

研究综述

## 冷喷涂金属颗粒变形行为数值模拟研究进展

陈进, 殷强, 郑志明, 邢亚哲\*

(长安大学 材料科学与工程学院 材料成型及控制工程系, 西安 710061)

**摘要:** 理解冷喷涂中的颗粒变形和沉积行为一直是科学工作的焦点。由于颗粒撞击基底后的瞬时变形行为难以通过实验观测, 因此多数研究工作聚焦于数值模拟。总结了一些颗粒撞击基底的建模方法, 在前人研究的基础上, 针对每个模型的原理及优缺点, 分析了每个方法的适用场景, 给出了改善模型的方法。综述了颗粒特性、入射角度、气体预热温度等对颗粒变形行为的影响, 其中粒径大小、颗粒形状等是影响颗粒变形行为的主导因素, 因此重点探讨了颗粒特性的影响。颗粒的撞击变形是影响冷喷涂涂层残余应力分布的重要因素, 对涂层残余应力的相关数值模拟研究进行了综述, 分析了颗粒变形与颗粒残余应力的关系。最后就目前冷喷涂残余应力建模较单一的形势, 探讨了如何建立一种新模型以分析涂层残余应力。

**关键词:** 冷喷涂; 颗粒瞬时变形; 数值模拟; 有限元法; 颗粒特性; 涂层残余应力

**中图分类号:** TG495 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)08-0001-10

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.08.001

## Research Progresses in Numerical Simulation of Deformation Behavior of Cold Sprayed Metal Particles

CHEN Jin, YIN Qiang, ZHENG Zhiming, XING Yazhe\*

(Department of Material Forming and Control Engineering, School of Materials Science and Engineering,  
Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**ABSTRACT:** The temperature of cold spray is very low, so the quality of the coating depends on the deformation behavior of particles impacting the substrate. Since it is difficult to observe the instantaneous deformation behavior of particles impacting the substrate through experiments, most research work focuses on numerical simulation. The commonly used simulation method is the finite element method, and the mesh is a key step in the finite element method. The quality of the mesh determines the accuracy of the computation results. There are other methods that do not require meshing.

The finite element methods can be also divided into Lagrangian method, Euler method, Arbitrary Lagrangian Euler method (ALE) and Coupled Lagrangian Euler method (CEL). The Lagrangian method can effectively simulate the deformation behavior of a single particle impacting the substrate, but the distorted mesh which can cause computation termination makes it unsuitable for particles at too fast speed. This extends to the ALE method. When the mesh distorts, it can have adaptive changes. Although it overcomes the problem of mesh distortion in the Lagrangian method, its computational accuracy is not as good as Lagrangian method. The Euler method is more accurate, and will not terminate the computation due to mesh distortion. The biggest problem

收稿日期: 2023-05-10; 修订日期: 2023-07-04

Received: 2023-02-10; Revised: 2023-07-04

基金项目: 陕西省重点研发计划 (2022GY-408)

Fund: The Province Key Research and Development Plan of Shaanxi (2022GY-408)

引文格式: 陈进, 殷强, 郑志明, 等. 冷喷涂金属颗粒变形行为数值模拟研究进展[J]. 表面技术, 2024, 53(8): 1-10.

CHEN Jin, YIN Qiang, ZHENG Zhiming, et al. Research Progresses in Numerical Simulation of Deformation Behavior of Cold Sprayed Metal Particles[J]. Surface Technology, 2024, 53(8): 1-10.

\*通信作者 (Corresponding author)

is that it is difficult to track the particle/substrate interface. Although the CEL method can clearly see the particle/substrate interface, the problem of mesh distortion in the Lagrangian method still exists. There are some methods without mesh, such as Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) and Molecular Dynamics (MD). They adopt a series of particle combinations with material properties to determine the deformation behavior of particles through changed in particle aggregation, effectively avoiding mesh distortion and difficulties in monitoring particle/substrate interfaces. They can complete some work that can not be completed by the finite element method.

The deformation behavior of particles is closely related to the residual stresses of the coating. For example, shot peening effect caused by high-speed impact of metal particles will cause residual compressive stresses in coatings. Some commonly used modeling methods were reviewed, the applicable scenarios of each model were analyzed based on their advantages and disadvantages and the effects of process parameters such as particle properties, spray angle, and gas preheating temperature on particle deformation behavior were summarized. The effect of particle properties on particle deformation was dominant, and particle hardness, particle size, particle oxidation difficulty and particle shape had a significant effect on particle deformation. Therefore, the focus was on exploring the effect of particle properties. At last, some models for residual stresses in coatings were summarized, starting from particle deformation to explore the causes of residual stresses in coatings. The modeling researches on residual stresses in coatings mainly focus on the model of particle impact on the substrate, which is limited to the "shot peening stresses" of particles, while the "birth and death methods" can analyze the formation of other residual stresses, which is widely used in the field of thermal spray. A model that combines the advantages of the both is proposed as future work content.

**KEY WORDS:** cold spray; instantaneous deformation behavior of particles; numerical simulation; finite element method; particle properties; residual stress of coating

