

# 冷喷涂 TC4 涂层临界沉积速度计算及 制备涂层性能研究

靳磊<sup>1</sup>, 崔向中<sup>1</sup>, 丁元法<sup>2</sup>, 张岚<sup>2</sup>, 苏向东<sup>3</sup>

(1.北京航空制造工程研究所 高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024; 2.贵州省新材料研究开发基地, 贵阳 550003; 3.贵州省轻金属材料制备技术重点实验室, 贵阳 550003)

**摘要:** **目的** 研究冷喷涂 TC4 涂层的临界沉积速度及粒子温度对临界沉积速度的影响规律, 并研究气体压强对沉积涂层性能的影响规律。**方法** 理论研究上, 采用有限元 LS-DYNA 软件中的 Johnson-Cook 塑性模型, 选取 3D164 计算单元建立模型, 研究粒子在不同温度 and 不同速度下碰撞基体后的形貌特征, 确定粒子沉积临界速度。试验研究上, 采用 N<sub>2</sub> 作为冷喷涂驱动气体, 在 TC4 合金上制备 TC4 涂层, 然后采用 SEM、Image J 图像分析软件、硬度计等分析已沉积涂层的孔隙率和硬度等性能。**结果** 25、400、500、600 °C 温度下, 计算表明 10 μm 的 TC4 合金粒子在 TC4 基板上的临界沉积速度分别为 730、465、392、361 m/s, 即随粒子温度升高, 粒子临界沉积速度降低, 粒子沉积成涂层更容易。采用冷喷涂工艺在 TC4 基板上沉积 TC4 涂层, 在 N<sub>2</sub> 温度 600 °C、气体压力 3 MPa 的条件下, 制备的 TC4 涂层厚度约 1000 μm, 与 TC4 钛合金基体结合紧密, 涂层孔隙率约为 6.46%。**结论** 气体温度升高, 粒子临界沉积速度降低; 气体压强变大, 制备的涂层厚度就大且更加致密。

**关键词:** 冷喷涂; TC4 涂层; 碰撞; 临界沉积速度; 涂层性能

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)08-0096-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.08.016

## Critical Deposition Velocity Calculations and Properties Investigations of TC4 Cold Spray Coatings

JIN Lei<sup>1</sup>, CUI Xiang-zhong<sup>1</sup>, DING Yuan-fa<sup>2</sup>, ZHANG Lan<sup>2</sup>, SU Xiang-dong<sup>3</sup>

(1. Science and Technology on Power Beam Process Laboratory, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China; 2. Guizhou R&D Center on Modern Materials, Guiyang 550003, China; 3. Guizhou Key Laboratory for Preparation Technology of Light Metal Materials, Guiyang 550003, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study rule of effects of critical deposition velocity of cold spray TC4 coating and particle temperature on critical deposition velocity, and also rule of effects of gas pressure on properties of deposition coating. Theoretically, Johnson-Cook model and 3D164 model in LS-DYNA software were used to study morphology characteristics of particles colliding with the substrate at different temperature and velocity, and then determine threshold deposition velocity. Experimentally, N<sub>2</sub> as cold spray driving gas was adopted to prepare TC4 coatings on TC4 substrate. Then, SEM, Image J image analysis software, sclerometer and other methods were used to measure porosity and hardness of the coatings. Threshold deposition velocity

收稿日期: 2017-01-20; 修订日期: 2017-04-04

Received: 2017-01-20; Revised: 2017-04-04

基金项目: 国防科技重点实验室基金 (KZ104057)

Fund: Supported by the National Defense Science and Technology Key Laboratory Fund (KZ104057)

作者简介: 靳磊 (1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为第一原理、热喷涂、冷喷涂。

Biography: JIN Lei (1983—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: first principles, thermal and cold spray.

of  $D=10\text{ }\mu\text{m}$  TC4 powder was 730, 465, 392 and 361 m/s at 25, 400, 500, 600  $^{\circ}\text{C}$ , respectively, indicating that threshold deposition velocity decreased and particles could be deposited easily into coatings as powder temperature increased. TC4 coatings deposited on TC4 baseplate by adopting cold spraying technique exhibited stronger adhesion to TC4 substrate, thickness was nearly 1000  $\mu\text{m}$  and porosity was nearly 6.46% provided with  $\text{N}_2$  temperature of 600  $^{\circ}\text{C}$  and gas pressure of 3 MPa. Threshold deposition velocity decreases as gas temperature increases; both thickness and density of the coatings prepared increase as gas pressure increases.

