

# 冷动力喷涂法制备钨和钨合金涂层 及其涂层的计算模拟\*

张小锋<sup>1)2)</sup> 葛昌纯<sup>1)†</sup> 李玉杰<sup>1)</sup> 郭双全<sup>3)</sup> 刘维良<sup>1)2)</sup>

1) (北京科技大学材料科学与工程学院核材料研究所, 北京 100083)

2) (景德镇陶瓷学院材料科学与工程学院, 景德镇 333000)

3) (西南交通大学材料科学与工程学院, 成都 610031)

(2011年8月2日收到; 2011年9月7日收到修改稿)

采用冷动力喷涂法以纯钨和钨-镍-铁合金为原料在铜合金基体上制备了钨涂层和钨-镍-铁涂层. 研究了冷喷涂过程中钨粉粒径、喷涂距离等因素对涂层性能的影响. 用扫描电子显微镜分析了涂层的表面、断面微观结构, 并用原子力显微镜测量了涂层的粗糙度. 此外, 计算了冷喷涂过程中粉末颗粒的实际速度, 并采用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 模拟了冷喷涂过程中颗粒撞击基体时的变形情况.

**关键词:** 钨涂层, 钨-镍-铁涂层, 冷喷, 沉积机理

**PACS:** 02.60.Pn, 02.70.Dh, 06.60.Ei, 28.52.Fa

## 1 引言

冷动力喷涂是一种完全不同于热喷涂的涂层技术, 它使高压气体通过 Laval 喷嘴产生超音速流动, 将粉末粒子送入超音速中加速形成射流, 以高的速度撞击基体形成涂层. 在粒子撞击基体的过程中产生很大的塑性变形, 高速粒子撞击基体是形成涂层还是产生喷丸效应或冲蚀效应取决于粒子的临界速度, 当粒子的速度超过临界速度时, 粒子对基体的作用由冲蚀变为沉积. 冷动力喷涂与热喷涂沉积涂层的原理不同, 与热喷涂相比冷动力喷涂有以下几个特点: 1) 冷喷涂过程中粒子加热温度低, 涂层不容易产生氧化、脱碳、相变、晶粒长大、组织变化等问题而且涂层残余应力低; 2) 喷涂效率较高, 粉末可以回收利用; 3) 设备相对简单、维修容易. 目前冷动力喷涂可以沉积的金属有 Cu, Al, Zn, Ni, Ca, Ti, Ag, Co, Fe, Nb, Co 等; 合金有 NiCr, MCr, AlY 等; 高硬度金属陶瓷有  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , WC 等; 陶瓷氧化物  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  等<sup>[1]</sup>.

在冷动力喷涂过程中影响涂层性能的一个重要因素是粉末粒子本身的弹性模量. 对于一些弹性模量小的金属粒子可在基体上制备出厚涂层甚至块体材料如 Cu, Al 等, 而对于高弹性模量的粉体如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  等则很难制备出厚涂层. 目前国内外一直在研究高弹性模量金属粒子的冷动力喷涂如 W, Mo 的喷涂, 纯的高弹性模量金属粒子很难在基体上形成有效的沉积, 因为高弹性模量金属粒子在喷涂过程中产生塑性变形小, 另外像 W ( $19.3 \text{ g/cm}^3$ ) 等金属的密度大, 在喷涂过程中加速比较困难, 较难达到它的临界速度. 一般来说密度越小的颗粒越容易获得更高的速度, 进而得到致密的涂层<sup>[2]</sup>. 针对钨高弹性模量的特点, 有学者采用制备复合粉体的方法进行冷动力喷涂, 通过高弹性模量的粒子与低弹性模量粒子复合, 如 Hyun-Ki Kang 等<sup>[3]</sup> 通过制备 W/Cu 复合粉体来进行冷动力喷涂. 而目前采用冷喷制备纯钨及钨-镍-铁合金涂层未见文献报道.

W 涂层在核聚变中有着很大的应用前景, W-

\* 聚变堆面向等离子体材料的基础研究项目 (批准号: 2010GB109000) 资助的课题.

† E-mail: ccge@mater.ustb.edu.cn

Ni-Fe 高比重合金涂层在国防工业中应用潜力也很大. 基于以上原因, 本文的研究目的是探究通过冷动力喷涂法制备纯钨、钨 - 镍 - 铁合金涂层的可行性, 分析不同喷涂因素对涂层性能的影响, 计算冷动力喷涂中钨颗粒的实际速度, 是否能大于它的临界速度从而形成有效的沉积, 并采用有限元分析软件对粉末颗粒变形进行模拟.

## 2 实验

### 2.1 实验材料及仪器设备

本实验所用的冷喷涂钨粉按粒径分为 3 种,  $D_{50}$  分别为  $0.8\ \mu\text{m}$ ,  $2\ \mu\text{m}$ ,  $5\ \mu\text{m}$ , 钨粉的微观形貌见图 1, 化学成分见表 1. 钨 - 镍 - 铁合金粉末由实验室自制,  $D_{50}$  为  $4\ \mu\text{m}$ , 见图 1(d).