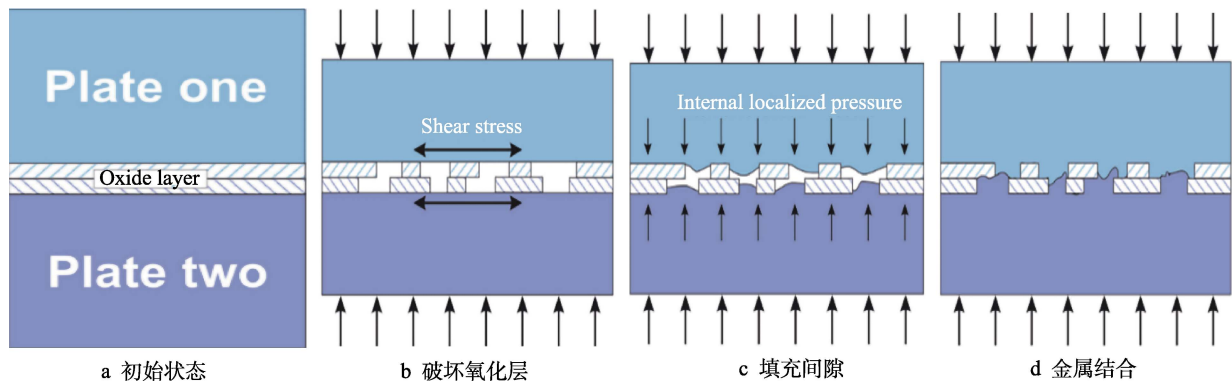
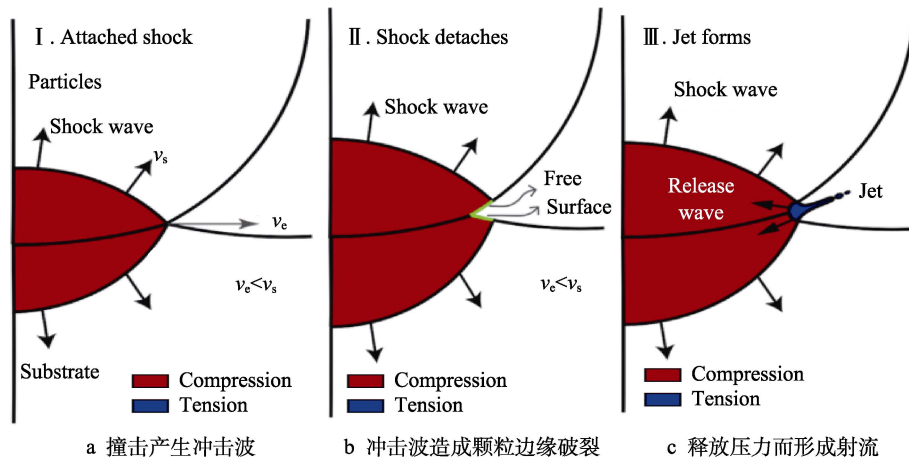
20 世纪 80 年代, 俄罗斯科学家们发明了冷喷涂技术<sup>[1]</sup>。冷喷涂技术基于空气动力学, 利用高速气流 ( $N_2$ 、 $He$  等), 通过拉瓦尔喷嘴将颗粒加速至 300~1 200 m/s, 颗粒直径一般为 10~50  $\mu m$ 。当颗粒速度超过一定临界速度时, 颗粒会撞击基底表面并产生严重的塑性变形, 随后沉积在表面温度低于颗粒熔点的基底表面。冷喷涂技术的操作温度很低, 可以减小材料氧化、热软化、熔化等影响, 不会轻易改变粉末相的组成, 这意味着冷喷涂技术不会改变粉末的原始性能, 常用于铜、铝等易氧化的金属材料<sup>[2]</sup>, 近几年在金属陶瓷材料方面有所发展<sup>[3]</sup>。冷喷涂技术在增材制造领域有着广泛的应用, 常用于汽车、海洋等领域, 可以保护基材免受低温腐蚀、氧化或其他恶劣工作环境的影响<sup>[4-5]</sup>。在冷喷涂过程中, 颗粒撞击基底时会发生很大的塑性形变, 在颗粒沉积过程中, 颗粒形变的速度减小, 同时基底形变的速度增大, 基底表面和内部都会产生残余压应力和残余拉应力, 因此冷喷涂还可以作为一种后处理工艺以提高工件力学性能, 邹阳帆等<sup>[6]</sup>利用冷喷涂技术在 2219 铝合金熔焊接头表面制备了铜涂层, 提高了焊缝区显微硬度, 结果表明, 冷喷涂颗粒的“喷丸效应”对基体残余应力有显著的改善作用。

不同于热喷涂技术, 在冷喷涂过程中, 喷涂颗粒始终保持固态, 它能否成功沉积到基底表面主要依靠颗粒自身的变形。颗粒的变形受多方因素影响, 其变形行为可能影响最终制备的涂层内部残余应力分布, 引起涂层内部发生应力开裂、疲劳性能下降等问题。

金属颗粒的变形与沉积是冷喷涂极重要的部分, 颗粒的变形往往只在一瞬间, 因此颗粒的变形及冷喷涂残余应力的形成过程难以通过实验观测。本文从数值模拟出发, 结合国内外文献, 就颗粒变形行为及涂层残余应力的数值模拟研究展开了介绍、分析与探讨。

## 1 涂层结合机理

当颗粒高速撞击基底后, 基底与颗粒界面处会发生绝热剪切失稳 (ASI)<sup>[7]</sup>, 基底表面和颗粒表面的氧化层被成功去除, 在基底与颗粒间建立了金属键合, 界面处温度较高, 形成剪切带<sup>[8-9]</sup>, 这种结合机理与冷焊类似, 如图 1 所示<sup>[10-11]</sup>。Assadi 等<sup>[12]</sup>认为当颗粒撞击基底时, 由于温度升高, 颗粒与基底的接触面会发生热软化现象, 同时产生硬化现象, 其中因塑性功而产生的热量难以迅速消失, 因此这一过程是绝热过程。当材料的热软化程度>硬化程度时, 便会发生绝热剪切失稳, 在颗粒与基底的界面处会出现射流状的长条带, 这种射流能够促进颗粒与基底结合。Hassani 等<sup>[13]</sup>在 Assadi 等<sup>[12]</sup>的研究基础上去除了本构关系中的热软化过程, 但依然观察到颗粒撞击基底后产生的射流, 这说明射流的形成与热软化并无直接联系, Hassani 等<sup>[13]</sup>认为颗粒撞击基底后产生的压力波与颗粒边缘的相互作用是引起射流的重要原因, 他们提出的结合示意图如图 2 所示。由此可见, 冷喷涂颗粒/基底的结合状态与颗粒的碰撞变形行为密切相关。

图 1 冷焊金属板结合过程<sup>[10-11]</sup>Fig.1 Metal plate bonding process in cold welding (CW): a) initial state; b) break-up oxide layer; c) gap filling; d) metallic bonding<sup>[10-11]</sup>图 2 冷喷涂颗粒边缘射流形成示意图<sup>[13]</sup>Fig.2 Schematic diagram of jetting of particle edge in cold spray: a) impact induces a shock wave; b) shock wave causes particle edge rupture; c) jetting forms on the basis of pressure release<sup>[13]</sup>

## 2 颗粒变形行为

由于颗粒撞击基底的变形行为难以通过实验表征, 颗粒变形通常仅持续几十纳秒, 因此常用数值模拟法对颗粒的变形进行模拟<sup>[14-16]</sup>。数值模拟法包括有限元法 (FEM)、分子动力学法 (MD)、光滑粒子流体动力学法 (SPH) 等。

### 2.1 颗粒变形行为的建模方法

许多模拟工作是在有限元法基础上进行的, 有限元法起源于 20 世纪 50 年代, 从最初的拉格朗日法 (Lagrangian) 衍生出任意拉格朗日欧拉法 (ALE)、欧拉法 (Eulerian)、耦合拉格朗日欧拉法 (CEL)<sup>[17]</sup>等。

常用的有限元分析模拟软件有 ABAQUS、ANSYS 等, 这 2 个软件广泛用于解决复杂的非线性问题。由于普遍将冷喷涂过程假设为绝热过程, 因此基底与颗粒温度为室温 298 K。考虑到材料中加工硬化、热软化等影响, 材料的流动应力一般可用 Johnson Cook 模型表示, 如式 (1) 所示<sup>[18-19]</sup>。

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)[1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*)][1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $n$ 、 $C$ 、 $m$  为材料常数;  $\varepsilon_p$  为有效的塑性应变 (PEEQ);  $\dot{\varepsilon}^*$  为相对于参考应变率的有效塑性应变率;  $T^*$  的定义如式 (2) 所示。

$$T^* = \begin{cases} 0 & T < T_r \\ (T - T_r) / (T_m - T_r) & T_r \leq T \leq T_m \\ 1 & T_m < T \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $T_m$  为熔化温度;  $T_r$  为参考温度或转变温度,  $T_r$  通常为室温 298 K。

