DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.01.005

激光辅助冷喷涂 Stellite 6 多颗粒沉积的数值模拟

袁林江¹,赵 兵²,骆 芳¹,刘 鹏²

(1. 浙江工业大学之江学院,浙江杭州 310024; 2. 杭州新松机器人自动化有限公司,浙江杭州 310014)

摘 要:针对激光辅助冷喷涂过程中 Stellite 6 多颗粒沉积机理的问题,运用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对 Stellite 6 多颗粒在不同工艺参数下的碰撞过程进行了数值模拟,并与实验结果进行了比较分析。研究表明:多颗粒沉积过程 中,后续颗粒对先前沉积颗粒具有夯实作用,相邻颗粒间的变形能够填充颗粒间的空隙;颗粒沉积过程中无金属射流现 象、无新物质生成、无氧化反应;Stellite 6 颗粒在 45 钢基体上的沉积机制为镶嵌式的机械咬合。实验结果与数值模拟相 吻合。

关 键 词:激光辅助冷喷涂;多颗粒;沉积机制;有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 中图分类号:TG174.442 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)01-0019-06

Numerical Simulation of Stellite 6 Multi Particle Deposition by Laser-Assisted Cold Spraying

YUAN Linjiang¹, ZHAO bing², LUO Fang¹, LIU Peng²

(1. College of Zhijiang, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310024, China;

2. Hangzhou SIASUN Robot Automation Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: Regarding to the problem of the deposition mechanism of Stellite 6 multi particle in the laser-assisted cold spraying process, finite element software ANSYS/LS-DYNA was applied to simulate the collision process of Stellite 6 multi particle under different technological parameters, and compared with the experimental results. The results showed that subsequent particles had compaction effect on the previous deposited particles and the deformation of adjacent particles can fill the gap between the particles in the particles deposition process. There were no metal jet phenomenon, no new material generation, and no oxidation reaction mechanism during the process of particle deposition. The deposition mechanism of Stellite 6 multi particle impacting on medium steel was embedded machinery occluding. And the experimental results were in agreement with the numerical simulation.

Keywords: laser-assisted cold spraying; multi particle; deposition mechanism; ANSYS/LS-DYNA

激光辅助冷喷涂是在冷喷涂技术基础上利用激光 对沉积处进行加热的新型涂层制备技术^[1-3]。它不仅 具有冷喷涂的低氧化、固态沉积等特点^[4-5],而且,由于 激光软化基体,降低了颗粒的结合强度,有效地提高了 颗粒的沉积率。此外,由于激光辅助温度的存在,降低 了喷涂速度,减小了涂层的压应力,为激光辅助冷喷涂 技术在薄板材料上的运用提供了可能性^[6-7]。

目前,虽然有颇多研究者对颗粒沉积机理进行了研究^[8-12],但激光辅助冷喷涂颗粒沉积的结合机制尚

未定论^{[13][14]2158}。在激光辅助冷喷涂颗粒沉积过程 中,大量颗粒在极短的时间内同时撞击基体,虽然颗粒 在喷涂过程中彼此保持独立、互不影响,但当多颗粒子 撞击基体表面时,颗粒之间的相互作用以及颗粒与颗 粒、颗粒与基体间的沉积行为难以观察。因此,本文选 取了 Stellite 6 多颗粒的碰撞过程给予了数值分析,并 对喷涂工艺参数对多颗粒碰撞过程的影响和多颗粒的 沉积机理进行了研究,同时,也为研究激光辅助冷喷涂 其他材料提供参考。

收稿日期:2016-09-14;修回日期:2016-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51271170);浙江工业大学实验教学改革研究项目(G1460413737900)。 第一作者简介:袁林江(1984),男,河南信阳人,硕士,主要从事先进制造及数值模拟研究。E-mail:samylj@126.com

1 计算模型与方法

1.1 数值计算方法

考虑颗粒碰撞的轴对称结构以及减少计算时间, 建立如图 1 所示的 1/4 模型。对碰撞区域网格细化, 将颗粒和基体碰撞的微区域(碰撞中心点和接触界面 边缘)标记。颗粒 2 选取区域记为 H_1 、 H_2 ,颗粒 3 选取 区域记为 H_3 、 H_4 ,基体与颗粒 2 碰撞接触点记为 S_1 、 S_2 ,与颗粒 3 碰撞接触点记为 S_5 、 S_6 , S_3 、 S_4 为两颗粒间 基体上微单元。颗粒半径 20 μ m,基体尺寸 200 μ m × 200 μ m × 200 μ m。





