

基于稳定最大应变的冷喷涂粒子临界速度预测^{*}

王非凡, 李文亚, 余 敏

(西北工业大学 材料学院, 西安 710072)

摘 要: 利用 ABAQUS 显式有限元分析软件, 对冷喷涂铜粒子与铜基体的碰撞过程进行了欧拉法数值分析。结果表明, 欧拉模型可有效模拟冷喷涂粒子碰撞变形行为, 粒子撞击基体形貌的模拟结果与试验观察吻合较好。在不同碰撞速度下, 最大等效塑性应变均会快速上升并达到各自稳定值, 并且在 290~400 m/s 内稳定等效应变最大值基本不变, 但随着粒子速度增加, 粒子扁平化程度、与基体结合面积与金属射流量均明显增加。最后, 结合金属射流形貌与等效塑性应变稳定最大值的变化规律, 提出了一种冷喷涂粒子临界速度预测的新方法, 计算获得了 20 μm 铜粒子冷喷涂临界速度约为 290 m/s。

关键词: 冷喷涂; 数值模拟; 欧拉法; 临界速度

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2012)06-0096-05

Prediction of Critical Velocity in Cold Spraying Based on Numerically Calculated Steady Maximum Equivalent Plastic Strain

WANG Fei-fan, LI Wen-ya, YU Min

(School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: An Eulerian method available in the ABAQUS software is used to simulate the impact process of cold sprayed copper particle on copper substrate. Results show that the simulated cross-sectional shapes after impact are quite comparable to the experiments, which indicates that the developed Eulerian method can effectively investigate the cold spraying process. A steady maximum equivalent plastic strain is found at various impact velocities and almost keeps constant at the impact velocity from 290 m/s to 400 m/s. The increasing impact velocity aggravates particle flattening and enlarges the jet formation from both the particle and substrate materials. After understanding the effect of impact velocity on the steady maximum PEEQ and the jet formation, an effective approach for predicting the critical velocity in cold spraying is proposed. The calculated critical velocity achieving to jet formation is 290 m/s.

Key words: cold spraying; finite element analysis; eulerian method; critical velocity

0 引 言

冷喷涂是一种采用高压气体通过 Laval 喷嘴产生的超音速气流(300~1000 m/s)加速粉末粒子(直径 5~100 μm)撞击基体制备涂层的技术。由于喷涂过程中颗粒不易产生氧化、相变、脱碳、组织变化等问题, 冷喷涂研究受到了广泛关注^[1]。冷喷涂层制备过程中, 粒子速度是其最重

要的工艺参数之一, 只有超过临界速度(Critical velocity: V_{cr}), 粒子与基体才会经过局部塑性变形并形成紧密的机械与冶金结合。当粒子速度过低时, 粒子难以发生变形结合, 而当粒子速度过高时又会造成强烈的冲蚀作用, 因此临界速度研究对粒子碰撞行为及其沉积效率具有重要意义^[2]。

收稿日期: 2012-09-09; **修回日期:** 2012-11-21; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51005180); 霍英东教育青年教师基金(131052); 凝固技术国家重点实验室自主课题(69-QP-2011)

作者简介: 王非凡(1987—), 男(汉), 江西九江人, 博士生; **研究方向:** 摩擦焊与冷喷涂

网络出版日期: 2012-11-28 16:52; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20121128.1652.018.html>

引文格式: 王非凡, 李文亚, 余敏. 基于稳定最大应变的冷喷涂粒子临界速度预测 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 96-100.

粒子临界速度的试验研究表明,不同材料粒子临界速度显著不同^[2],而同种材料粒子表面氧化状态^[3,4]、粒子尺寸和温度^[5]亦均会对临界速度产生重要影响。由于冷喷涂粒子临界速度受试验条件影响较大,且无法观察粒子碰撞变形行为,数值模拟方法已被研究者逐步采用并获得了与试验粒子沉积形貌较吻合的模拟结果^[6-8]。Assadi 等人^[6]基于拉格朗日法模拟分析,首次指出局部绝热剪切失稳(Adiabatic shear instability, ASI)是冷喷涂粒子与基体形成良好结合的重要前提。Grujicic 等人^[7]指出粒子临界速度与发生剪切失稳密切相关。Bae 等人^[9]则利用碰撞界面局部温度突变区域宽度阐述了冷喷涂结合机理。Schmidt 等人^[5]和李文亚^[10]采用拉格朗日法的单元删除模型研究单个粒子碰撞沉积行为,模拟变形与试验结果吻合较好。虽然拉格朗日法已被广泛用于研究碰撞变形、温度场、应力应变场及 ASI 现象,但是算法本身具有无法避免网格畸变造成的计算误差的重要缺陷。为弥补这一缺陷,任意拉格朗日欧拉法^[3,8],光滑粒子法^[11]和欧拉法^[12]先后被开发用于冷喷涂研究,其中欧拉法在超高速碰撞^[13]和喷涂^[14]的应用已取得了较好的效果,然而模拟结果难以界定温度与应变的突变区域^[6,12],这使得临界速度的预测陷入困境。