#### 2.1.1 拉格朗日法

拉格朗日法是早期研究单颗粒变形行为的常用方法之一。该方法建立了一个网格随材料变化而变化的模型, 网格越精细, 计算结果也越准确。在计算过程中, 拉格朗日法有助于追踪颗粒与基底的界面, 能够模拟颗粒与基底界面处温度及残余应力的变化, 并且具有较高的计算速度。缺点就是当颗粒速度太大时, 在颗粒的高速冲击下, 会导致网格严重变形, 最终使计算强制终止<sup>[20]</sup>, 且由于基底存储的弹性能大于颗粒存储的弹性能, 因此颗粒容易回弹。

为了解决网格扭曲的问题, 可从 3 个方面控制:

1) 缩减网格尺寸, 针对不同材料需要进行一定的调整, 缺点就是会导致计算结果不准确; 2) 在 Abaqus 网格模块中, 将基体与颗粒的扭曲控制为一个合理的数值; 3) 对所模拟部分使用 ALE 自适应网格, 通过在网格畸变区重新划分网格以达到自适应的目的, 即任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 法<sup>[21]</sup>, 但这会导致基底边缘呈现不现实的射流状态, 因此也有学者不建议使用此方法<sup>[16]</sup>。

利用拉格朗日法和 ALE 法模拟颗粒与基底接触部分射流的对比如图 3 所示。可以看出, 在普通拉格朗日法模拟的结果中, 由于网格的畸变, 颗粒与基底界面处的射流扁平且有着向外扩展的趋势, 而 ALE 法得到的射流形态较规则, 这与现实情况不符。

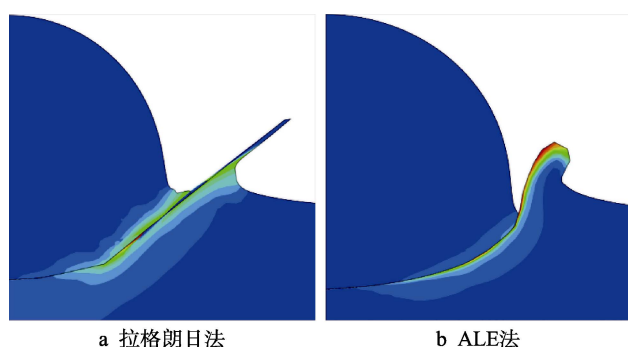


图3 拉格朗日法和 ALE 法模拟过程中的网格变形  
Fig.3 Mesh distortion in the simulation process of Lagrangian method and ALE method: a) Lagrangian method; b) ALE method

Li 等<sup>[22]</sup>同时使用拉格朗日法和 ALE 法监测了铜颗粒在 300、400、410、450、500、600 m/s 速度下的等效塑性应变。结果发现, 在拉格朗日法中, 当颗粒速度为 300~400 m/s 时, 颗粒等效塑性应变为 2, 当颗粒速度大于 410 m/s 时, 颗粒的最大等效塑性应变大于 10, 这是由网格的过度畸变导致的, 说明当颗粒速度在 400~410 m/s 时, 可能会发生绝热剪切失稳<sup>[12]</sup>。在 ALE 法中, 在任意速度下, 颗粒的等效塑性应变始终保持在 2~3.5, 无法通过颗粒的等效塑性应变来判断绝热剪切失稳是否发生。

与拉格朗日法相比, 由于 ALE 法网格自适应变化的特征, 在模拟过程中网格不易畸变, 因此在研究颗粒严重变形的问题时, ALE 方法要优于拉格朗日法, 但需要调整参数以优化射流形态, 较为繁琐。

### 2.1.2 欧拉法

鉴于在拉格朗日方法中, 颗粒高速撞击会使网格扭曲变形, Li 等<sup>[22]</sup>提出使用欧拉法建立颗粒撞击基底的模型。欧拉法将颗粒与基底放置于流动的欧拉体中, 只需在欧拉体上划分网格, 即可观察颗粒撞击基底过程中欧拉体上每个单元格中的体积分数变化情况, 网格在模拟过程中是不发生变化的, 材料可在网格内自由流动。

欧拉法所采用的模型只能为 3d 模型, 计算精度对网格尺寸要求较高, 有学者提出了一种近似 2d 模型的欧拉模型, 如 Yu 等<sup>[23]</sup>在实体模型中间切出厚度为 1  $\mu\text{m}$  的薄片, 使用欧拉法研究了铜颗粒在 200~700 m/s 速度下的变形行为, 结果表明, 400 m/s 为铜颗粒的临界速度, 随后进行了实验验证, 模拟结果与实验结果基本类似, 验证了其模型的可靠性。这种方法极大提高了运算效率, 但由于模型体积的变化, 其计算精度还需进一步研究。

Yin 等<sup>[24]</sup>采用拉格朗日法模拟了多颗粒的撞击过程, 由于附着在不同材料上的网格大小不一, 不同网格不能合并成整体, 因此导致颗粒相互分离。而欧拉法的网格是建立在一个“场”里面的, 所以颗粒不会从基底上反弹, 而是附着在基底上, 更接近实验观测结果。对多颗粒撞击过程的研究表明, 欧拉法优于拉格朗日法。虽然欧拉法在模拟多颗粒冲击方面更为优越, 但颗粒之间黏结在一起导致无法分清每个颗粒的轮廓。如何跟踪颗粒/颗粒与颗粒/基底的界面是目前欧拉法要克服的一个问题。

耦合拉格朗日-欧拉 (CEL) 法是以欧拉法为基础发展起来的, 它将基底视为一个可变形体, 颗粒依然置于欧拉体内部, 在欧拉体内观察颗粒的流动情况。此法将欧拉法和拉格朗日法相结合, 克服了欧拉法的短板, 可以监测到颗粒与基底的界面, 但依然存在一些缺点: 1) 若颗粒的冲击速度过大, 基底网格过度变形依然会导致计算终止; 2) 颗粒容易回弹; 3) CEL 法无法同时观察基底与颗粒的计算结果。

### 2.1.3 其他方法

对于有限元法, 网格划分通常占据了很大一部分的计算工作。网格畸变是拉格朗日法的一个重要问题, 需要 ALE 法中网格重新划分这样的特殊技术。然而, 网格重新划分不仅繁琐耗时, 而且计算结果会受到一定的影响。欧拉法需要额外的复杂数学变换, 计算成本较高, 同时不适用于监测颗粒与基底界面变化。

除了以上提到的有限元法, 有些非网格化的方法, 通过一系列独立粒子组合 (每颗粒子都包含材料本身的性质), 有效避免了网格畸变等问题, 如光滑粒子流体动力学法 (SPH)<sup>[25]</sup>、分子动力学法 (MD)<sup>[26]</sup> 等。在 SPH 法中, 一系列粒子表示连续尺度下的有限体积, MD 法与之类似, MD 法使用粒子来表示纳米尺度的原子或分子<sup>[27]</sup>。由于这 2 种方法将材料从连续态转变为离散态, 粒子的质量是计算精度的关键, 因此需要控制好每个粒子的质量, 若质量分布不均, 可能会影响颗粒最终的形状。