1.2 材料模型

由于颗粒碰撞过程中存在:塑性变形大、碰撞时间 短,而且45钢基体/Stellite6颗粒为较硬材料/硬质材 料组合等因素,所以选取弹性和塑性2种斜率来表述 材料应力和应变特性的双线性各向同性硬化模型。该 模型采用了6个不同的温度来定义应力和应变的行 为。其中屈服应力计算公式如下^{[14]2159}:

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{r}} = \boldsymbol{\sigma}_{0} + \boldsymbol{E}_{\mathrm{p}} \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{eff}\,\circ}^{\mathrm{p}} \tag{1}$$

式中: E_p 为塑性硬化模量, σ_0 为初始屈服应力, ε_{eff}^p 为有效塑性应变, σ_r 为屈服应力。

其中:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\rm eff}^{\rm p} = \int_0^t \mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}_{\rm eff}^{\rm p}, \qquad (2)$$

$$E_{\rm p} = \frac{E_{\rm tan}E}{E - E_{\rm tan}} \,^{\circ} \tag{3}$$

式中: $d\varepsilon_{eff}^{p} = \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon_{ij}^{p} d\varepsilon_{eff}^{p}, E$ 为弹性模量, E_{tan} 为切向模量,t是时间, ε_{ii} 为每个单元体的有效塑性应变。

计算中所用材料的热物性参数见文献[15]。

2 计算结果与讨论

2.1 沉积温度对多颗粒沉积行为的影响

图 2 为颗粒速度 450 m/s、不同沉积温度下的沉积形貌图。图 2(a)中, Stellite 6 颗粒碰撞基体后, 颗粒塑性变形大, 呈扁平状。基体未经激光辅助加热, 弹





性模量、屈服强度大,塑性变形小。颗粒碰撞基体后, 颗粒动能耗尽,颗粒与基体的接触界面压力趋于零,颗 粒和基体积攒的弹性势能以颗粒回弹的形式释放,颗 粒与颗粒间产生脱离,甚至颗粒与基体间也会发生脱 离,不能有效沉积。图2(b)中,颗粒的变形程度没有 常温时大,但颗粒在基体表面形成的凹坑深度增大,说 明受到激光加热的影响,基体的激光加热区域温度上 升,该区域内屈服强度、弹性模量降低,产生了一定的 塑性变形。此外,由于基体软化,颗粒撞击基体时,基 体对颗粒的反作用力相对基体常温下时有所下降,所 以颗粒的变形程度不如常温时大。但由于基体的硬度 依然偏大,不能完全吸收颗粒的初始动能,最终将释放 积攒的弹性势能,使颗粒回弹,阻碍颗粒与基体的结 合。图2(c)中,颗粒的沉积凹坑深度大于上述2种, 且最终颗粒与颗粒间及颗粒与基体间结合紧密,孔隙 小,颗粒未发生回弹,说明此温度下基体发生了较大变 形,几乎能够完全吸收颗粒的初始动能,使颗粒与基体 形成有效结合。在图 2(d)中,颗粒的变形程度最小, 颗粒在基体表面形成凹坑深度最大,几乎所有的颗粒 都嵌入到基体中,但颗粒间的孔隙偏大。颗粒的变形 无法填充颗粒间的间隙,涂层不致密。此外,由于基体 在该温度下过于软化,当 Stellite 6 颗粒高速撞击基体 表面时,有可能发生颗粒贯穿基体现象,不能形成有效 涂层。

2.2 沉积速度对多颗粒沉积行为的影响

图 3 为沉积温度 1 100 ℃、不同碰撞速度下在时 间为120 ns 和260 ns 时的碰撞形貌图。图3(a)中,当 颗粒速度为300 m/s时,颗粒变形程度小,颗粒的变形 未能填充颗粒间的孔隙,颗粒间孔隙大,颗粒在基体表 面形成凹坑深度浅,说明颗粒碰撞速度小,颗粒与颗粒 及颗粒与基体间的结合强度弱,不能形成有效结合。 当颗粒速度为600 m/s时,颗粒碰撞基体后,颗粒与基 体都发生了强烈的塑性变形,基体表面凹坑深度大,但 在260 ns时,下层颗粒与基体接触处出现间隙,颗粒 与颗粒间也存在孔隙,这是由于颗粒高速撞击基体时, 颗粒的动能不能够完全被基体吸收,颗粒回弹,与基体 脱离。且颗粒回弹时削弱了颗粒与颗粒间的结合,使 得后续颗粒发生脱落,形成孔隙,降低涂层的结合率。 当颗粒的沉积速度为450 m/s时(图2(c)),颗粒的变 形充分填充了颗粒间的孔隙,颗粒间孔隙小,颗粒与基 体结合处的结合面积大于颗粒沉积速度 300 m/s 和 600 m/s 时,沉积效果好。