本实验采用美国 KM-CDS 公司冷动力喷涂设备, 在铜合金基体上进行冷喷钨和钨 - 镍 - 铁合金粉末, 工作气体为 He. 采用 LEO-1450(British) 型带有背散射和能谱分析 (energy dispersive spectrum, EDS) 的扫描电镜 (SEM) 观察和分析涂层表面、断面的微观结构形貌. 采用 Veeco's nanoscope V 型原子力显微镜 (AFM) 观察涂层表面的三维形

貌及测量表面的平均粗糙度和最大粗糙度.

表 1 原始钨粉的化学成分

| 元素 | 成分/%   | 元素 | 成分     |
|----|--------|----|--------|
| W  | 99.96  | S  | —      |
| O  | 0.063  | Fe | 0.0116 |
| Cu | 0.0001 | Al | 0.0004 |
| P  | 0.0005 | C  | 0.0022 |

### 2.2 实验方法

在使用纯钨和钨 - 镍 - 铁合金粉末进行冷喷之前要对其进行真空烘干防止假团聚, 烘干后过筛, 再把粉末放入送粉器中, 然后设置喷涂参数进行冷喷. 在冷喷之间要对样品进行喷砂处理并丙酮清理表面.

本实验中冷喷基体为铜合金, 实验参数如表 2 所示. 在喷涂中工作气体为氦气, 气体温度在  $200\text{—}280\ \text{°C}$  之间变化, 气体压力为  $0.65\ \text{MPa}$  左右, 喷涂距离在  $10\text{—}20\ \text{mm}$  之间变化. 冷喷过程中, 气体温度对涂层的性能影响较大, 喷涂时气体升温的主要目的不是为了升高粒子的温度而是为了使气体膨胀, 从而使粒子获得更大的速度, 提高气体温度对提高粒子速度的作用十分明显 [5].

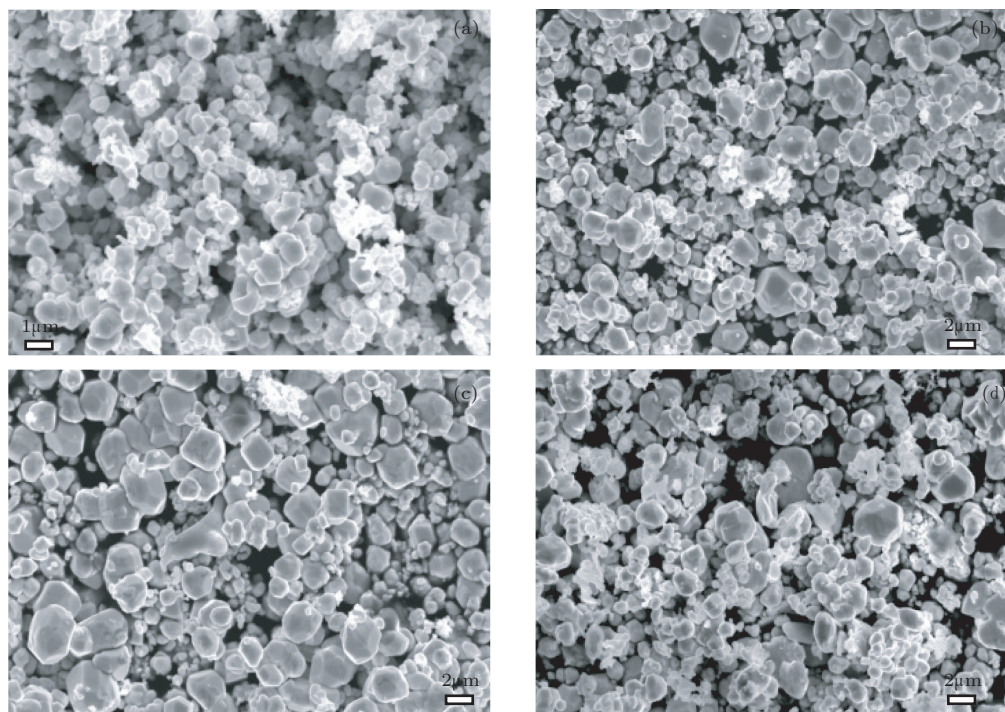


图 1 不同粉末的微观形貌

图 2 为 KM-CDS 冷动力喷涂系统的示意图, 该系统由高压系统、气体调节控制系统、气体温度控制系统、送粉系统和喷枪系统五部分组成. 高压气体经由气体调节系统分别供给气体预热系统和送粉系统, 经过预热后的气体与送粉气体分别送入 Laval 喷枪. 其中该设备为气体一次加热, 气体通过一次加热后温度可达到  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右. 颗粒由高速气流加速后撞击到基体上发生塑性变形形

成沉积. 最后喷涂好的涂层再通过不同的检测进行性能分析.