文中通过建立冷喷涂碰撞的欧拉模型,分析碰撞塑性应变与金属射流形成的变化规律,研究冷喷涂粒子碰撞行为,提出冷喷涂粒子临界速度预测的新方法。

1 计算模型

1.1 欧拉模型建立

采用显式有限元分析软件 ABAQUS 欧拉算法模拟单个铜粒子撞击铜基体的碰撞行为。球形粒子直径为 20 μm ,圆柱基体半径为 80 μm ,高 60 μm 。由于 ABAQUS 软件不支持二维空间的欧拉算法,因此将模型扩展为厚度 1 μm 的欧拉空间,模型如图 1 所示。

根据粒子对称性,计算采用 1/2 模型有效降低了计算成本。网格划分采用 EC3D8R 单元,由于网格尺寸对碰撞的模拟具有一定的影响^[6-9],文中采用较小网格尺寸为 0.2 μm ,在保证较好计算精度的基础上,节约了计算时间。

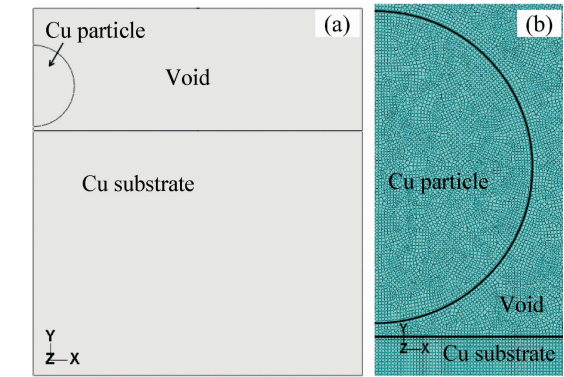


图 1 有限元模型示意(a)及局部网格划分(b)
Fig. 1 Geometry model (a) and the local meshing (b)

1.2 材料模型与设置

基于冷喷涂碰撞过程的高速大变形、应变率大及局部剪切温升等特点,粉末粒子与基体材料均采用考虑应变强化、应变率强化和热软化效应的 Johnson-Cook 塑性本构模型^[15],材料流变应力 σ 可表示为:

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

式中 $\dot{\epsilon}^*$ 、 T^* 分别为应变率项和温度项,参数 A、B、n、C 和 m 均为与材料相关的常数,表 1 所示为模拟采用的值^[9]。计算采用密度可压缩线性 Eos-Gruneisen 材料状态方程。本研究将粒子与基体碰撞过程视作绝热碰撞过程,塑性变形功热转化系数为 90%,初始温度为室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 模拟采用的材料参数^[9]

Table 1 Properties of materials used in simulation ^[9]		
Parameters	Cu	20 steel
Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	8960	7830
Specific heat/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	383	477
Melting point/ $^{\circ}\text{C}$	1083	1520
Young's modulus/GPa	124	202
Possion ratio	0.34	0.3
JC: A/MPa	90	492
B/MPa	292	210
n	0.31	0.26
C	0.025	0.014
m	1.09	1.03
EOS: C_0	3940	4596
S	1.49	1.92
Γ_0	2.02	1.67

2 模型验证及结果讨论

2.1 实验验证

为验证所建立的欧拉模型,研究对比了直径 20 mm 铜颗粒撞击 20 号钢基体的模拟与试验^[5]结果。

图 2 所示为不同碰撞速度下,粒子与基体撞击截面形貌对比。当粒子速度为 350 m/s 时(图

2(a₂)),基体变形较小而粒子本身扁平化程度也较低。随着碰撞速度增大(图 2(b₂)),粒子与基体结合面明显增大,碰撞界面形成非连续金属射流,形成较好结合涂层。当粒子速度进一步增加时,如图 2(c₂)和 2(d₂),碰撞难以沉积形成涂层,最终基体产生冲蚀形成弹坑。从图 2 中可以看出,模拟结果与试验结果吻合较好,因此所建立的欧拉模型可较好模拟冷喷涂粒子撞击过程。