**KEY WORDS:** cold spraying; TC4 coatings; collision; threshold deposition velocity; coating properties

航空、航天等领域大量使用钛合金，这些钛合金部件常常会因机械加工、摩擦损伤、外力碰撞、水蒸气、盐雾腐蚀等原因造成表面划痕、裂纹、深坑、局部沟槽、损伤缺失等，影响部件使用性能及安全性。钛合金表面损伤常规修复方法包括热喷涂、激光堆焊、涂覆等技术<sup>[1-2]</sup>，它们均可使受损部件表面凹坑、缺失部分恢复其原有尺寸，达到表面完整性目的。近 20 年出现的冷喷涂修复技术，因制备的涂层致密、厚度大、表面残余为压应力等优点，已在轻金属合金表面获得了成熟应用<sup>[3-5]</sup>，如利用 Al 及合金涂层对航天飞机固体燃料火箭推进器进行修复<sup>[6]</sup>，利用冷喷涂镁合金对直升机镁合金曲轴箱外壳进行修复<sup>[7]</sup>。

总结国内外文献发现，冷喷涂工艺主要在低熔点合金（Al、Mg、Zn）表面上应用较成功<sup>[8]</sup>，而在 TC4 钛合金表面采用和基体一致的 TC4 粉末进行喷涂修复的公开报道相对较少。如 Vidaller M V<sup>[9]</sup>系统论述了 TC4 表面冷喷涂制备 TC4 涂层，在 780  $^{\circ}\text{C}$  高温、3.8 MPa 的高压  $\text{N}_2$  下获得最佳的 TC4 涂层性能，孔隙率低至 0.9%，粉末利用率高达 91%，但这样高的工艺参数对设备硬件要求苛刻，目前国内绝大多数设备达不到，同时这样的高温下，TC4 粉末也会发生一定程度的氧化、再结晶，影响了涂层性能<sup>[10]</sup>。国外 Hussain T<sup>[11-12]</sup>、Price T S<sup>[13]</sup>、Marrocco T 等人<sup>[14]</sup>研究认为：钛合金表面沉积钛合金涂层的主要缺点是制备的涂层孔隙率较大。因此，Blose R E 等人<sup>[15]</sup>采用热等静压方法、Sun J F 等人<sup>[16]</sup>采用长时间真空热处理工艺进一步降低了孔隙率，甚至将孔隙率降低到零，但是这样的后处理工艺成本高昂，也可能影响基体钛合金的性能。总之，国际研究报道了<sup>[17-19]</sup>在 TC4 上制备 TC4 涂层较其他轻金属涂层的孔隙率高。国内李文亚<sup>[20]</sup>研究了纯 Ti 涂层，其孔隙率在 11% 以上，该研究对象是商业纯 Ti 粉末，并未涉及 TC4 粉末，而工程上绝大多数使用的是 TC4 粉末，而不是纯 Ti。李长久课题组<sup>[21-22]</sup>制备了致密 TC4 涂层，但基体是钢质材料，而不是 TC4 合金。总之，在 TC4 基体上沉积 TC4 涂层的临界沉积速度、TC4 涂层截面形貌、涂层孔隙率等研究还较少，因此仍需研究者继续深入探讨。

基于以上分析，本研究从理论角度分析 TC4 粉末与 TC4 钛合金基体的碰撞过程，然后采用冷喷涂工艺制备涂层验证理论研究，旨在为冷喷涂修复应用奠定基础。

1 实验

1.1 计算模型及参数

采用有限元分析软件 ANSYS LS-DYNA 模块，选取 3D164 计算单元建立模型，球体半径为 10  $\mu\text{m}$ ，基体是边长为 100  $\mu\text{m}$  的六面体。由于正碰撞过程轴对称特点，采用图 1 所示的 1/4 三维对称模型进行计算。为提高计算精度和减少计算时间，基体碰撞区域采取细分网格来保证精度，具体参数设置等信息可参考周香林等<sup>[24]</sup>的研究成果。选用 MAT\_JOHNSON\_COOK 材料模型<sup>[23]</sup>，采用线性 EOS\_GRUNEISEN 状态方程计算。本研究设定 4 种温度，同时每种温度均有 4 种碰撞速度，如表 1 所示，TC4 材料性能参数如表 2 所示。