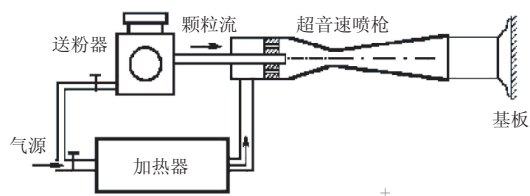


图 2 KM-CDS 系统示意图

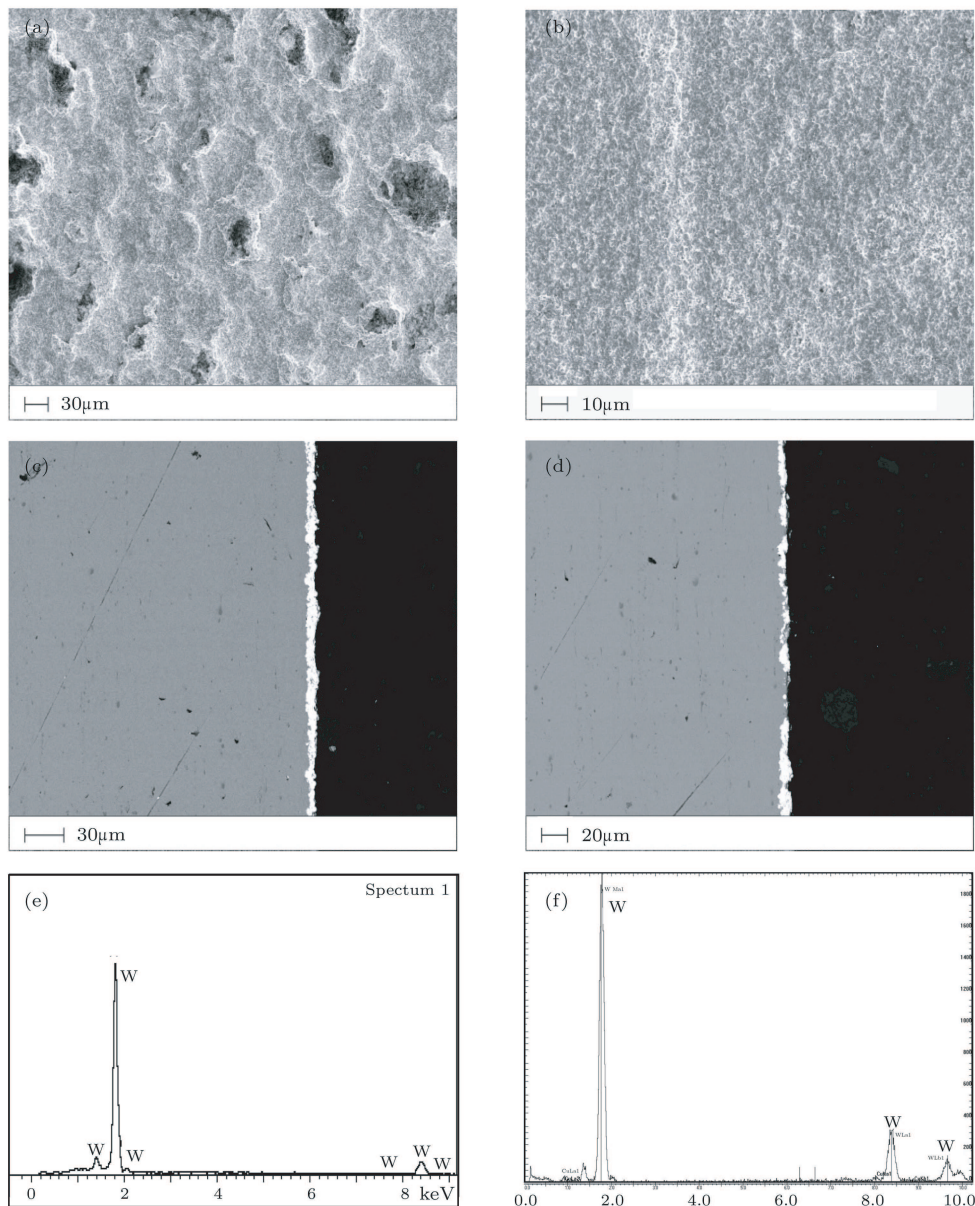


图 3 钨涂层的表面 SEM 图和能谱 (a)  $D_{50} 2\text{ }\mu\text{m}, 10\text{ mm}$ ; (b)  $D_{50} 2\text{ }\mu\text{m}, 15\text{ mm}$ ; (c)  $D_{50} 2\text{ }\mu\text{m}, 15\text{ mm}$ ; (d)  $D_{50} 7\text{ }\mu\text{m}, 15\text{ mm}$ ; (e),(f) 为 (c),(d) 涂层的 EDS

表 2 KM-CDS 冷动力喷涂实验参数

|   | 材料      | 颗粒尺寸/ $\mu\text{m}$ | 喷涂距离/mm | 压力/MPa | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 粒子速度/(g/min) | Ar 气/slpm |
|---|---------|---------------------|---------|--------|------------------------|--------------|-----------|
| 1 | W       | 7                   | 15      | 0.625  | 200                    | 21.8         | 212       |
| 2 | W       | 5                   | 15      | 0.650  | 218                    | 13.3         | 423       |
| 3 | W       | 2                   | 10      | 0.642  | 224                    | 23.2         | 402       |
| 4 | W       | 2                   | 15      | 0.651  | 270                    | 21.0         | 400       |
| 5 | W       | 2                   | 20      | 0.650  | 269                    | 20.2         | 400       |
| 6 | W-Ni-Fe | 4                   | 20      | 0.650  | 200                    | 22.4         | 421       |
| 7 | W-Ni-Fe | 4                   | 15      | 0.648  | 220                    | 21.1         | 432       |
| 8 | W-Ni-Fe | 4                   | 12      | 0.652  | 270                    | 19.2         | 415       |
| 9 | W-Ni-Fe | 4                   | 10      | 0.650  | 271                    | 20.5         | 417       |

