

冷喷涂沉积机理及其装备的研究进展

钟厉, 王昭银, 张华东

(重庆交通大学 机电与汽车工程学院, 重庆 400074)

摘要: 冷喷涂是近几年基于空气动力学发展起来的新型表面改性技术。冷喷涂技术在较低的温度下进行, 相比热喷涂有很多优势, 成为研制开发非晶、纳米及其他温度敏感材料的有效手段, 在工业及国防领域有着重要的应用前景和价值。简要介绍了冷喷涂技术的原理、特点以及在保护涂层、功能涂层、近净成形、零件修复等方面的应用。涂层沉积机理的研究对冷喷涂技术的研究具有重要的理论意义, 对工艺参数的优化以及优质涂层的制备具有重要的指导作用。冷喷涂装备对涂层质量和喷涂效率的提高至关重要。冷喷涂装备使冷喷涂技术的研究从理论研究到实验研究过渡, 最终由实验室研究向工业应用过渡。详细阐述了冷喷涂涂层沉积机理及其研究进展。系统阐述了冷喷涂装备(真空冷喷涂、激光辅助冷喷涂、脉冲气体冷喷涂、激波风洞冷喷涂等)的工作原理及研究现状。

关键词: 冷喷涂; 沉积机理; 装备; 应用

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)04-0015-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.04.003

Research Progress of Precipitation Mechanism and Apparatus of Cold Spray

ZHONG Li, WANG Zhao-yin, ZHANG Hua-dong

(College of Mechatronic and Automobile Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

ABSTRACT: Cold spray is a new surface modification technology based on aerodynamics developed in recent years. Due to its low temperature, cold spraying has many advantages over thermal spraying. Therefore, it has become a useful means to research and develop amorphous, nano-, and other temperature-sensitive materials and it has an important application prospect and value in industry and national defense in the future. The principle, characteristics and application of cold spray in protective coating, functional coating, near net shape and parts repairing were briefly introduced in this paper. The research of coating deposition mechanism has important theoretical significance to cold spray technology, and provides important guidance for the optimization of process parameters and the preparation of premium coating. Cold spraying equipment is crucial for the improvement of coating quality and spraying efficiency, and it is essential for the transition of for the research of cold spraying technology from theory research to experimental research and finally the transformation from lab research to industry application. The deposition mechanism and research progress of cold spray were elaborated in detail. The principle and research status of the cold spray equipments such as vacuum cold spray, laser-assisted cold spray, pulsed gas cold spray and shock tunnel produced cold spray were systematically explained.

收稿日期: 2014-10-27; 修订日期: 2014-11-23

Received: 2014-10-27; Revised: 2014-11-23

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(CSTC, 2008BB6348); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ100424)

Fund: Supported by the Chongqing Natural Science Foundation Project (CSTC, 2008BB6348) and the Chongqing Education Science and Technology Research Project (KJ100424)

作者简介: 钟厉(1965—), 女, 重庆人, 博士, 教授, 主要从事材料表面工程的研究及教学。

Biography: ZHONG Li (1965—), Female, from Chongqing, Ph. D., Professor, Research focus: material surface engineering.

KEY WORDS: cold spraying; deposition mechanism; equipment; application

冷喷涂亦称为冷气体喷涂 (Cold Gas Dynamic Spray, CGDS), 是近 20 年发展起来的一种新型表面改性技术。20 世纪 80 年代中后期, 前苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所 (Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Russian Academy of Science in Novosibirsk) 的研究人员 A. N. Papyrin 及其同事利用示踪粒子进行超声速风洞实验时发现, 当速度超过一定的临界值时, 示踪粒子将沉积在靶材表面。他们于 1990 年提出冷喷涂概念, 并发表了第一篇关于冷喷涂的论文^[1], 申请了第一项冷喷涂专利^[2]。1995—1997 年开始, 有关于冷喷涂方面的研究成果在全美国际热喷涂会议上发表^[3-5], 加拿大于 2000 年召开的国际热喷涂会议上首次组织了关于冷喷涂的讨论会, 2001 年的德国 HVOF 专题会议和 2002 年的美国国际热喷涂大会进一步明确冷喷涂成为喷涂领域的重要分支。现在, 冷喷涂技术在俄罗斯、德国、美国、日本、英国等国发展迅速, 并且发表了大量研究成果。国内一些科研机构 and 大学也相继展开了冷喷涂技术方面的研究, 并取得了一定的成果^[6-8]。