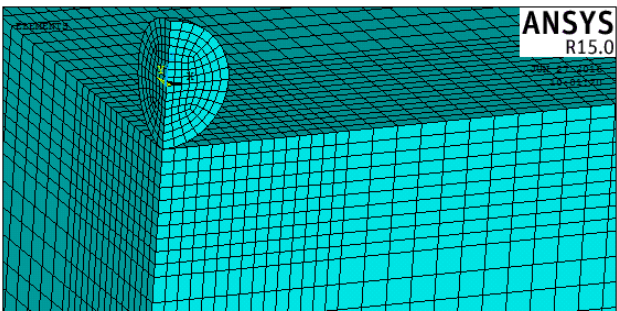


图 1 计算模型  
Fig.1 Calculation model

表 1 计算模型及参数设置  
Tab.1 Calculation model and parameters setting

模型	粒子温度/ $^{\circ}\text{C}$	粒子速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
模型1	25	500、600、700、800
模型2	400	300、400、500、600
模型3	500	300、400、500、600
模型4	600	300、400、500、600

表2 计算所用材料 TC4 性能参数 (室温)<sup>[24]</sup>  
Tab.2 Parameters of materials used in this study (room temperature)<sup>[24]</sup>

参数	数值	参数	数值
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	4650	应变参数	100
屈服强度 $\sigma_s/\text{MPa}$	70	热熔 $C_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	100
泊松比 $\sigma$	0.36	热导 $k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	461
杨氏模量 $E/\text{GPa}$	100	熔点/ $^\circ\text{C}$	1660
剪切模量 $G/\text{GPa}$	59.6	$A$	1923
硬度参数 $\beta$	0.5	$B$	807
$n$	482		

## 1.2 材料、工艺试验与性能测试

基体材料和喷涂粉末均为 TC4, 粉末纯度为 99.9%, 粒子形貌为球形。以往参考文献选用的粒子介于 8~25  $\mu\text{m}$  之间, 因此本研究选用 15  $\mu\text{m}$  左右的粒度。粉末采用气雾化工艺制备。

冷喷涂前, TC4 钛合金基板采用 40# 石英砂进行粗糙化处理。冷喷涂设备为自研的冷气动力喷涂系统。本研究固定了喷涂气体温度 600  $^\circ\text{C}$ 、喷涂距离 30 mm 和喷涂速度 20 mm/s 三个参数, 选用了两种喷涂气体压力: 喷涂压力 2 MPa, 工艺记为 CS1; 喷涂压力 3 MPa, 工艺记为 CS2。

采用扫描电镜对涂层微观形貌进行观察分析。采

用 Image J 软件像素法求涂层的孔隙率。采用 MH-5 型显微硬度计测量显微硬度, 载荷 300 g, 加载时间 15 s, 每个试样测 3—5 个点, 然后求平均值。冷喷涂颗粒速度测试采用 Spray Watch 诊断装置, 由于冷喷涂颗粒无可见辐射, 因此增加一套照明装置共同组成速度测量系统。涂层结合强度采用万能拉伸试验机测量, 取 5 个试样的平均值。

## 2 结果及分析

### 2.1 不同速度下 TC4 粒子与 TC4 合金基体碰撞形貌特征及临界沉积速度

采用计算模型 (图 1) 及相关参数 (表 1、表 2) 进行单颗粒碰撞模拟, 图 2 为 25  $^\circ\text{C}$  下, 不同撞击速度 (500、600、700、800 m/s) 的 TC4 粒子撞击 TC4 基体后的形貌。由图 2a 与图 2b 可知, 500、600 m/s 的粒子碰撞基体后, 发生比较微弱的塑性变形, 而由图 2c 和图 2d 可知, 700、800 m/s 的粒子发生了非常强烈的塑性变形, 并随着粒子飞行速度的增加, 塑性变形增加不明显, 说明 TC4 颗粒在 700 m/s 以上时发生了有效沉积。该模拟结果与李文亚<sup>[20]</sup>和周香林<sup>[24]</sup>等人的计算结果相近, 说明本计算模型和处理方案较合理。