Michel 等<sup>[28]</sup>采用 SPH 法模拟了颗粒超高速撞击的塑性变形行为, 并将模拟结果与实验数据进行了比较。模拟结果与实验数据几乎一致, 说明 SPH 方法在模拟颗粒超高速撞击方面是可行的。Li 等<sup>[29]</sup>采用



SPH 法对冷喷涂过程中铜颗粒的撞击进行了系统研究, 并与拉格朗日方法进行了比较。结果表明, SPH 法模拟的颗粒变形行为与拉格朗日方法模拟的颗粒变形行为以及实验结果具有很好的可比性。相比于拉格朗日法和欧拉法, SPH 法非常适合处理经历网格极端变形的材料<sup>[30]</sup>, 且能够准确地观测到接触界面。SPH 法计算时间很长, 因此若网格变形量较小, 拉格朗日法要优于 SPH 法。在模拟多颗粒方面, 与其他建模研究不同, Zhang 等<sup>[31]</sup>开发了一种 SPH 模型来跟踪喷嘴中的颗粒流, 再现了真实冷喷涂过程, 将颗粒运动轨迹与喷嘴移动结合起来, 通过其模型可预测喷涂参数对涂层的影响。

为了观察原子尺度下颗粒与基底微观结构演变的机制, Rahmati 等<sup>[32]</sup>用 MD 法研究了不同直径的铜颗粒在基底上的变形行为, 分析了颗粒内部潜在的位错活动。在颗粒撞击基底的初期, 在颗粒的底端会形成密集的位错网络, 随着颗粒越来越扁平, 颗粒顶端也开始出现位错, 当颗粒完全平坦形成涂层后, 在涂层内部能观察到大量位错。MD 法主要用于研究纳米尺度, 属于微观领域, 有限元法主要应用于宏观领域。将 2 种方法结合起来可以更透彻地理解颗粒的

变形行为。冷喷涂颗粒变形行为建模方法的总结如表 1 所示。

2.2 影响颗粒变形行为的因素

2.2.1 颗粒特性

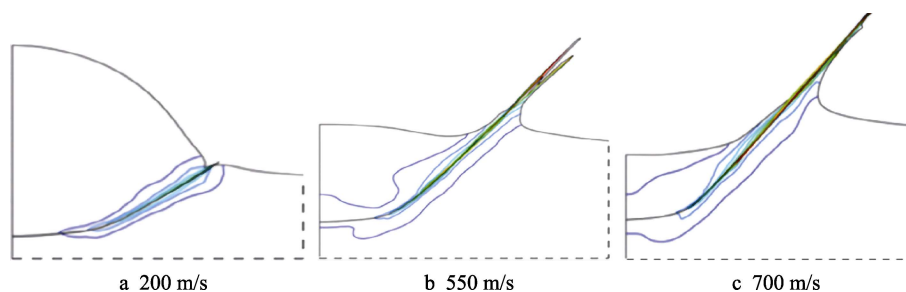
颗粒速度作为冷喷涂最重要的参数, 是很多学者的研究重点<sup>[23,33-34]</sup>。颗粒速度越大, 扁平率越大, 当颗粒被加速至一定值时, 若此时的速度是颗粒成功沉积到基底表面的最小速度, 则称为临界速度。若颗粒的速度远大于其临界速度, 则会发生冲蚀效应, 如图 4 所示<sup>[34]</sup>, 随着颗粒速度的增大, 颗粒越来越扁平且射流带越发明显, 当颗粒以 700 m/s 的速度撞击基底时, 颗粒表面及基底被撞击的表面明显下凹, 因此需要将颗粒速度控制在临界速度和冲蚀速度之间才能保证颗粒与基底的有效结合。

粒径大小不会影响颗粒的变形形貌, 但在初速度相同的情况下, 当颗粒撞击基底后, 尺寸较小的颗粒的动能耗散快于尺寸较大的颗粒, 这意味着大尺寸颗粒需要更多时间以达到稳定状态。

颗粒冷却速率与粒径大小成反比。冷却速率需要足够低, 才能促进界面的绝热剪切不稳定性。基于

表 1 冷喷涂颗粒变形行为建模方法的总结  
Tab.1 Summary of modeling methods for deformation behavior of cold sprayed particles

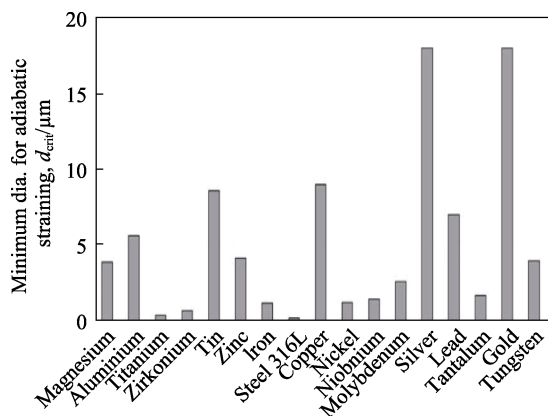
Numerical simulation	Characterization	Advantages/disadvantages	Computational speed	Computational accuracy	References
FEM	Lagrangian	Capable of tracking the contact interface; easy to operate Procedure can be terminated by particle impacts at high speeds or mesh distortion due to high mesh density <sup>[20]</sup> ; particles are prone to rebound	Small deformation: fast; Large deformation: slow	Small deformation: high; Large deformation: low	[22,24,34,40]
	Eulerian	Material flows freely within the Mesh <sup>[22]</sup> Extreme deformations can be modelled; no mesh constraints Cannot trace contact interface <sup>[23]</sup>	Slow	High	[23,43]
	ALE	Adaptive changes when the mesh is distorted The problem of procedure termination in the Lagrangian is mitigated Unrealistic jets <sup>[16]</sup> ; particles are prone to rebound; cumbersome parameter settings	Fast	Low	[22,53]
	CEL	Combined Lagrangian and Eulerian features Extreme deformation of particles can be modelled; contact interface can be tracked Program terminates due to distortion of the substrate mesh; results of simultaneous monitoring of particles and substrate not possible	Slower	Higher	[13]
Another method	SPH	A range of particle combinations to simulate material characteristics Extreme deformations can be modelled; mesh-independent <sup>[30]</sup> Uneven particle mass leads to unstable stretching between particles	Slow	Small deformation: low; Large deformation: high	[28-29,31,37]
	MD	Modelling interactions between atoms or molecules Microscopic mechanisms can be modelled after particle impact on the substrate <sup>[32]</sup> Difficult to simulate large scale particles	Slow	The smaller the particle scale, the higher the precision	[32]

图 4 颗粒在不同速度下撞击基底后沉积形貌<sup>[34]</sup>Fig.4 Deposition morphology of particles impacting the substrate at different speed<sup>[34]</sup>

