening plays a crucial role in CS deformation behavior, while the occurrence of jetting is largely dependent on thermal softening. In particular, a phenomenological formula describing grain size evolution was incorporated into the constitutive law of this model, illustrating that grain refinement in CS was mainly caused by dynamic recrystallization and occurred near the interface. Additionally, it was determined that temperature has a significant effect on grain refinement.</p> <p>In Chapter 4, a series of CS simulations utilizing the MW material model was performed for a single Cu microparticle impacting a Cu substrate. The effects of velocity and temperature were systematically investigated to elucidate that during CS, the initial kinetic energy of the microparticles is primarily converted into the deformation energy of the microparticles and the substrate, 99% of which is dissipated via plastic deformation, while less than 1% is temporarily stored via elastic deformation, and can be eventually recovered to induce the rebound of the microparticles. This mode of energy conversion is hardly affected by velocity and temperature. Nevertheless, the increase in velocity and temperature can promote the overall deformation and local non-uniformity, both of which are beneficial to CS bonding.</p> <p>In Chapter 5, a series of CS simulations utilizing the MW material model was performed for both Al6061/sapphire and Al6061/Al6061 impact systems. The high accuracy of this model for both impact systems was fully validated from subsonic to supersonic regimes, highlighting the model universality. In particular, both impact systems were quantitatively analyzed to elucidate the similarities and differences of supersonic impacts between identical and dissimilar materials. Most of the kinetic energy is dissipated through plastic deformation, while a very small amount is released through elastic recovery. Notably, interfacial friction becomes another important energy dissipation pathway in CS dissimilar materials.</p> <p>In Chapter 6, this dissertation was concluded, and some suggestions for future work were provided.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (W A N G Q I A N)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	麻 寧緒
	副 査	教授	藤久保 昌彦
	副 査	教授	大沢 直樹
	副 査	准教授	堤 成一郎
論文審査の結果の要旨			
<p>本論文では、金属粒子の超音速衝突によるコールドスプレー (CS) プロセス中に発生する超高速塑性変形などの動的力学挙動を精度高くシミュレーションするため、新しい材料モデル、Ma-Wang (MW) 材料モデルを開発し、純 Cu と Al6061-T6 の CS 中における動的超大塑性変形メカニズムと結晶粒の微細化、粒子の跳ね返し、界面結合、エネルギー散逸などに与える影響を解明している。本論文は、以下 6 章からなる。</p> <p>第 1 章では、CS 技術の研究開発および産業界の応用に関する現状と課題を整理し、コールドスプレーの動的塑性挙動を再現すべき新しい材料モデルの開発必要性を述べている。</p> <p>第 2 章では、転位動力学に基づき、CS によるひずみ硬化、通常範囲のひずみ速度硬化、超高ひずみ速度硬化、熱軟化、動的再結晶などを考慮した MW 材料モデルを開発している。加えて、MW 材料モデルのパラメータの決定方法を述べ、純 Cu と Al6061-T6 の特性パラメータを同定している。</p> <p>第 3 章では、MW 材料モデルを既存の有限要素法ソフトウェア LS-DYNA に組み込み、純 Cu 微粒子の CS による変形形態をシミュレーションし、実験結果と比較することで、本モデルの予測精度を検証している。さらに MW モデルを用いて、単一 Cu 微粒子の超音速衝突時における粒子の全体変形および応力ひずみを精度高く再現し、動的再結晶による微細化の結晶粒サイズの成長を予測し、CS による結合メカニズムを解明している。</p> <p>第 4 章では、MW 材料モデルを用いて、単一 Cu 微粒子が Cu 基板に衝突する条件としての衝突速度と予熱温度を変化させ、一連のシミュレーションを行い、これらの結果を分析することにより、CS によるエネルギーの変換、変形挙動および結合に伴う複数の物理現象 (ジェット現象、粒子の跳ね返すエネルギーなど) を、定量的に評価し、結合可能な CS 条件を明らかにしている。</p> <p>第 5 章では、MW 材料モデルを用いて、Al6061-T6 粒子を母材 Al6061-T6 とセラミック系母材サファイアにそれぞれ CS させる場合において、亜音速から超音速までの衝突速度による粒子と母材の動的変形挙動を精度高くシミュレーションし、アルミ材への有効性と他の金属にも適用可能性を示している。さらに同種材料 (Al6061-T6/Al6061-T6) および異種材料 (Al6061-T6/サファイア) の超音速衝突における結合メカニズムおよび跳ね返し原因を明らかにしている。</p> <p>第 6 章では、本研究の結論を総括すると共に、今後の課題を述べている。</p> <p>以上のように、本論文は、金属粒子の超音速衝突による動的塑性変形に基づくコールドスプレープロセスを対象とし、コールドスプレー固相積層プロセス中に発生している超高ひずみ速度 ($10^{+7} \sim 10^{+9}$ [1/s]) と超大塑性変形 (100% ~ 500%) およびそれらに伴う熱軟化現象と動的再結晶現象に対して、超大ひずみと超高ひずみ速度による加工硬化則や熱軟化則を定式化した材料モデル (Ma-Wang モデル) を新たに開発し、動的再結晶による粒径変化を予測している。さらに、純 Cu とアルミ合金 Al6061-T6 のコールドスプレーによる粒子変形や固相結合現象を定量化予測して可視化し、実験結果との比較により本材料モデルの精度と有効性を検証している。加えて、Johnson-Cook モデルを用いた解析結果と比べて、本開発モデルによる高精度の予測結果が得られている。今後、本開発モデルを各種金属のコールドスプレー固相積層に利用することにより、モノづくり技術の革新に貢献することが期待できる。</p> <p>よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。</p>			