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 钨涂层的制备

##### 3.1.1 钨涂层的 SEM 微观结构分析

使用三种不同粒径的钨粉于不同的喷涂参数下在铜合金基体上进行了冷动力喷涂,钨涂层的微观结构如图 3 所示.在其他参数一致时,冷喷距离为 15 mm 比 10 mm 的涂层较好.涂层的致密度较好,孔洞较少,钨粉颗粒发生塑性变形大.在冷动力喷涂过程中,不同喷涂距离获得的涂层质量差异非常大,因为冷喷涂主要依靠颗粒的强塑性变形来沉积涂层.根据 Viecek 等<sup>[4]</sup>和 Gimore 等<sup>[5]</sup>的实验发现,颗粒经过喷枪后气体流速仍然高于粒子速度,气流对粒子仍然是一种拖曳作用,因此粒子将继续加速.如果喷涂距离较低时,气流在接触基体时产生的冲击波使颗粒方向发生偏转,最终颗粒在垂直基体方向的速度降低导致不能有效沉积.图 3(a),(b)分别为钨粉粒径  $D_{50}$  为  $2\mu\text{m}$ ,喷涂距离为 10,15 mm 的表面形貌.喷涂距离变化,钨涂层的

致密度等性能不同.

当仅考虑粉体粒径对涂层的影响时,粒径大的粉体经过 Laval 喷嘴获得的动能较小,在颗粒发生塑性变形小,不致密.颗粒的大小对喷涂的涂层有重要影响,颗粒越小越容易获得和工作气体一致的速度,然而由于颗粒较小它们动量较小,当颗粒撞击基体前很容易受到基体表面激波的影响从而最终影响涂层的性能.而如果颗粒较大虽然可以克服基体激波,但它在气体速流中很难加速.图 3(c),(d)为钨粉  $D_{50}$  为 2,7  $\mu\text{m}$ ,喷涂距离为 15 mm 时的钨涂层的断面图.从图中可看当钨粉在  $D_{50}$  为  $2\mu\text{m}$  时涂层较均匀、致密,基体上已经形成了一层致密的连续的涂层厚度在  $2\mu\text{m}$  左右,钨粉在基体形成了有效的沉积.冷喷温度低,对喷涂粒子和基体的热影响小,喷涂粒子没有明显氧化.图 3(e),(f)为图 3(c),(d)涂层的 EDS,从能谱分析可看出钨粉粒子在冷喷中没有明显氧化,涂层为纯钨涂层.相比其他制备钨涂层的方法,冷喷有利于钨涂层热导率的提高.

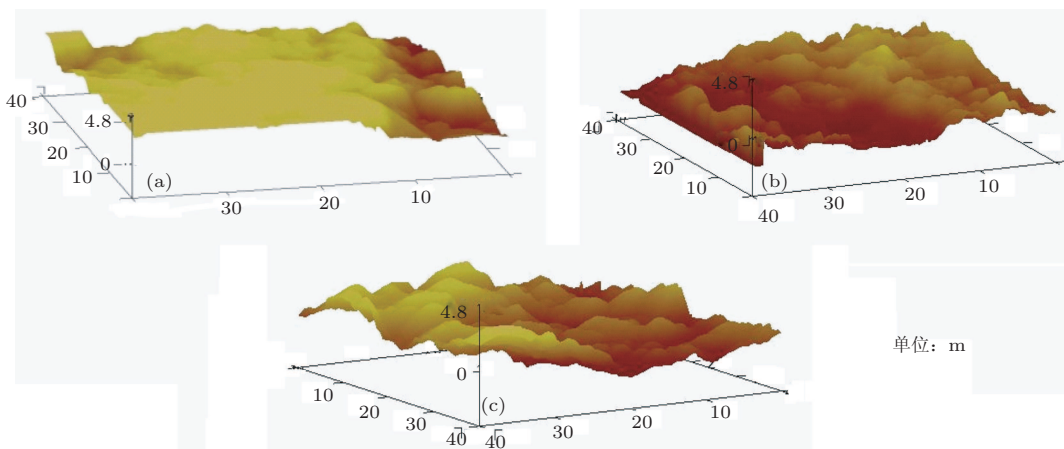


图 4 钨涂层的 AFM 三维图 (a)  $D_{50}$   $7\mu\text{m}$ , 15 mm; (b)  $D_{50}$   $5\mu\text{m}$ , 12 mm; (c)  $D_{50}$   $2\mu\text{m}$ , 15 mm