颗粒冷却速率的影响, Schmidt 等<sup>[35]</sup>提出了式(3)以确定颗粒的临界粒径, 确保颗粒可以附着在基底表面。

$$d_{\text{crit}} = 36 \frac{\lambda_p}{c_p \rho_p v_p} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_p$  为热导率;  $c_p$  为比热容;  $\rho_p$  为材料密度;  $v_p$  为颗粒速度。Schmidt 公式表明, 在相同材质下, 粒径越小, 颗粒越不容易与基底结合。在某初速度下, 不同颗粒达到绝热剪切不稳定性所需的临界粒径如图 5 所示<sup>[35]</sup>, 可以看出, 对于锡、铜和银等, 冷却速率限制了小颗粒的结合, 而钛和钢 316L 颗粒却很难受冷却速率的影响。粒径大小需要等于或稍微大于其临界粒径大小, 才能保证颗粒变形更容易且能够与基底结合。

图 5 不同材料绝热剪切不稳定性最小粒径<sup>[35]</sup>Fig.5 Minimum particle size of adiabatic shear instability of different materials<sup>[35]</sup>

颗粒速度同样受到粉末形状的影响。Wong 等<sup>[36]</sup>研究了不同形状铜粉的变形行为, 发现在参数相同的情况下, 不规则粉末平均速度 > 海绵状粉末平均速度 > 球形粉末平均速度。由于非球形粉末有着可变的阻力系数, 因此不规则粉末和海绵状粉末的速度快于球形粉末速度。相同粒径的球形粉末虽有着固定的阻力系数, 但其速度可以通过改变粒径大小来控制。

若颗粒速度低于破坏其氧化层所需的速度, 会导致有一部分氧化层残留在颗粒表面上。Hemeda 等<sup>[37]</sup>使用 SPH 法讨论了氧化层厚度对颗粒速度和颗粒变

形的影响, 在颗粒或基体上, 较厚的氧化层加快了颗粒的临界速度, 并阻碍了恒定直径颗粒的结合, 氧化物的存在降低了颗粒的扁平性, 致使颗粒耗费更多的动能以除去氧化层, 且颗粒与基底之间存在缝隙, 说明氧化物使颗粒与基底结合变差, 如图 6 所示<sup>[37]</sup>。Li 等<sup>[38]</sup>和 Kang 等<sup>[39]</sup>研究了氧化物含量对颗粒变形行为的影响。Li 等<sup>[38]</sup>发现当铜颗粒的氧化物含量(质量分数)从 0.02% 增到 0.38% 时, 颗粒沉积所需速度从 300 m/s 增到 610 m/s。Kang 等<sup>[39]</sup>发现当铝颗粒氧化物含量(质量分数)从 0.001% 增到 0.045% 时, 颗粒沉积所需速度增大了 125 m/s。因此, 在实际情况下, 颗粒的临界速度要远大于理论的临界速度。

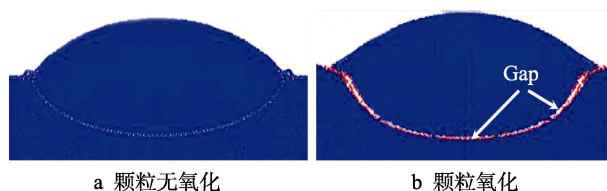
图 6 颗粒撞击基底后沉积形貌及界面结合状态<sup>[37]</sup>

Fig.6 Deposition morphology and interface bonding state particles impacting the substrate:

a) non-oxidized particles; b) oxidized particles<sup>[37]</sup>

## 2.2.2 气体预热温度

影响颗粒变形的因素不仅有颗粒速度, 气流温度也是一个重要的参数。气流温度的升高会促进颗粒的热软化, 有利于颗粒的变形。Yin 等<sup>[40]</sup>使用拉格朗日法研究了颗粒预热对变形行为的影响, 随着颗粒预热温度的升高, 颗粒变形趋于扁平, 边缘的射流区也越来越明显。

虽然气流温度越高越有利于颗粒的变形, 但会伴随几个问题: 1) 颗粒的变形由热软化主导, 塑性变形占比较小, 颗粒的加工硬化因热软化而减弱, 使最终制备的涂层显微硬度减小; 2) 温度的升高会不可避免地导致颗粒氧化, 需要做好平衡气体温度与涂层性能之间关系的相关工作。

## 2.2.3 入射角度

Schmidt 等<sup>[41]</sup>认为偏离垂直入射角度会显著改变颗粒的变形行为。在非垂直喷涂的情况下, 颗粒速度  $v$  分为水平分量  $v \cos \theta$  和垂直分量  $v \sin \theta$ , 如图 7 所

示。当颗粒倾斜冲击时, 颗粒与基底的接触面积较小, 受到切向速度的影响, 颗粒有滑走的趋势。Binder 等<sup>[42]</sup>使用欧拉法研究了在不同入射角度下钛颗粒的变形。结果表明, 入射角度越大, 颗粒扁平率越高, 绝热剪切失稳更加明显。当入射角度减小到  $85^\circ$  时, 对颗粒扁平率和绝热剪切失稳的范围只有很小的影响。当颗粒以  $70^\circ$  或更小的角度撞击基底时, 扁平率更小, 绝热剪切带移位, 扁平化颗粒仅在一侧与基底表面结合, 而在另一侧与基底表面没有接触。在斜向冲击时, 颗粒沿着基底表面的附加切向速度分量会产生一个拉力, 减小颗粒与基体的总接触面积和结合强度。

Loke 等<sup>[43]</sup>使用欧拉法研究了铝颗粒在入射角度为  $50^\circ \sim 90^\circ$  时撞击铝基底的变形行为, 发现颗粒的等效塑性应变随着入射角度的减小而增大。造成此现象的原因是, 小的入射角度会导致绝热剪切带集中在一个小接触区, 这可能会导致界面温度升高, 而铝颗粒在高温下更容易变形, 从而促进颗粒/基底界面处绝热剪切失稳的发生。

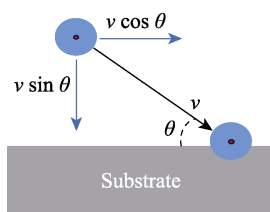


图 7 球形粉末速度的分解示意图  
Fig.7 Schematic diagram of decomposition of spherical powder's velocity

### 3 冷喷涂残余应力的数值模拟

残余应力是在未服役状态、除去其他外力条件下内部存在的一种力, 它存在于所有的制造工艺中, 如热喷涂、焊接、铸造、锻造和喷丸<sup>[44]</sup>等, 它对涂层内

部的完整性、疲劳性能和使用寿命有着非常重要的影响<sup>[45-46]</sup>。涂层残余应力可以通过不同的实验法测量, 常见实验法有 X 射线衍射法<sup>[47-48]</sup>、轮廓线法<sup>[49]</sup>、原位曲率法<sup>[50-52]</sup>等。通过实验只能测量残余应力的分布, 而对残余应力的形成过程并不清楚。当单个或多个颗粒撞击基底后, 模拟软件的强大算法可以计算出颗粒变形后的残余应力分布, 因此数值模拟可用于分析冷喷涂残余应力的形成机理。