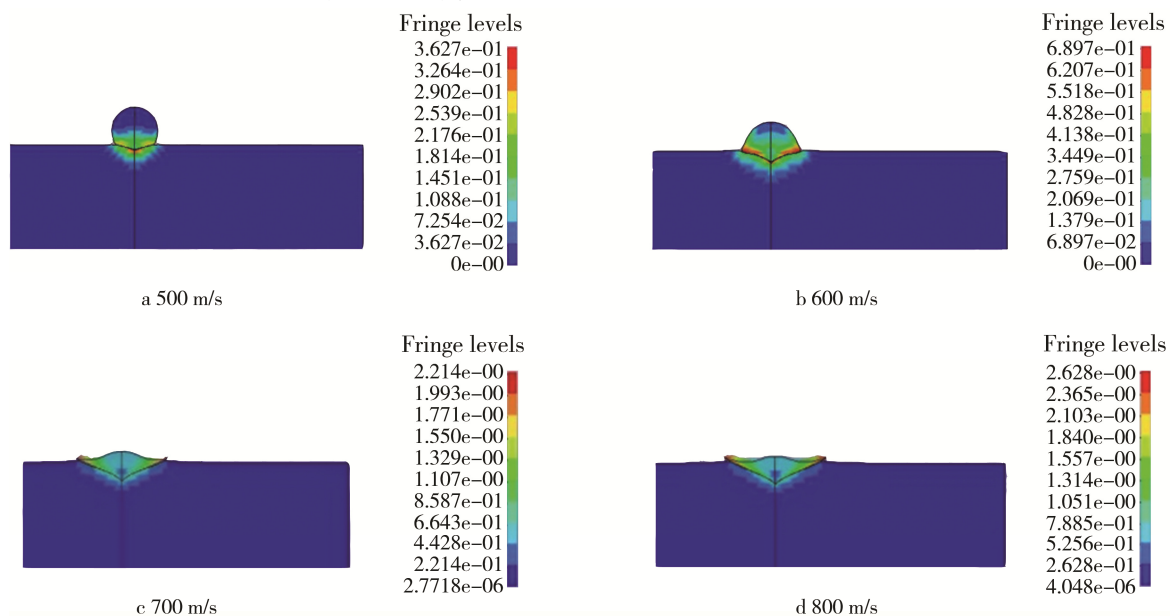


图2 TC4 粒子以不同速度撞击 TC4 基体后的形貌  
Fig.2 Morphologies of the TC4 after colliding at different speeds

根据图 2 进一步研究了不同温度下粒子达到熔点时的速度, 即粒子临界沉积速度, 结果如图 3 所示。本研究获得的 TC4 颗粒在 25  $^\circ\text{C}$  下的临界沉积速度为 730 m/s, Assadi 等人<sup>[25]</sup>得出的临界速度为 657 m/s 左右, 杨阳等人<sup>[26]</sup>得出平均粒度 25  $\mu\text{m}$  的粒子的临界速度为 730 m/s 左右。对于理论研究, 数值模型、粒子

大小、简化计算方法、材料参数等, 各研究者采用并不完全一样。对于实验研究, 不同研究者所采用的 TC4 粉末化学组分、粉末含氧量、粒度分布、喷涂的气体条件、拉乌尔喷管、涂层性能测量手段等不同。所以理论和实验环节的不同造成获得的临界速度值存在差异, 但以往研究获得的数值绝大多数处于

502~780 m/s 范围内<sup>[27]</sup>。本研究与参考文献相差在 10% 以内, 可见本研究结果基本合理。然后再从温度角度来看 (图 3), 可知随粒子温度的提高, 粒子沉积临界速度呈现近乎直线递减的规律, 说明温度的提高降低了金属颗粒变形阻力, 使粒子变形、沉积更加容易进行。