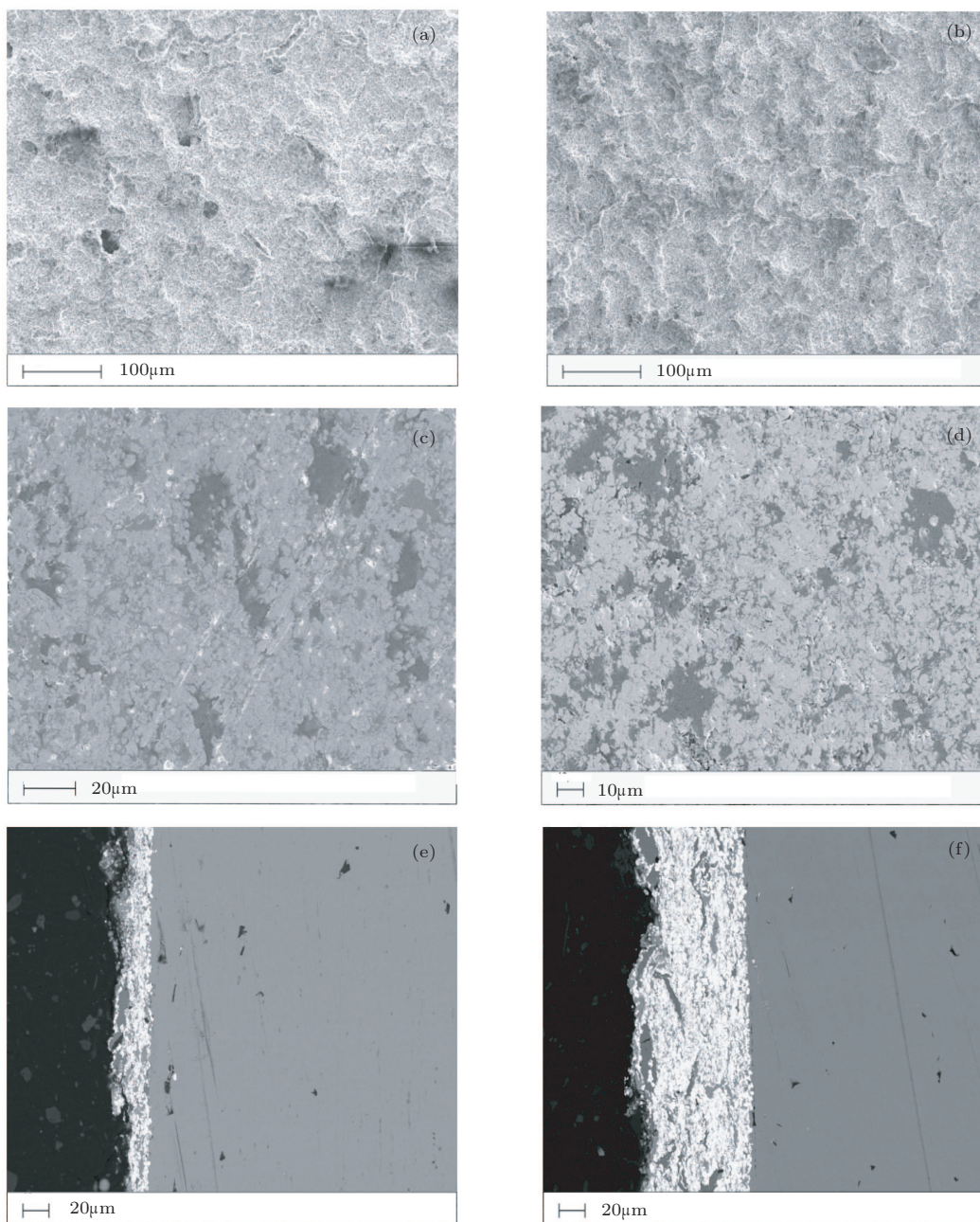
## 3.1.2 钨涂层的 AFM 分析

把  $D_{50}$  分别为 2, 5, 7  $\mu\text{m}$  的钨粉在冷喷距离为 15 mm 制备的钨涂层进行原子力显微镜分析, 其中显微镜表面扫描区域为  $40 \times 40 \mu\text{m}$ . 钨涂层的表面的三维形貌如图 4 所示, 同时测量了各个钨涂层的粗糙度, 见表 3. 从图 4(c) 中可看出  $D_{50}$  为 2  $\mu\text{m}$ , 冷喷距离为 15 mm 时, 涂层表面较平坦, 平均粗糙度和最大粗糙度分布为 0.48, 6.03  $\mu\text{m}$ . 通过 AFM

分析得出冷喷距离相同, 颗粒粒径不同对涂层的粗糙度有很大影响. 其他涂层的平均粗糙度和最大粗糙度见表 3, 图 4(a),(b) 粉末  $D_{50}$  分别为 7, 5  $\mu\text{m}$  的粗糙度.

表 3 不同钨涂层的粗糙度

| 粗糙度                          | (a)  | (b)  | (c)  |
|------------------------------|------|------|------|
| $R_a/\mu\text{m}$            | 0.74 | 0.64 | 0.48 |
| $R_{\text{max}}/\mu\text{m}$ | 6.34 | 4.59 | 6.03 |

图 5 钨涂层的表面、抛光后、断面 SEM 图 (a)  $D_{50}$  4  $\mu\text{m}$ , 20 mm; (b)  $D_{50}$  4  $\mu\text{m}$ , 12 mm

### 3.2 W-Ni-Fe 涂层的制备及 SEM 微观结构分析

W-Ni-Fe 合金为重合金, 该合金具有高硬度、高强度, 以及好的延展性和导热性能, 应用前景较好. 使用 W-Ni-Fe 合金粉末以不同的喷涂参数在铜合金基体上进行冷动力喷涂, 合金涂层的微观结构如图 5 所示.