Wang 等<sup>[53]</sup>使用 ALE 法讨论了颗粒应变与残余应力的关系。如图 8 所示, 在  $x$  方向上, 在颗粒顶部附近形成了拉应变, 从而在该区域产生了压应力。在界面中心及边缘区域, 大的压应变和颗粒与基体之间的相互约束共同形成了大的拉应力。由于边缘到界面中心中间区域的压应变减小, 因此拉应力减小或转换成压应力。在  $z$  方向上, 在界面的中心区域形成了大的拉伸应力, 这是由于颗粒的撞击在此处引起了压缩应变。Zhang 等<sup>[54]</sup>建立了 42CrMo 基体上冷喷涂多孔 Ni 颗粒的数值模型。首先, 在单个多孔 Ni 颗粒沉积过程中, 在闭合后的孔附近产生了较大的拉应变, 因此孔附近的残余应力以压应力为主。其次, 他们探讨了多个 Ni 颗粒沉积后的残余应力变化, 由于每一层颗粒会撞击下一层颗粒, 因此下层颗粒闭合孔附近的压应变更大, 导致孔附近的残余应力状态从压应力向拉应力转变, 压应力的值随涂层层数的增加而增大。Wang 等<sup>[53]</sup>和 Zhang 等<sup>[54]</sup>通过残余应变的分布及其自平衡解释了单个及多个颗粒中残余应力的形成原理, 说明了颗粒变形与颗粒残余应力形成过程有着必然联系。

上述研究主要基于模拟软件的显式分析模块, 用于求解动力学方程。单个颗粒撞击基底后的残余应力并不能代表整个涂层的残余应力变化, 虽然可以通过建立多个颗粒撞击基底的模型以模拟涂层残余应力, 但是这样计算时间非常长, 效率很低。其他方法如“生

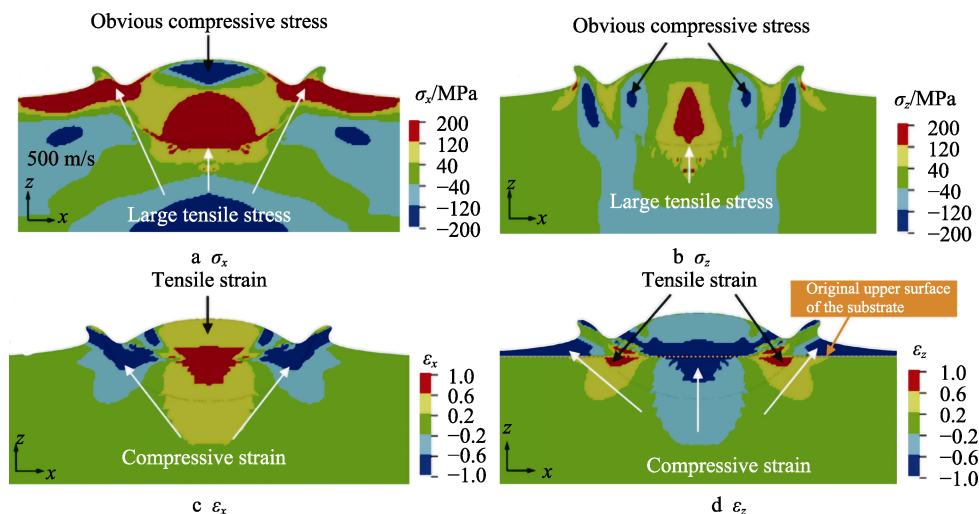


图 8 速度为 500 m/s 的微观颗粒撞击基底的残余应力和残余应变的分布<sup>[53]</sup>  
Fig.8 Distribution of residual stress and residual strain in microparticles deposited on the substrate at the impact speed of 500 m/s<sup>[53]</sup>



死单元法”已广泛应用于热喷涂中<sup>[55-58]</sup>,该方法为隐式分析,用于分析静力学方程,每层涂层在模拟过程中被逐步激活,如图 9 所示,少数学者利用这种方法研究了冷喷涂残余应力<sup>[59-60]</sup>,与传统颗粒撞击基底模型相比,“生死单元法”的计算时间较短,主要用于分析除了颗粒“喷丸效应”导致的残余应力之外的残余应力。Lin 等<sup>[60]</sup>使用生死单元法对整个涂层进行了建模,在基底上设置了多个涂层,使用生死单元技术逐步激活这些涂层,在激活后的涂层上施加 $-551.6\text{ MPa}$ 的初始应力,以模拟冷喷涂期间喷涂颗粒碰撞产生的残余应力。在层激活后进行了静态平衡分析,系统中的残余应力随着越来越多的涂层被激活而逐渐被建立,通过此模型预测了残余应力在不同厚度涂层下的发展情况。颗粒撞击基底产生的残余应力是不停变化的,对涂层设置一个初始应力定值的计算结果并不准确,且涂层被建模为一个单一的板状材料,不能模拟实际涂层的形态。若能将颗粒撞击基底后的残余应力变化加入到“生死单元法”中,可大大提高有限元计算的准确性。假设的有限元模型示意图如图 10 所示,显式分析和隐式分析交错进行,往后的工作将验证此模型的计算准确性。

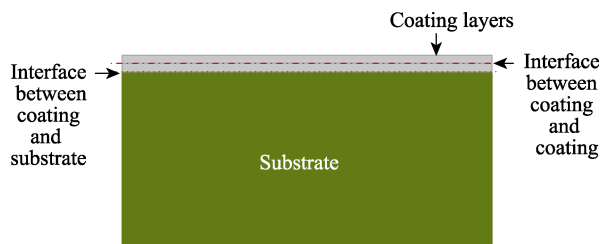


图 9 基于“生死单元法”的冷喷涂模型示意图  
Fig.9 Schematic diagram of a cold spray model based on the "birth and death methods"

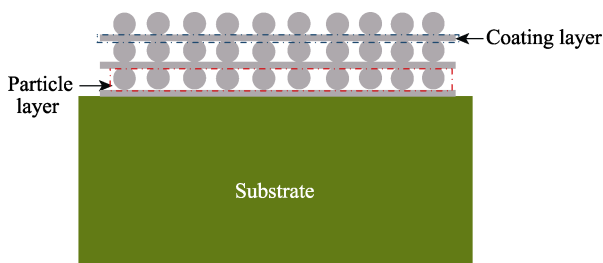


图 10 冷喷涂假设有有限元模型示意图  
Fig.10 Schematic diagram of finite element model for cold spray hypothesis

## 4 结论与展望

颗粒的变形行为显著影响着冷喷涂涂层的性能。由于颗粒的瞬时变形及颗粒与基底界面的温度和形貌变化难以通过实验捕捉,常用数值模拟来模拟这一过程,主要有拉格朗日法 (Lagrange)、任意拉格朗日-欧拉法 (ALE)、欧拉法 (Euler)、耦合拉格朗日

日-欧拉法 (CEL)、光滑粒子流体动力学法 (SPH) 和分子动力学法 (MD)。由于每个方法都具有局限性,为了提高计算的准确性,需要根据研究内容决定研究方法。若网格变形量较小,首先考虑拉格朗日法;若网格变形量大,可以考虑欧拉法、SPH 法、CEL 法及 ALE 法,CEL 法及 ALE 法依然包含着拉格朗日法的一些局限性,因此主要考虑欧拉法和 SPH 法;若要分析颗粒变形后纳米尺度的变化,可以使用 MD 法。