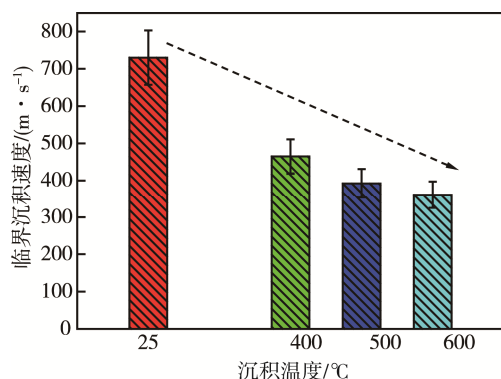


图 3 粒子临界沉积速度与沉积温度关系

Fig.3 Threshold deposition velocities versus different temperature

## 2.2 冷喷涂制备涂层性能分析

### 2.2.1 涂层沉积后的截面形貌

根据以上理论研究结果, 粒子在较高温度或较高速度下更容易剪切失稳变形, 形成质量更好的涂层, 即在 25、400、500、600 °C 温度下, 10 μm 的 TC4 粒子在 TC4 基板上的碰撞速度达到 730、465、392、361 m/s 时可沉积成涂层。因此为达到临界沉积速度, 本研究使用较高温度的 N<sub>2</sub> (600 °C) 和较高压强的气体 (2、3 MPa)。经 Spray Watch 测试, CS1 和 CS2 工艺下 TC4 粉末粒子速度分别约 381、406 m/s, 高于粒子沉积临界速度, 因此 600 °C 下, 2 MPa 和 3 MPa 的气体压强可满足粒子沉积的基本条件, 然后采用实验手段制备涂层并展开分析。

图 4 为 CS1 和 CS2 两种工艺下制备的涂层截面形貌, 上部分代表 TC4 涂层, 下部分代表 TC4 基板, 两部分间存在界面。从图 4 可见, CS1 工艺制备的涂层厚度为 500 μm 左右, 而 CS2 工艺制备的涂层厚度约为 1000 μm, CS2 厚度是 CS1 的 2 倍左右。同时二者的微观截面存在区别, Image J 软件分析获得 CS1 和 CS2 工艺的孔隙率分别为 10.68% 和 6.46%, CS2 工艺较 CS1 更致密, 因为 CS2 气体压强的提高使飞行粒子速度更快, 碰撞基体后产生强烈的塑性变形, 粒子铺展较好, 同时压强大的粒子对已形成涂层进行强烈挤压、夯实, 因此气体压强增大, 形成的涂层更致密, 涂层/基体结合界面处的孔洞、缺陷也就较少。本研究制备的涂层孔隙率比李文亚等人<sup>[20]</sup>的研究结果 (11%) 低, 但与 Manap 等人<sup>[28]</sup>的计算值 (1%) 还有较大差距。因为 Manap 采用以光滑颗粒流体动

力学 (SPH) 方法和 Dugdale-Barenblatt 粘接模型模拟孔隙率, 其理论结果与本试验结果差距正常, 同时还暗示本研究制备的涂层孔隙率还能进一步降低。

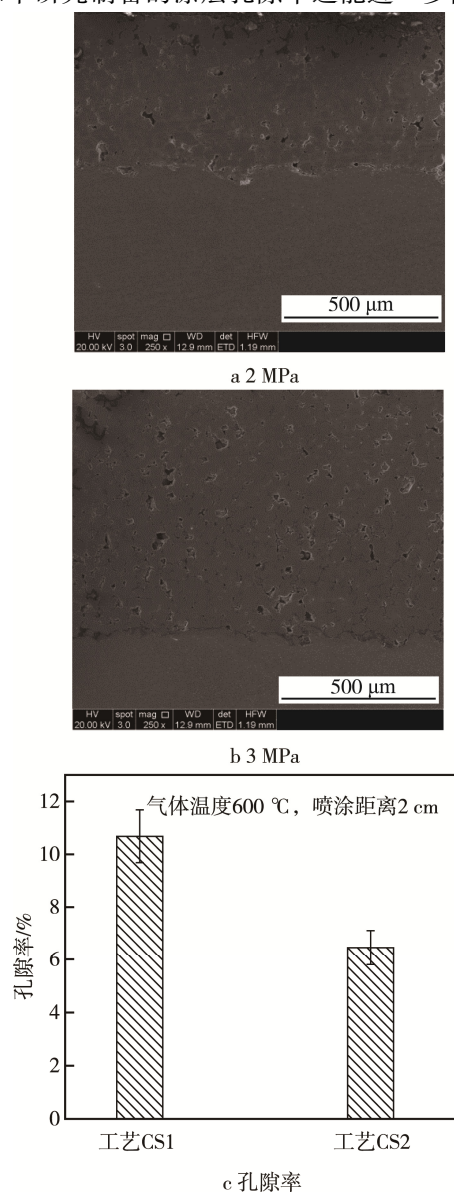


图 4 不同压强下涂层截面形貌及孔隙率统计

Fig.4 Morphologies of cross section under 2 MPa (a) and 3 MPa (b) and their porosities statistic (c)