图 5(a),(b) 中冷喷距离分别为 20, 12 mm 的 W-Ni-Fe 涂层表面形貌. 从图 5(a) 中可看出涂层表面粗糙、不致密且存在微孔, 较冷喷距离为 12 mm 的涂层相比性能较差, 实验结果表明距离对涂层的性能影响较大. 然后对涂层表面进行抛光处理后, 见 5(c),(d) 所示, 涂层孔隙率低, 涂层中 W-Ni-Fe 合金粉末颗粒结合紧密. 通过对抛光后的涂层表面用  $H_2O_2$  溶液进行腐蚀, 通过 SEM 分析得出粉末颗粒之间并存金属冶金结合和机械咬合<sup>[6]</sup>. 图 5(e),(f) 为图 5(a),(b) 涂层的断面 SEM 图, 厚度分布为 20, 80  $\mu\text{m}$  左右, 从断面图看出, 颗粒撞击基体时大部分颗粒发生了塑性变形成为扁平状, 扁平率较高, 扁平方向与基体平行, 各扁平状的合金颗粒咬合在一起.

### 3.3 冷动力喷涂中颗粒的速度计算

根据冷喷涂的原理, 普遍认为所有冷喷涂的材料必须达到或超过临界速度才可能形成涂层. 对于 W, W-Ni-Fe 合金颗粒, 要在铜合金基体上形成有效的沉积, 粉体颗粒的速度必须大于它的临界速度. Schmidt 等人<sup>[7]</sup> 提出以下公式计算冷动力喷涂中颗粒的临界速度:

$$v_{\text{crit}} = \sqrt{\frac{F_1 4\sigma_u \left(1 - \frac{T_i - T_R}{T_m - T_R}\right)}{\rho} + F_2 c_p (T_m - T_i)}, \quad (1)$$

其中,  $v_{\text{crit}}$  是粒子的临界速度,  $\sigma_u$  是材料抗拉强度, 单位是 Pa,  $T_i$  是粒子的初始温度,  $F_1$  和  $F_2$  是经验系数, 单位是 Pa,  $T_R$  是参考温度. Schmidt 等人选取不同种类的粉体材料, 取其平均粒度为 25  $\mu\text{m}$ , 计算了它们在冷喷涂过程中的临界速度, 计算值如图 6 所示. 从图中可看出钨颗粒的临界速度为 580 m/s 左右.

本文通过采用 Dykhuizen 等人<sup>[8]</sup> 推算的冷喷

过程中钨颗粒速度计算公式

$$v_p = -1 \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{1 + \frac{\gamma - 1}{2M^2}}}, \quad (2)$$

计算了实际喷涂过程中颗粒的实际速度, 其中当地马赫数  $M \approx 2.4$ , 为气体流速与当地音速 (常温、常压) 的比值; 比热率  $\gamma = C_p/C_v = 1.4$ ; 本实验工作气体为 He, 质量分数  $m$  为 20 g/mol; 比气体常数  $R = 8314.5/m = 415.7$ . 喷涂中, 工作气体 He 温度  $T_0$  在 473—573 K 之间. 最终把各未知数的值代入 (2) 式中算出钨粉颗粒在射流中的速度为 722.1—794.8 m/s. 喷涂中所使用的钨粉和钨 - 镍 - 铁粉颗粒均小于 25  $\mu\text{m}$ , 根据 Schmidt 等人计算的钨颗粒平均粒径为 25  $\mu\text{m}$  时, 临界速度为 580 m/s 左右, 因此可推算出冷喷涂实验中粉末颗粒的实际速度大于它的临界速度. 因此, 钨和钨 - 镍 - 铁颗粒可在铜合金基体上可形成有效的沉积.

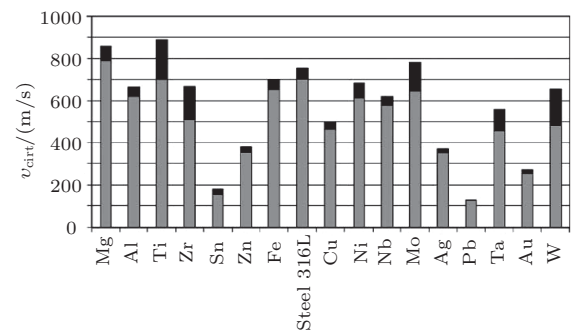


图 6 平均粒度为 25  $\mu\text{m}$  的各种粉体颗粒的临界速度值

### 3.4 冷动力喷涂中钨颗粒的变形模拟

在冷喷涂过程中, 涂层的堆积主要分为第一层的堆积和除第一层以外的堆积. 在冷喷涂过程中, 人们一直在探究涂层的沉积原理, 目前大部分都是通过软件模拟来研究. 对此, 本文主要模拟粉体颗粒与基体相互碰撞时, 颗粒的变形状况与速度的关系. 采用显式有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 进行模拟, 基于质量、动量与能量守恒等基本方程, 采用 Lagrange 法进行离散求解. 高速碰撞过程主要受惯性力的控制, 所以忽略重力等其他体积力的影响.

假设粉体颗粒以直径为 2  $\mu\text{m}$  的球体为主, 基体取圆柱体, 为了保证变形区计算精度, 基体半径和高度取值足够大, 采用二维对称几何模型进行

计算, 采用单点积分的节点二维四面体单元划分网格. 计算中, 图中所示的边界 A-B-C 为对称边界, 边界 C-D 和 D-E 为固壁, 而其他的边界则作为自由边界来处理, 网格划分和几何模型如 7(a) 所示.