影响颗粒变形的参数很多,颗粒速度是最直接的因素,颗粒速度与颗粒沉积后的扁平率正相关,若颗粒速度远大于其临界速度,则颗粒变形过度,颗粒及基底表面是凹下去的,即发生了“冲蚀效应”。除颗粒速度外,其他因素如颗粒特性、气体预热温度、入射角度等需要被研究,在研究这些参数对颗粒变形行为的影响时,不能单单研究一个参数的影响,颗粒本身的性质会使每个颗粒的变形规律各不相同,因此颗粒特性被重点讨论。粒径大小是个很复杂的影响因素,不仅影响到颗粒的变形难易度及颗粒的冷却速率,还影响到颗粒在飞行过程中的阻力系数。受到阻力系数的影响,非球形颗粒速度随着时间变化而变化。若粉末保存不当,颗粒表面不可避免地会发生氧化,氧化物的存在不仅降低了颗粒的扁平性,而且会导致界面存在缝隙,颗粒与基底结合不良。气体预热温度越高越有利于颗粒的变形,但颗粒撞击基底的加工硬化作用也会因此减弱。在非垂直入射角度下,颗粒的变形行为由其特性决定。若颗粒硬度高,入射角度越小则扁平率越小。若颗粒塑性高,由于颗粒与基底界面处温度要高于垂直入射角度下的界面温度,这促进了冷喷涂中的绝热剪切不稳定,颗粒更易变形。除了调整实验参数外,若要增强颗粒的变形度,可在喷涂粉末中掺杂增强颗粒,可通过数值模拟来挑选合适的增强颗粒以降低实验成本。

数值模拟能够分析冷喷涂残余应力的形成过程。多数研究聚焦于单个/多个颗粒撞击基底的模拟,有些学者已通过此模型推出颗粒的变形与残余应力有着密不可分的关系,但这种对颗粒进行残余应力的分析显然是片面的。“生死单元法”是一种对完整涂层进行建模的技术,广泛用于热喷涂中,由于这种方法不能模拟颗粒“喷丸效应”引起的残余应力变化,因此在冷喷涂领域应用较少。结合 2 种模型的特点,笔者提出了一种有限元模型作为今后的工作内容。

### 参考文献:

- [1] IRISSOU E, LEGOUX J G, RYABININ A N, et al. Review on Cold Spray Process and Technology: Part I-Intellectual Property[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2008, 17(4): 495-516.
- [2] SU J, KANG J J, YUE W, et al. Review of Cold Spraying

- and Its Use for Metallic Glass Coatings[J]. *Materials Science and Technology*, 2019, 35(16): 1908 - 1923.
- [3] HAN C, WANG Z Z, MA L, et al. Cold Spray for Ceramic Metallisation: A Review[J]. *Advances in Applied Ceramics*, 2021, 120(5/6/7/8): 358-380.
- [4] YIN S, CAVALIERE P, ALDWELL B, et al. Cold Spray Additive Manufacturing and Repair: Fundamentals and Applications[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 21: 628-650.
- [5] ASSADI H, KREYE H, GAERTNER F, et al. Cold Spraying-A Materials Perspective[J]. *Acta Materialia*, 2016, 116: 382-407.
- [6] 邹阳帆, 王非凡, 鄢东洋, 等. 冷喷涂改善 2219 铝合金熔焊接头残余应力新方法[J]. *表面技术*, 2019, 48(12): 240-246.
- ZOU Y F, WANG F F, YAN D Y, et al. New Method to Modify the Residual Stress in Variable Polarity TIG Welded 2219 Aluminum Alloy Joints by Cold Spraying[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(12): 240-246.
- [7] 解闻. 镁合金表面冷喷涂 Al-7075 涂层形貌及残余应力研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.
- XIE W. Study on Appearance and Residual Stress of Cold Spray Al-7075 Coating on Mg-alloy Surface[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [8] WANG Q, ZHANG M X. Review on Recent Research and Development of Cold Spray Technologies[J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 533: 1-52.
- [9] KHODABAKHSI F, MARZBANRAD B, JAHED H, et al. Interfacial Bonding Mechanisms between Aluminum and Titanium during Cold Gas Spraying Followed by Friction-stir Modification[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 462: 739-752.
- [10] BAMBACH M, PIETRYGA M, MIKLOWEIT A, et al. A Finite Element Framework for the Evolution of Bond Strength in Joining-by-forming Processes[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(10): 2156-2168.
- [11] RAHMATI S, JODOIN B. Physically Based Finite Element Modeling Method to Predict Metallic Bonding in Cold Spray[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, 29(4): 611-629.
- [12] ASSADI H, GARTNER F G, STOLTENHOFF T, et al. Bonding Mechanism in Cold Gas Spraying[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(15): 4379-4394.
- [13] HASSANI G M, VEYSSET D, CHAMPAGN K V, et al. Adiabatic Shear Instability is not Necessary for Adhesion in Cold Spray[J]. *Acta Materialia*, 2018, 158: 430-439.
- [14] LI W Y, YANG K, YIN S, et al. Numerical Analysis of Cold Spray Particles Impacting Behavior by the Eulerian Method: A Review[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, 25(8): 1441-1460.
- [15] LI Y, WANG X F, YIN S, et al. Influence of Particle Initial Temperature on High Velocity Impact Process in Cold Spraying[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 12: 298-304.
- [16] YILDIRIM B, MUFTU S, GOULDSTONE A. Modeling of High Velocity Impact of Spherical Particles[J]. *Wear*, 2011, 270(9/10): 703-713.
- [17] SONG X, EVERAERTS J, ZHAI W, et al. Residual Stresses in Single Particle Splat of Metal Cold Spray Process-Numerical Simulation and Direct Measurement[J]. *Materials Letters*, 2018, 230: 152-156.
- [18] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.
- [19] JOHNSON G R, COOK W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperature[C]// In: *Proceedings of Seventh International Symposium on Ballistics*, 1983: 541-547.
- [20] KING P C, BAE G, ZAHIRI S H, et al. An Experimental and Finite Element Study of Cold Spray Copper Impact onto Two Aluminum Substrates[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, 19(3): 620-634.
- [21] CHEN C Y, XIE Y C, VERDY C, et al. Numerical Investigation of Transient Coating Build-up and Heat Transfer in Cold Spray[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 326: 355-365.
- [22] LI W Y, LIAO H L, LI C J, et al. On High Velocity Impact of Micro-sized Metallic Particles in Cold Spraying[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 253(5): 2852-2862.
- [23] YU M, LI W Y, WANG F F, et al. Finite Element Simulation of Impacting Behavior of Particles in Cold Spraying by Eulerian Approach[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, 21(3/4): 745-752.
- [24] YIN S, WANG X F, XU B P, et al. Examination on the Calculation Method for Modeling the Multi-particle Impact Process in Cold Spraying[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, 19(5): 1032-1041.
- [25] GNANASEKARAN B, LIU G R, FU Y, et al. A Smoothed Particle "Hydrodynamics (SPH) Procedure for Simulating Cold Spray Process-A Study using Particles[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 377: 124812.
- [26] JOSHI A, JAMES S. Molecular Dynamics Simulation Study on Effect of Process Parameters on Coatings during Cold Spray Process[C]// 46th Sme North American Manufacturing Research Conference, Namrc 46, 2018, 26: 190-197.
- [27] LIU M B, LIU G R. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): An Overview and Recent Developments[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2010, 17(1): 25-76.
- [28] MICHEL Y, CHEVALIER J M, DURIN C, et al. Hypervelocity Impacts on Thin Brittle Targets: Experimental Data and SPH Simulations[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1/2): 441-451.
- [29] LI W Y, YIN S, WANG X F. Numerical Investigations of the Effect of Oblique Impact on Particle Deformation in Cold Spraying by the SPH Method[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(12): 3725-3734.
- [30] ZHANG Z L, LONG T, CHANG J Z, et al. A Smoothed Particle Element Method (SPEM) for Modeling Fluid-Structure Interaction Problems with Large Fluid Deformations[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, 356: 261-293.
- [31] ZHANG Z L, SHU C, KHALID M S U, et al. SPH Modeling and Investigation of Cold Spray Additive Manufacturing with Multi-Layer Multi-Track Powders[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 84: 565-589.