通过上述数值模拟可见,制备 Stellite 6 涂层的最 佳工艺参数为:沉积温度1 100 ℃、喷涂速度450 m/s。 同时也可发现,整个沉积过程中并未出现 Cu、Al 等金 属材料碰撞时发生的金属射流现象^[16-18],也未发现颗 粒和基体接合处发生局部熔化现象。说明绝热剪切机 制以及局部冶金结合机制并不能解释激光辅助冷喷涂 Stellite 6 颗粒的沉积机理。

2.3 多颗粒有效沉积机制分析

为了比较深入地研究涂层有效制备时的颗粒沉积 机制,洗取数值计算得出的最佳沉积工艺参数:沉积温 度1100 ℃、喷涂速度450 m/s。在此条件下对颗粒的 沉积机理进行研究。图4~5中可见,当颗粒撞击基体 时,颗粒1、2、3首先与基体发生碰撞,颗粒的有效塑性 应变主要集中在颗粒与基体接触界面边缘,且颗粒与 基体结合紧密,颗粒由球状变为扁平状。在120 ns 时,颗粒4、5分别碰撞颗粒1、2和2、3并嵌入其空隙 中,随后颗粒4、5撞击基体。颗粒强大的冲击力致使 基体材料向周边流动,使得基体材料与颗粒4、5 表面 紧密接触;在180 ns 时,颗粒6、7、8 撞击到先前沉积的 颗粒上,在后续颗粒的夯实作用下,沉积层加深,先沉 积颗粒1、2、3 变形增大,颗粒6、7、8 分别与颗粒1、2、3 平面接触。此时,颗粒4、5受到颗粒6、7、8的夯实作 用,与颗粒1、2、3及基体接触紧密;在260 ns 时,颗粒 9、10 撞击到先前沉积的颗粒上,在颗粒9、10 的作用 下,基体表面凹坑进一步加深,基体的有效塑性应变加 大。在整个颗粒沉积过程中,颗粒的有效塑性应变远 小于基体,基体表面出现金属塑性流变,且其塑性流变 惯性大于材料的黏性阻力,表面失稳,Stellite 6 颗粒相 当于镶嵌在被软化的基体内,产生机械咬合式的结合。



图 4 不同时刻颗粒沉积形貌图 Figure 4 Particle deposition at different time

图 6 为颗粒与基体的有效塑性应变变化曲线。图 中可见,基体的有效塑性应变要远大于颗粒的应变,反





映出颗粒沉积过程中,应变主要集中于基体,颗粒变化 小。图 6(a)中,颗粒 2、3 的最大应变分别出现在 H₂、 H₄处,说明颗粒最大应变为颗粒接触界面边缘,并非 初始碰撞的中心点位置;同时,也说明颗粒接触界面边 缘的局部发生了更剧烈的变形。而图 6(b)中,S₂点 处应变最大,反映出颗粒碰撞过程中,基体发生的金属 塑性流变导致了基体的有效塑形应变增大。颗粒高速 碰撞基体表面,致使基体发生了大应变,颗粒与基体紧 密接触,其距离有可能达到了原子晶格的范围内,从而 发生范德华作用力引起的结合,即:物理结合,但该沉 积机理还有待进一步的验证。

2.4 实验验证

实验选用 45 钢为基体材料,喷涂粉末为 Stellite 6,颗粒直径以 40 μm 为主,氮气 N₂压力 3 MPa,N₂温 度 450 ℃,进给速度 15 mm/s,沉积处温度分别为: 500,1 000,1 100 和1 200 ℃。

图 7 可见,基体受热温度不同,制备沉积层厚度也 有所差异。激光预热温度越高,所获得的沉积层厚度 越厚,基体变形越严重。对于 1 号样,由于激光加热沉 积处的温度仅为 500 ℃,故而相比于其他试样,沉积层 最薄。沉积层表面存在未沉积的球形颗粒,沉积层密 度相对疏松,碰撞颗粒结合力不足,发生反弹引起脱