模拟过程中, 采用 Johnson-Cook<sup>[9]</sup> 塑性模型、Gruneisen<sup>[10]</sup> 线性状态方程, 假设材料热物理性能各项同性. 各种模拟参数主要来自 LS-DYNA 材料库和其他参考资料<sup>[11]</sup>. 模拟结果如图 7, 图 7(b),(c),(d) 表示了不同速度 500, 600, 700 m/s 下粒子的变形情况, 从图中可以看出, 随着速度的增加, 颗粒的变形程度不一样. 在低速条件下, 随着速度的增加变形程度增加; 但是当速度高到一定程度时, 颗粒发生嵌入现象, 但没有出现颗粒碰撞铜合金基体时出现的射流状挤出物, 这主要是由于 W 颗粒的塑性差, 且密度高的缘故.<sup>[12,13]</sup> 当 600 m/s 时, 钨颗粒已经发生了塑性变形, 颗粒与基体的变形主要集中在接触界面附件而且最大应变值出现在接触区的边缘而不在碰撞中心. 由于局部的变形会使钨粉颗粒表面的氧化膜破坏, 引起发生颗粒间的结合加强从而形成涂层.

上文的模拟结果基本上与实验结果符合. 已

知 W 颗粒的临界速度为 580 m/s 左右, W 颗粒在实验过程中的速度为 722.1—794.8 m/s 之间. 通过模拟得出当直径为 2  $\mu\text{m}$  的 W 颗粒速度大于 600 m/s 时, W 颗粒能在基体上能发生塑性变形, 更高速度的 W 颗粒发生的塑性变形越大; 然后当 W 颗粒速度小于 600 m/s 时, W 颗粒几乎不发生塑性变形. 通过本文的实验验证以上这一结论, 当  $D_{50}$  为 2  $\mu\text{m}$  的 W 颗粒大于 600 m/s 时的确能在铜合金上发生塑性变形形成一层致密的涂层. 通过调整工艺使 W 颗粒速度变大时, W 颗粒的塑性变形率增大, 最终 W 涂层的致密度也有了提高; 如果 W 颗粒的实际速度没有达到它的临界速度, 则 W 颗粒很难在基体上形成有效的沉积.

对于 W-Ni-Fe 合金颗粒, 从理论上分析该合金的弹性模量比纯 W 低, 塑性变形率大, 因此在相应的速度下更容易在基体上沉积, 最终能制备出比纯 W 更厚的涂层. 这一结论同样在本文实验得到了证实, 通过实验表明利用 W-Ni-Fe 合金制备涂层, 厚度是纯 W 涂层的 4 倍左右; 同样当合金颗粒没达到它的临界速度时, W-Ni-Fe 合金则不能在基体上形成有效的沉积.

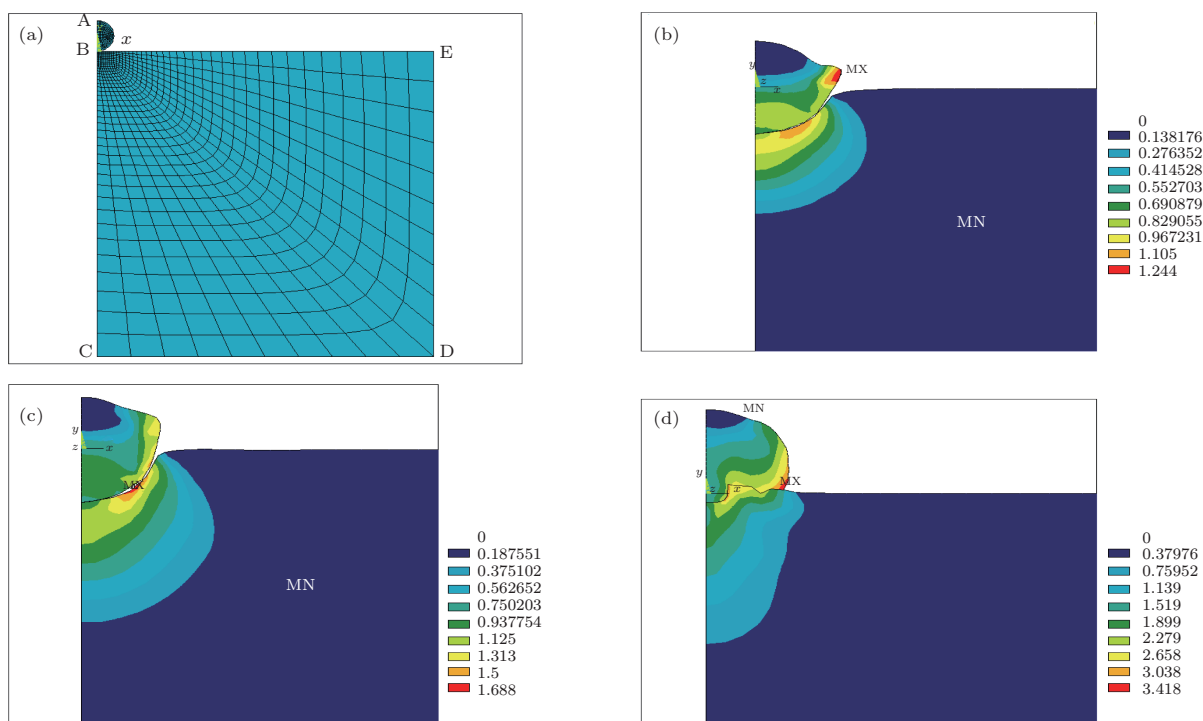


图 7 几何模型与网格划分 (a), 不同速度下钨颗粒与基体碰撞的变形模拟 ((b) 500 m/s, (c) 600m/s, (d) 700 m/s)