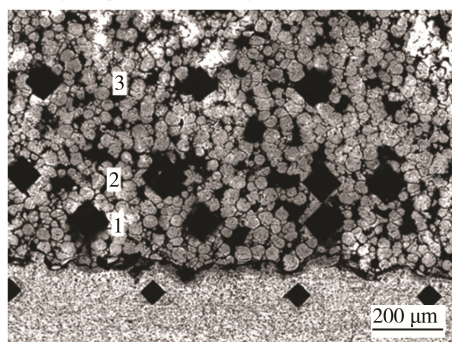
### 2.2.2 硬度分析

涂层硬度一定程度上反映了该涂层的耐磨性, 是衡量涂层质量的重要指标之一。由于涂层组织的非均匀性, 使得测试的显微硬度值有很大的分散性, 因此本研究测试 5 个点, 并计算其平均值。CS1、CS2 工艺下, 涂层硬度测试形貌如图 5 所示, CS1 工艺测试区 1、2、3 的硬度值约为 8228.7HV<sub>0.3</sub>、5183.6HV<sub>0.3</sub>、3843.6HV<sub>0.3</sub>; CS2 工艺测试区 1、2、3 的硬度值约为 9841.2HV<sub>0.3</sub>、6375.1HV<sub>0.3</sub>、4768.3HV<sub>0.3</sub>。本研究的两种工艺制备的涂层均有相同的硬度分布规律, 即涂层底部硬度最大, 中部其次, 顶部最小。同时比较工艺

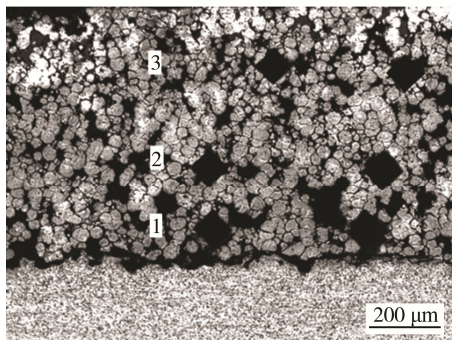


CS1 与工艺 CS2 发现,随着气体压强的提高,粒子挤压作用越强,涂层越致密,硬度越大。孟宪明等人<sup>[29-30]</sup>研究就说明了显微组织对涂层显微硬度有较大影响,致密组织提高了涂层的显微硬度,疏松组织降低了涂层的显微硬度。本研究还表明,TC4 涂层不同处的硬度值均大于 TC4 合金基体,这是因为喷涂粒子快速冷作硬化占据主导作用,导致涂层硬度值较 TC4 合金基体提高很多。

对涂层腐蚀后的形貌进一步观察,可见 TC4 粒子与原始球形粉末不同,形成涂层后的粒子发生了一定的塑性变形,呈现椭球状、扁平状形貌,但是粒子形状变化不大。经结合强度测试,CS1 工艺涂层的结合强度值约为 20.6 MPa,失效开裂位置处于 TC4 涂层与 TC4 基体界面处,这进一步验证了颗粒与颗粒之间的结合强度大于 20.6 MPa。腐蚀形貌还能发现颗粒与颗粒间存在界面,甚至孔洞,类似粉末松散的堆积状,看似颗粒间相互作用、机械咬合力较弱,而实际情况是颗粒碰撞基体后,颗粒间存在熔化冶金结合现象,最终才会使涂层的结合强度达 20.6 MPa 以上。



a 工艺CS1



b 工艺CS2

图 5 腐蚀后的涂层显微硬度测试形貌  
Fig.5 Hardness of coatings after corrosion

### 3 结论

采用有限元对 TC4 粒子在 TC4 基体表面碰撞沉积进行数值模拟,并进行试验验证。理论研究表明:25、400、500、600 °C 下,TC4 粒子在 TC4 基板上的沉积临界速度分别为 730、465、392、361 m/s。试验研究表明:CS1 和 CS2 粒子均达到了临界沉积速度以