落,造成沉积层最薄。2、3号 样沉积层与基体结合处有明 显的界限,界限呈锯齿状,基 体下沉不大,无明显下凹现 象,沉积层略高出基体表面, 但沉积层密度与1号样相比, 大大提高,厚度增加。其中3 号样制备的涂层厚度大于2 号样,沉积效果更好。对于4 号样,激光加热沉积处温度为 1 200 ℃, 沉积层最厚。但颗 粒与基体的结合处呈明显下 凹状,被加热的基体下沉显 著,颗粒变形程度小,无法填 充颗粒间孔隙,颗粒间孔隙率 大。由此可见,实验所得结果 很好地验证了上述对沉积工 艺参数的数值模拟。

此外,为了研究在激光辅助冷喷涂过程中,是否有氧化物或者新物质的生成,对2、3



图 6 颗粒与基体有效塑性应变变化曲线 Figure 6 Effective plastic strain curves of particles and substrate



图 7 Stellite 6 颗粒沉积的截面形貌图 Figure 7 Cross-sectional morphology of

Stellite 6 particles deposition

号样的颗粒和边界进行了测试并与 Stellite 6 粉末成分进行对比,如表1~3 所示。

表1 2号样颗粒和晶界处元素的质量分数

 Table 1
 Element content of 2 sample particles

	%					
名称	Fe	Cr	Со	W	С	Si
颗粒	2.23	27.34	60.99	5.44	2.27	1.73
边界	2.32	27.69	60.92	5.29	1.81	1.98

表2 3号样颗粒和晶界处元素的质量分数

Table 2 Element content of 3 sample particles

and grain boundaries							
名称	Fe	Cr	Со	W	С	Si	
颗粒	1.91	29.72	59.49	4.71	2.76	1.95	
边界	2.20	28.67	59.44	5.35	2.35	2.00	
表 3 Stellite 6 粉末元素的质量分数							
	Table 3 Stellite 6 powder element content %						

Co	W	Cr	С	Ni	Mo	Fe	Si	其他
剩余	4.75	28.5	1.2	< 2.0	<1.0	< 2.0	< 2.0	< 1.0

通过对表1~3进行比较得出:颗粒和边界处的成 分与粉末成分相似。证明在激光辅助冷喷涂沉积工艺 条件下,颗粒保持了原有的初始成分。此外,对沉积层 进行相分析,如图8所示,涂层细的弥散的碳化物测试 3项:α-Co, Cr₇C₃, W₂C。图中可见,在沉积过程中, 无氧化物生成。结合以上分析,可以说明:在颗粒沉积 过程中,没有新物质生成,没有氧化反应。也即颗粒碰 撞过程中,没有化学结合现象。



图 8 激光辅助冷喷涂 Stellite 6 涂层的 XRD Figure 8 Stellite 6 coating XRD by laser-assisted cold spraying





(b) 半剖截面图

图9 沉积区内单个 Stellite 6 颗粒沉积截面形貌图

Figure 9 Cross-sectional morphology of single Stellite 6 particle in deposition area

为了更进一步研究激光辅助冷喷涂颗粒的沉积机 制,选取沉积区内单个 Stellite 6 颗粒进行观察,如图 9 所示。从图中可以看出,颗粒撞击基体后,塑性变形主 要集中在基体表面,颗粒变形小,几乎保持原状,无射 流现象;基体碰撞区域内出现剪切唇,发生了金属塑性 流变,颗粒与基体呈现机械咬合式的结合。

3 结语

 1)颗粒沉积过程中,后续颗粒对先前沉积颗粒具 有夯实作用,相邻颗粒间的变形填充了颗粒间的空隙, 致使颗粒与颗粒间及颗粒与基体间结合紧密。 2) Stellite 6 颗粒沉积过程中无金属射流现象、无 新物质生成、无氧化反应。Stellite 6 颗粒在 45 钢基体 上的沉积机制为镶嵌式的机械咬合。同时, Stellite 6 颗粒高速碰撞基体,并与基体紧密接触,其距离可能达 到原子晶格范围内,从而形成物理结合,但该结论还有 待进一步的验证。

3)适度提高基体沉积处的温度以及颗粒的喷涂 速度可以改善 Stellite 6 颗粒在 45 钢基体上的沉积效 果。在其他工艺参数相同的情况下,制备 Stellite 6 涂 层的最佳工艺参数为:沉积温度 1 100 ℃、喷涂速度 450 m/s。

参考文献:

・行业简讯・

- LUPOI R, SPARKES M, COCKBUM A, et al. High speed titanium coatings by supersonic laser deposition [J]. Materials letters, 2011, 65(21/22):3205 3207.
- [2] BRAY M, COCKBUM A, O'NEILL W. The laser-assisted cold spray process and deposit characterization [J]. Surface and coatings technology, 2009, 203(19):2851 – 2857.
- [3] 杨理京,李祉宏,李波,等. 超音速激光沉积法制备 Ni60 涂层的显微组织及沉积机理[J]. 中国激光,2015,42(3):219-226.
- [4] GRUJICIC M, ZHAO C L, TONG C, et al. Analysis of the impact velocity of powder particles in the cold -gas dynamic spray process [J]. Materials science& engineering: A, 2004, 368 (1/2): 222 – 230.
- [5] MORGAN R, FOX P, PATTISON J, et al. Analysis of cold gas dynamically sprayed aluminum deposits [J]. Materials letters, 2004, 58(7/8):1317-1320.
- [6] 袁林江,骆芳,姚建华,等.超音速激光沉积研究进展[J].应用激 光,2012,32(4):331-335.
- [7] 骆芳,孔凡志,威廉・欧尼尔,等.激光加热温度对冷喷涂 Stellite
 6 合金沉积层表面特性的影响[J]. 兵工学报,2012,33(7):840-846.
- [8] Van STEENKISTE T H, SMITH J R, TEETS R E. Aluminum coatings

via kinetic spray with relatively large powder particles [J]. Surface and coatings technology, 2002, 154(2/3):237-252.

- [9] GRUJICIC M, SAYLOR J R, BEASLEY D E, et al. Computational analysis of the interfacial bonding between feed-powder particles and the substrate in the cold-gas dynamic-spray process [J]. Applied surface science, 2003, 219(3/4):211-227.
- [10] ASSADI H, GARTNER F, STOLTENHOFF T, et al. Bonding mechanism in clod gas spraying [J]. Acta mater, 2003, 51 (15): 4379-4394.
- [11] BOLESTA A V, FOMIN V M, SHARAFUTDINOV M R, et al. Investigation of interface boundary occurring during cold gas-dynamic spraying of metallic particles [J]. Nuclear instruments and methods in physics research section A: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment, 2001, 470 (1/2) :249 - 252.
- WU Jingwei, FANG Hongyuan, YOON Sanghoon, et al. Critical velocities for high speed particle deposition in kinetic spraying [J]. Materials transactions, 2006, 47(7):1723-1727.
- YUAN Linjiang, LUO Fang, YAO Jianhua. Deposition behavior at different substrate temperatures by using supersonic laser deposition
 J. Journal of iron and steel research, 2013, 20(10):87 93.
- [14] 骆芳,赵兵,姚建华.激光辅助冷喷涂 Cu 颗粒撞击 45 钢的数值 模拟[J]. 兵工学报,2015,36(11):2157-2163.
- [15] LU Yuanhang, YUAN Linjiang, CAI Dingbao, et al. Effect of the process parameters on the indentation size of particle deposited using supersonic laser deposition [J]. Rare metal materials and engineering, 2014, 43 (10):2349 - 2353.
- [16] BORCHERS C, GARTNER F, STOLTENHOFF T, et al. Microstructural and macroscopic properties of cold sprayed copper coatings [J]. Journal of applied physics, 2003, 93 (12): 10064 – 10070.
- [17] 周香林,苏贤涌,崔华,等.颗粒材料特性对冷喷涂撞击行为影响的模拟研究[J].金属学报,2008,44(11):1286-1291.
- [18] 巫湘坤,周香林,王建国,等.冷喷涂过程中能量变化及沉积行为的模拟研究[J].金属学报,2010,46(4):385-389.

[信息・简讯]

西门子实现二氧化碳减排 20%

自去年宣布实施二氧化碳减排计划以来一年间,西门子在减少碳足迹方面取得显著进展。公司的二氧化碳排放量从2014 财年(2013年10月1日-2014年9月30日)的220万t降低至2016财年(2015年10月1日-2016年9月30日)的170万t。其中, 高达20万t的二氧化碳减排量来自德国本土。2016财年,西门子的解决方案还帮助其全球客户减少5.21亿t二氧化碳排放,相当于德国每年碳排放总量的60%以上。

2015年9月,西门子宣布将于2020年实现二氧化碳减排50%,并于2030年实现环境友好。为了实现这一去碳化目标,西门子公司集中在4个领域开展工作:借助西门子能效计划(EEP),有效减少自有楼宇及生产设施的能耗;在办公楼宇和生产设施采用分布式能源系统(DES)以优化能源支出;针对公司在全球范围内所使用的车辆,系统性地采用低排放车辆进行替代,并推行电动交通的概念;持续加大采用低碳甚至无碳排放的清洁能源,如风能和水电,从而逐步实现过渡到清洁能源组合。

(王 乐)