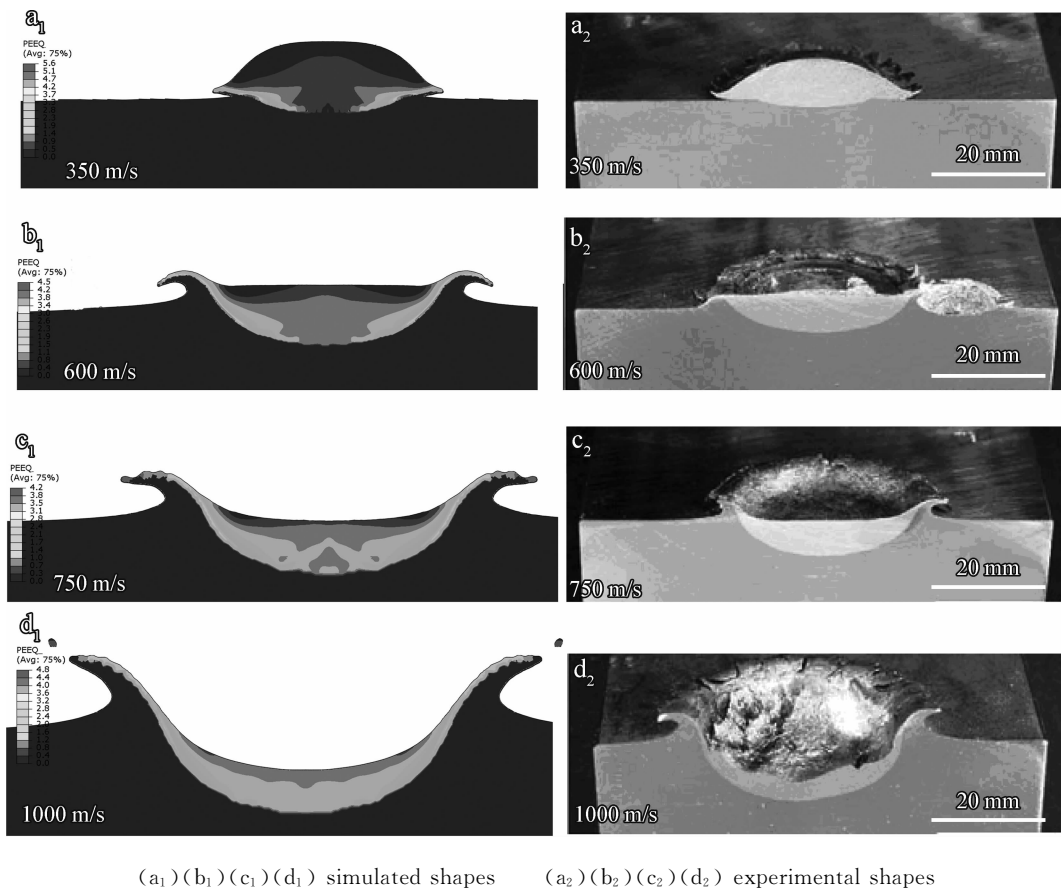


图 2 不同速度铜粒子撞击 20 钢模拟与试验^[5]形貌对比

Fig. 2 Comparison of simulated and experimental^[5] shapes of Cu impacting on 20 steel at different velocities

2.2 碰撞变形与临界速度分析

2.2.1 基于欧拉法粒子碰撞过程

图 3 所示为 20 μm 铜粒子以 400 m/s 速度撞击铜基体不同时刻等效塑性应变云图。从图中可以看出,随着粒子的不断扁平化与基体塑性变形,粒子与基体结合面积不断增加,并在结合面边缘快速挤出金属射流。在 30~50 ns 时间内射流形貌基本不变,但粒子继续扁平化并且基体也发生了明显塑性变形。根据等效塑性应变(PEEQ)的分布可以看出,高应变区主要集中在粒子与基体碰撞界面处,碰撞结束分布在金属射

流及碰撞界面外边缘附近。

图 4 所示为 20 μm 铜粒子以不同速度撞击铜基体后等效塑性应变云图。从图 4(a)和 4(b)中可以看出碰撞速度低于 280 m/s 时没有形成金属射流而且最大 PEEQ 区域完全包裹在粒子与基体碰撞界面之间。这意味着碰撞变形将被完全阻塞在接触界面内部,而且这种碰撞闭界面内部将可能形成一股强烈的“反弹力”,最终导致粒子脱落形成弹坑^[6,16]。因此,在 280 m/s 以下的碰撞速度下无法形成有效金属射流,将不满足粒子碰撞结合条件。