上,尤其是 CS2 工艺压强更大,制备的 TC4 涂层与基体结合良好,厚度可达 1000 μm,孔隙率低至 6.46%。计算模拟与喷涂工艺两方面研究均表明:粒子速度越快,粒子碰撞后越扁平,涂层形成的可能性就越大,最终制备的涂层越致密。

### 参考文献:

- [1] 丁彰雄,曾志龙,赵辉.热喷涂技术在船舶柴油机关键零件再制造中的应用[J].热喷涂技术,2009,1(1): 67-71.  
DING Zhang-xiong, ZENG Zhi-long, ZHAO Hui. The Applications of Thermal Spraying Technology in the Key Part Remanufacturing of the Marine Diesel Engine[J]. Thermal Spray Technology, 2009, 1(1): 67-71.
- [2] 谢小海.激光堆焊工艺在修造领域的应用现状及发展趋势[J].国外机车车辆工艺,2012(4): 1-16.  
XIE Xiao-hai. The Application Status and Development Trend for Laser Surfacing Technology in the Field of Repairing[J]. Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology, 2012(4): 1-16.
- [3] 李长久.中国冷喷涂研究进展[J].中国表面工程,2009,22(4): 5-14.  
LI Chang-jiu. The State-of-art of Research and Development on Cold Spraying in China[J]. China Surface Engineering, 2009, 22(4): 5-14.
- [4] 陈利修,陈铭.冷喷涂 Cu-Zn-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 修复斯太尔发动机水道腐蚀区域的涂层性能分析[J].机械设计与研究,2013,29(1): 69-74.  
CHEN Li-xiu, CHEN Ming. The Coating Performance of Cold Spraying Cu-Zn-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for Repairing the Waterway Corrosion Area of Steyr Engine[J]. Machine Design & Research, 2013, 29(1): 69-74.
- [5] 张俊宝,梁永利,章华兵.冷气动力喷涂技术修复连续铸造结晶器应用研究进展[J].宝钢技术,2011(5): 23-29.  
ZHANG Jun-bao, LIANG Yong-li, ZHANG Hua-bing. Research Progress in Using Cold Gas Dynamic Spraying to Repair Continuous Casting Molds[J]. Baosteel Technology, 2011(5): 23-29.
- [6] 熊天英,陶永山,李铁藩.冷气动力喷涂技术在空间领域的应用[C]//中国空间科学学会空间材料专业委员会学术交流会议.武汉:武汉理工大学,2012: 7-14.  
XIONG Tian-ying, TAO Yong-shan, LI Tie-fan. Space Application for Cold Air Kinetics Technology[C]// Materials Professional Committee of China's Space Science Society. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012: 7-14.
- [7] 周禹,李京龙,李文亚.冷喷涂技术的最新进展及其在航空航天领域的应用展望[J].航空制造技术,2009(9): 68-70.  
ZHOU Yu, LI Jing-long, LI Wen-ya. New Development of Cold Spraying Technology and Its Potential Application in Aerospace Field[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(9): 68-70.