## 4 结论

对于冷喷涂的沉积机理目前还没有统一的认识,冷喷涂的沉积机理相当复杂,尤其是各种粉体颗粒的临界速度难确定.通过很多实验证实,采用 He 为工作气体才能在基体形成 W 颗粒的有效沉积,且工作气体温度 200—300 °C,距离 10—20 mm,气体压力 0.6 MPa 左右,钨粉粒

径  $D_{50}$  为 2  $\mu\text{m}$  时有利于钨涂层沉积.关于 W-Ni-Fe 合金粉体,采用冷喷的方法较易制备出厚的合金涂层.在影响涂层性能的因素中喷涂距离和气体温度对涂层性能起着重要作用.

在本文实验中得到了上海宝钢研究院前沿技术研究所张俊宝博士冷喷团队、北京理工大学宁先进博士、中科院沈阳金属所吴杰研究员在冷气动力喷涂制备钨和钨-镍-铁涂层方面的支持,在此表示感谢.

- 
- [1] Barnes N P, Rodriguez W J, Walsh B M 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 2872
- [2] Klinkovsv, Kosarev V F, Rein M 2005 *Aerospace Science & Technology* **9** 582
- [3] Hyun-Ki Kang, Suk Bong Kang 2003 *Scripta. Materials* **49** 1169
- [4] Vicek J, Huber H, Voggenreiter H 2001 *Thermal Spray* **21** 417
- [5] Gilmore D L 1999 *Journal of Thermal Spray Technology* **8** 578
- [6] Pu H Y, Lu C 2010 *Materials Engineering* **1** 94 (in Chinese) [卜恒勇, 卢晨 2010 材料工程 **1** 94]
- [7] Schmidt T, Gärtner F, Assadi H 2006 *Acta Materialia* **54** 729
- [8] Dykhuizen R C, Smith M F 1998 *Journal of Thermal Spray Technology* **7** 205
- [9] Zhang Q M, Liu Y, H F L 2006 *Dynamical Behavior of Materials* (Beijing, National Defense Industry Press) p134 (in Chinese) [张庆明, 刘彦, 黄风雷 2006 材料的动力学行为 (北京: 国防工业出版社) 第 134 页]
- [10] Shang X J, S J Y, Wang H F 2008 *ANSYS/LS-DYNA Analysis Method & Engineering Examples, Second* (Beijing: China's Water Conservancy and Hydropower Press) p231 [尚晓江, 苏建宇, 王化锋 2008 ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例, 第二版 (北京: 中国水利水电出版社) 第 231 页]
- [11] Lennon A M, Ramesh K T 2000 *Materials Science and Engineering A* **276** 9
- [12] Stoltenhoff T, Voyer J, Kreye H 2002 *Thermal Spray* **22** 366
- [13] Li W Y, Li C J, W Y Y, Yang G J 2005 *Acta. Metallurgica Sinica* **41** 282 (in Chinese) [李文亚, 李长久, 王豫跃, 杨冠军 2005 金属学报 **41** 282]

# Experimental study of tungsten and tungsten alloy coating produced by cold gas dynamic spray and tungsten particles calculation and simulation\*

Zhang Xiao-Feng<sup>1)2)</sup> Ge Chang-Chun<sup>1)†</sup> Li Yu-Jie<sup>1)</sup>  
Guo Shuang-Quan<sup>3)</sup> Liu Wei-Liang<sup>1)2)</sup>

1) (*Institute of Nuclear Materials, University of Science and Technology Beijing (USTB), Beijing 100083, China*)

2) (*School of Materials Science & Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333001, China*)

3) (*School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University (SWJTU), Chengdu 610031, China*)

(Received 2 August 2011; revised manuscript received 27 September 2011)

## Abstract

Results of optical microscopy, scanning electron microscopy, AFM are presented for tungsten coating produced by low and high cold gas dynamic spraying, respectively. The critical velocity of tungsten powder was calculated, what is more, tungsten particles collision was also simulated by soft ANSYS/LS-DYNA. Cold gas dynamic spray (CGDS) is a rapidly developing coating technology, in which spray particle are deposited through plastic impact on substrate at high velocities at low temperature. In these experiments, the process produced a reasonably dense tungsten coating and tungsten alloy coating. This paper reports the effect of deposition parameters which including temperature, spraying distance, particle size, etc. on the structures formed.

**Keywords:** tungsten coating, W-Ni-Fe coating, cold spraying, deposition mechanism

**PACS:** 02.60.Pn, 02.70.Dh, 06.60.Ei, 28.52.Fa

---

\* Project supported by the National Magnetic Confinement Fusion Program, ITER (Grant No. 2010GB109000).

† E-mail: ccge@mater.ustb.edu.cn