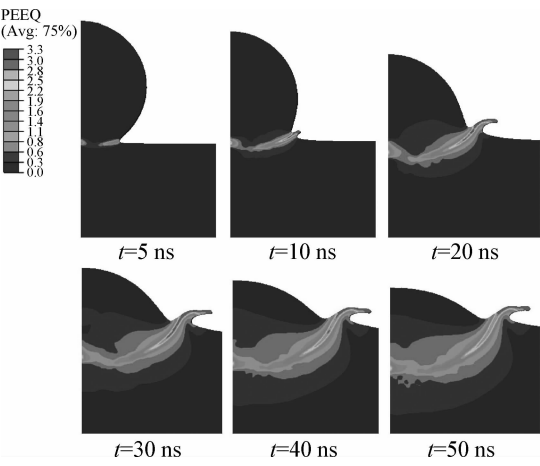
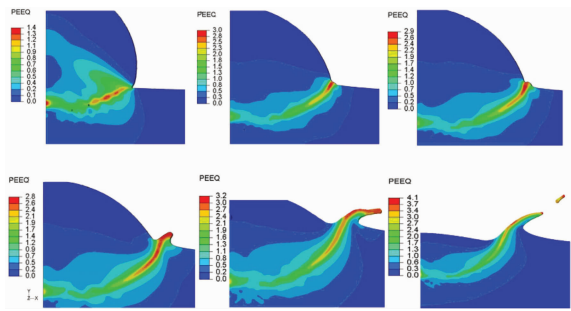


图 3 20 μm 铜粒子以 400 m/s 速度撞击铜基体等效塑性应变演变云图

Fig. 3 Contours of PEEQ during impacting of a 20 μm Cu particle upon a Cu substrate at velocity of 400 m/s



(a) 200 m/s (b) 280 m/s (c) 290 m/s (d) 330 m/s (e) 400 m/s (f) 600 m/s

图 4 20 μm 铜粒子以不同速度撞击铜基体等效应变云图
Fig. 4 Contours of PEEQ after impacting of a 20 μm Cu particle upon a Cu substrate at different velocities

当碰撞速度为 290 m/s 时,由粒子和基体材料混合的微小挤出变形开始形成(图 4(c))。随着粒子速度不断增大(290~400 m/s),粒子扁平化程度迅速增大,金属射流不断增加。这意味着粒子与基体间将形成更多的新鲜金属从而增强二者结合性能。当碰撞速度进一步增大时,如图 4(f)所示,金属射流将形成不连续的金属飞溅。这意味着过高的碰撞速度将导致粒子对基体的剧烈冲蚀作用。由于冷喷涂粒子与基体碰撞结合是碰撞界面塑性变形的结果,其结合过程与爆炸焊接非常相似,形成连续金属射流已被证明是界面结合的重要依据^[6,16]。因此从金属射流形貌分析,20 μm 铜粒子撞击铜基体的冷喷涂临界速度应在 290~330 m/s 之间,这与 Li 等人^[3]

基于 ASI 理论模拟和试验研究结果非常接近。

2.2.2 基于欧拉法的临界速度分析

图 5 分别展示了 200、300、400、500 和 600 m/s 速度下 20 μm 铜粒子与基体碰撞塑性变形 PEEQ 最大值随时间的变化关系。从图中可以看出,不同粒子速度下,碰撞 PEEQ 最大值均快速达到各自稳定值。这表明 PEEQ 最大稳定值与粒子碰撞速度密切相关,以下将通过欧拉法 PEEQ 最大稳定值分析冷喷涂临界速度。

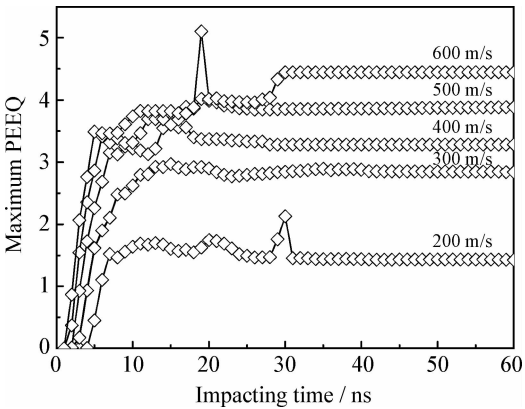


图 5 不同速度下铜粒子撞击铜基体 PEEQ 最大值演变
Fig. 5 Evolution of maximum PEEQ of Cu particle impacting upon Cu substrate at different velocities

图 6 给出了稳定最大 PEEQ 随碰撞粒子速度的变化规律。从图中可以看出,当粒子速度低于 290 m/s 时,稳定最大 PEEQ 随速度的增大迅速增大。当粒子速度为 290~400 m/s 时,PEEQ 最大稳定值呈现小平台,这意味着高速变形界面附近材料热软化效应与塑性变形硬化达到并基