- [8] HAYNES J, KARTHIKEYAN J. Cold Spray Copper Application for Upper Stage Rocket Engine Design[J]. Thermal Spray, 2003, 55: 45-52.
- [9] VIDALLER M V. Metallic Coatings Deposited by Cold Gas Spray onto Light Alloys[M]. Barcelona: Barcelona University, 2013.
- [10] ZAHIRI S H, FRASER D, JAHEDI M. Recrystallization of Cold Spray-fabricated CP Titanium Structures[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 18(1): 16-22.
- [11] HUSSAIN T. Cold Spraying of Titanium: A Review of Bonding Mechanisms, Microstructure and Properties[J]. Key Engineering Materials, 2012, 533(53): 53-90.
- [12] HUSSAIN T, MCCARTNEY D G, SHIPWAY P H. Impact Phenomena in Cold-spraying of Titanium onto Various Ferrous Alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(21/22): 5021-5027.
- [13] PRICE T S. Cold Gas Dynamic Spraying of Titanium Coatings[M]. Nottingham: University of Nottingham, 2008.
- [14] MARROCCO T, MCCARTNEY D G, SHIPWAY P H, et al. Production of Titanium Deposits by Cold-gas Dynamic Spray: Numerical Modeling and Experimental Characterization[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2006, 15(2): 263-272.
- [15] BLOSE R E, WALKER B H, WALKER R M, et al. New Opportunities to Use Cold Spray Process for Applying Additive Features to Titanium Alloys[J]. Metal Powder Report, 2006, 61(9): 30-37.
- [16] SUN J F, HAN Y, CUI K. Innovative Fabrication of Porous Titanium Coating on Titanium by Cold Spraying and Vacuum Sintering[J]. Materials Letters, 2008, 62(21/22): 3623-3625.
- [17] LI C J, LI W Y. Deposition Characteristics of Titanium Coating in Cold Spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 167(2/3): 278-283.
- [18] WONG W, REZAEIAN A, IRISSOU E, et al. Cold Spray Characteristics of Commercially Pure Ti and Ti-6Al-4V [J]. Advanced Materials Research, 2010, 89-91: 639-644.
- [19] ZAHIRI S H, YANG W, JAHEDI M. Characterization of Cold Spray Titanium Supersonic Jet[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 18(1): 110-117.
- [20] 李文亚, 余敏. 真空热处理对冷喷涂多孔 Ti 组织和拉伸性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010(S1): 902-905.
- LI Wen-ya, YU Min. Effect of Vacuum Heat Treatment on Microstructure and Tensile Property of Cold Sprayed Porous Ti Bulk[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010(S1): 902-905.
- [21] LUO X T, WEI Y K, WANG Y, et al. Microstructure and Mechanical Property of Ti and Ti6Al4V Prepared by an In-situ Shot Peening Assisted Cold Spraying[J]. Materials and Design, 2015, 85: 527-533.
- [22] LI C J, LI W Y. Deposition Characteristics of Titanium Coating in Cold Spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 167: 278-283.
- [23] JOHNSON C R, COOK W H. Fracture Characteristics of 3 Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.
- [24] 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.
- ZHOU Xiang-lin, SU Xian-yong, CUI Hua, et al. Simulation Effect of Cold-sprayed Particles Properties on Their Impacting Behaviors[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 44(11): 1286-1291.
- [25] 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.
- LI Wen-ya. 3-D FEM Analysis of Impacting Behavior of Cold Sprayed Particles[J]. China Surface Engineering, 2009, 22(3): 31-37.
- [26] ASSADI H, GÄRTNER F, STOLTENHOFF T, et al. Bonding Mechanism in Cold Gas Spraying[J]. Acta Materialia, 2003, 51(15): 4379-4394.
- [27] 杨阳, 郝仪, 孔令艳, 等. 冷喷涂颗粒临界速度研究[J]. 热喷涂技术, 2015, 7(4): 1-16.
- YANG Yang, HAO Yi, KONG Ling-yan, et al. Research on Critical Velocity of Particle during Cold Spray Process[J]. Thermal Spray Technology, 2015, 7(4): 1-16.
- [28] SCHMIDT T, ASSADI H, GÄRTNER F, et al. From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 18(5/6): 794-808.
- [29] MANAP A, NOORIRINAH O, MISRAN H, et al. Experimental and SPH Study of Cold Spray Impact between Similar and Dissimilar Metals[J]. Surface Engineering, 2014, 30(5): 335-341.
- [30] 孟宪明, 张俊宝, 梁永立, 等. 基板预热温度对冷喷涂涂层组织及沉积行为的影响[J]. 宝钢技术, 2011(5): 37-42.
- MENG Xian-ming, ZHANG Jun-bao, LIANG Yong-li, et al. Influence of the Pre-heated Substrate Temperature on the Microstructure and Deposition Behavior of CGDS Coatings[J]. Baosteel Technology, 2011(5): 37-42.
- [31] 孟宪明, 张俊宝, 韩伟, 等. 碰撞速度对冷喷涂粒子沉积行为影响的数值模拟研究[J]. 宝钢技术, 2011(5): 17-22.
- MENG Xian-ming, ZHANG Jun-bao, HAN Wei. Numerical Simulation of the Effects of the Impact Velocity on the Particle De[J]. Baosteel Technology, 2011(5): 17-22.