- [32] RAHMATI S, ZUNIGA A, JODOIN B, et al. Deformation of Copper Particles upon Impact: A Molecular Dynamics Study of Cold Spray[J]. *Computational Materials Science*, 2020, 171: 109219.
- [33] BAE G, XIONG Y, KUMAR S, et al. General Aspects of Interface Bonding in Kinetic Sprayed Coatings[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(17): 4858-4868.
- [34] MENG F C, YUE S, SONG J. Quantitative Prediction of Critical Velocity and Deposition Efficiency in Cold-Spray: A Finite-Element Study[J]. *Scripta Materialia*, 2015, 107: 83-87.
- [35] SCHMIDT T, GARTNER F, ASSADI H, et al. Development of a Generalized Parameter Window for Cold Spray Deposition[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(3): 729-742.
- [36] WONG W, VO P, IRISSOU E, et al. Effect of Particle Morphology and Size Distribution on Cold-sprayed Pure Titanium Coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2013, 22(7): 1140-1153.
- [37] HEMEDA A A, ZHANG C, HU X Y, et al. Particle-based Simulation of Cold Spray: Influence of Oxide Layer on Impact Process[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 37: 101517.
- [38] LI C J, WANG H T, ZHANG Q, et al. Influence of Spray Materials and Their Surface Oxidation on the Critical Velocity in Cold Spraying[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, 19(1/2): 95-101.
- [39] KANG K, YOON S, JI Y, et al. Oxidation Dependency of Critical Velocity for Aluminum Feedstock Deposition in Kinetic Spraying Process[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 486(1/2): 300-307.
- [40] YIN S, WANG X, LI W, et al. Deformation Behavior of the Oxide Film on the Surface of Cold Sprayed Powder Particle[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 259: 294-300.
- [41] SCHMIDT T, ASSADI H, GARTNER F, et al. From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, 18(56): 794-808.
- [42] BINDER K, GOTTSCHALK J, KOLLEND M, et al. Influence of Impact Angle and Gas Temperature on Mechanical Properties of Titanium Cold Spray Deposits[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, 20(1/2): 234-242.
- [43] LOKE K, ZHANG Z Q, NARAYANASWAMY S, et al. Residual Stress Analysis of Cold Spray Coatings Sprayed at Angles Using Through Thickness Neutron Diffraction Measurement[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2021, 30(7): 1810-1826.
- [44] MATEJICEK J, SAMPATH S. Intrinsic Residual Stresses in Single Splats Produced by Thermal Spray Processes[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(11): 1993-1999.
- [45] SHAYEGAN G, MAHMOUDI H, GHELICHI R, et al. Residual Stress Induced by Cold Spray Coating of Magnesium AZ31B Extrusion[J]. *Materials & Design*, 2014, 60: 72-84.
- [46] GHELICHI R, MACDONALD D, BAGHERIFARD S, et al. Microstructure and Fatigue Behavior of Cold Spray Coated Al5052[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(19): 6555-6561.
- [47] SPENCER K, LUZIN V, MATTHEWS N, et al. Residual Stresses in Cold Spray Al Coatings: the Effect of Alloying and of Process Parameters[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 206(19/20): 4249-4255.
- [48] GUO J, FU H, PAN B, et al. Recent Progress in Residual Stress Measurement Methods: A Review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(2): 54-78.
- [49] 杜畅, 张津, 连勇, 等. 激光增材制造残余应力研究现状[J]. *表面技术*, 2019, 48(1): 200-207.
- DU C, ZHANG J, LIAN Y, et al. Research Progress on Residual Stress in Laser Additive Manufacturing[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(1): 200-207.
- [50] LUZIN V, KURODA S, YIN S, et al. Advanced Residual Stress Analysis in Thermal Spray and Cold Spray Processes[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, 29(6): 1211-1217.
- [51] ROSSINI N S, DASSISTI M, BENYOUNIS K Y, et al. Methods of Measuring Residual Stresses in Components[J]. *Materials & Design*, 2012, 35: 572-588.
- [52] MATEJICEK J, SAMPATH S, GILMORE D, et al. In Situ Measurement of Residual Stresses and Elastic Moduli in Thermal Sprayed Coatings: Part 2: Processing Effects on Properties of Mo Coatings[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(3): 873-885.
- [53] WANG Q, LUO X T, TSUTSUMI S, et al. Measurement and Analysis of Cold Spray Residual Stress using Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 35: 101296.
- [54] ZHANG Z C, LIU Z Q, ZHAO J F, et al. Numerical Analysis of Residual Stresses Induced by Cold Spray Fabricating CBN-reinforced Ni Matrix Composites[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 467: 129672.
- [55] LIU J W, BOLOT R, COSTIL S, et al. Residual Stresses and Final Deformation of an Alumina Coating: Modeling and Measurement[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 268: 241-246.
- [56] BANSAL P, SHIPWAY P H, LEEN S B. Residual Stresses in High-Velocity Oxy-Fuel Thermally Sprayed Coatings-Modelling the Effect of Particle Velocity and Temperature during the Spraying Process[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55: 5089-5101.
- [57] ABUBAKAR A A, ARIF A F M, AL-ATHEL K S, et al. Modeling Residual Stress Development in Thermal Spray Coatings: Current Status and Way Forward[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26(6): 1115-1145.
- [58] TOTEMEIER T C, WRIGHT J K. Residual Stress Determination in Thermally Sprayed Coatings—A Comparison of Curvature Models and X-Ray Techniques[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 200(12/13): 3955-3962.
- [59] ARABGOL Z, ASSADI H, SCHMIDT T, et al. Analysis of Thermal History and Residual Stress in Cold-Sprayed Coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, 23(1/2): 84-90.
- [60] LIN E Q, NAULT I, CHAMPAGNE V K, et al. Analysis of Interface Fracture of Cold-Sprayed Coatings Due to Thermal Cycling[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, 29(1/2): 158-172.