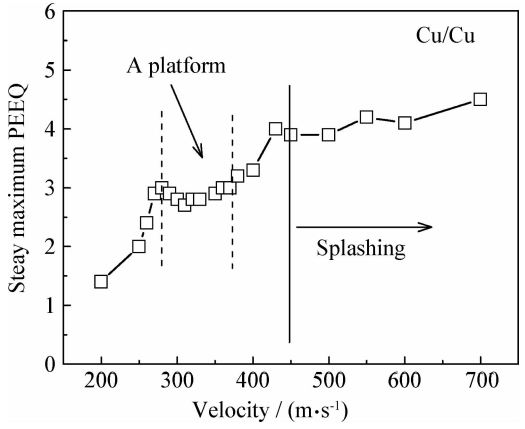


图 6 不同速度下 20 μm 铜粒子撞击铜基体后等效应变稳定最大值变化
Fig. 6 Effect of impact velocity on the steady maximum PEEQ of a 20 μm Cu particle impacting upon a Cu substrate

本保持了动态平衡。随着粒子速度继续增大(大于 400 m/s),稳定最大 PEEQ 急剧增大并形成非连续飞溅。综合以上分析,研究提出了利用 Euler 模拟的稳定最大 PEEQ 预测冷喷涂临界速度的新方法,并且 20 μm 铜粒子与铜基体冷喷涂临界速度为 290 m/s。

3 结 论

(1) 欧拉法可较好模拟冷喷涂粒子碰撞变形过程,计算得到的铜粒子冷喷涂形貌与实验观察吻合很好。

(2) 在不同碰撞速度下,最大等效塑性应变均会快速上升并达到各自稳定值,并且在 290~400 m/s 内稳定等效应变最大值基本不变。

(3) 利用等效塑性应变的变化规律可有效预测冷喷涂粒子临界速度,计算得到 20 μm 铜粒子撞击铜基体的临界速度约为 290 m/s。

参考文献

- [1] Papyrin A. Cold spray technology [J]. *Advanced Material Processes*, 2001, 159(9): 49-51.
- [2] Moy C K S, Cairney J, Ranzi G, et al. Investigating the microstructure and composition of cold gas-dynamic spray (CGDS) Ti powder deposited on Al 6063 substrate [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 204(23): 3739-49.
- [3] 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): 2852-62.
- [4] Bu H Y, Yandouzi M, Lu C, et al. Effect of heat treatment on the intermetallic layer of cold sprayed aluminum coatings on magnesium alloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 205(19): 4665-71.
- [5] Schmidt T, Gartner F, Assadi H, et al. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition [J]. *Acta Materials*, 2006, 54(3): 729-742.
- [6] Assadi H, Gartner F, Stoltenhoff T, et al. Bonding mechanism in cold gas spraying [J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(15): 4379-94.
- [7] Grujicic M, Zhao C L, DeRosset W S, et al. Adiabatic

shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process [J]. *Materials and Design*, 2004, 25(8): 681-688.

- [8] Li W Y, Liao H L, Li C J, et al. Numerical simulation of deformation behavior of Al particles impacting on Al substrate and effect of surface oxide films on interfacial bonding in cold spraying [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(11): 5084-90.
- [9] Bae G, Xiong Y, Kumar S, et al. General aspects of interface bonding in kinetic sprayed coatings [J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(17): 4858-68.
- [10] 李文亚. 冷喷涂粒子碰撞行为三维有限元热力耦合分析 [J], *中国表面工程*, 2009, 22(3): 31-37.
- [11] 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): 3725-34.
- [12] 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): 1032-41.
- [13] Beissel S R, Gerlach C A, Johnson G R. Hypervelocity impact computation with finite elements and meshfree particles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1/2): 80-90.
- [14] Khoei A R, Azami A R, Anahid M, et al. A three-invariant hardening plasticity for numerical simulation of powder forming processes via the arbitrary Lagrangian-Eulerian FE model [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, 66(5): 843-877.
- [15] Li W Y, Gao W. Some aspects on 3D numerical modeling of high velocity impact of particles in cold spraying by explicit finite element analysis [J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(18): 7878-92.
- [16] Li W Y, Guo X P, Yu M, et al. Investigation of impact behavior of cold-sprayed large annealed copper particles and characterization of coatings [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, 20(1/2): 252-259.

作者地址: 西安市友谊西路 127 号公宇楼 413 室 710072
西北工业大学材料学院
Tel: (029) 8849 5226
E-mail: liwy@nwpu.edu.cn; wangifw@hotmail.com