1 冷喷涂原理与特点

冷喷涂技术是基于气体动力学原理研发出的新型表面改性技术, 高压气体 (氮气、氦气、空气或混合气体等) 直接或经过气体加热器进入缩放的拉瓦尔喷嘴, 形成超音速气流, 带动粉末粒子 ($5 \sim 50 \mu\text{m}$) 在低温 (一般低于 600°C) 下进入拉瓦尔喷嘴, 以极高的速度 ($300 \sim 1200 \text{ m/s}$) 碰撞基板, 使颗粒发生强烈的塑形变形, 从而沉积在基体表面形成涂层。

热喷涂包括 (超音速) 火焰喷涂^[9]、爆炸喷涂、(超音速) 电弧喷涂、(超音速) 等离子喷涂^[10] 等, 都是利用高能热源, 将粉末或丝材加热到熔化或者半熔化状态, 借助焰流或者压缩气体加速后, 高速喷射到经预处理的基体表面沉积, 从而形成涂层。冷喷涂颗粒加热温度低, 仍然保持固态, 固态颗粒在极高应力、应变和应变速率条件下通过“绝热剪切失稳”引起的塑形流变或者通过剧烈变形等机械过程, 实现在工件表面的沉积。喷涂在室温下进行, 无需对基体加热, 因此减少了喷涂过程中颗粒氧化、组织变化、烧损等现象的发生。相对热喷涂而言, 冷喷涂具有以下优点: 1) 涂层的化学成分以及显微组织结构可与原材料保持一致; 2) 基体选择范围广; 3) 涂层的残余应力较

低, 主要为压应力; 4) 涂层致密, 孔隙率低; 5) 可沉积的涂层种类繁多, 如 $\text{TiO}_2\text{-Zn}$ ^[11], WC-Co ^[12-13], $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu}$ ^[14-15], $\text{TiB}_2\text{-Cu}$ ^[16], SiC-Al ^[17], $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$ ^[18-19], $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ ^[20], SiC-Al-Si ^[21], Al-Si-Al ^[22], $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ni}$ ^[23], TiN-Al ^[24], $\text{B}_4\text{C-Ni}$ ^[25] 等; 6) 喷涂速度快。

冷喷涂在拥有很多优势的同时, 也存在不足之处: 1) 有时需要用氦气才能制备高质量的涂层, 而铁基、镍基或者高温合金的喷涂必须使用氦气, 喷涂成本提高; 2) 喷涂颗粒能否有效沉积以及制备的涂层是否稳定, 取决于颗粒与基体材料的特性。

冷喷涂所拥有的优点远大于其不足之处, 先进的氦气循环装置 (如图 1 所示) 以及低压状态下的喷枪下游粉末注入法的出现, 都表明人们根据应用的需要, 已致力于这些缺点的改进研究。

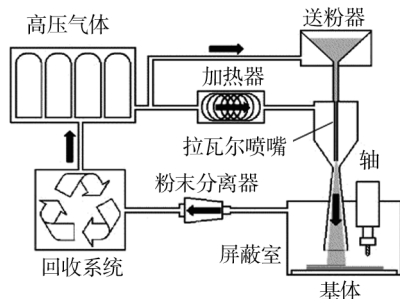


图 1 氦气回收装置^[26]

Fig. 1 Schematic of helium recovery device

2 涂层形成机理研究现状

受实验手段的限制, 对冷喷涂涂层结合机理的研究尚存在分歧, 现在研究涂层结合机理的方法主要是运用计算机模拟或理论计算与实验相结合。

冷喷涂的效果主要取决于喷涂速度的选择, 喷涂速度应在临界沉积速度与侵蚀速度之间。侵蚀速度是粒子喷涂速度的上限, 喷涂速度如果超过侵蚀速度, 就会出现冲蚀, 而颗粒不会粘着。只有当撞击速度大于临界速度, 小于侵蚀速度时, 粒子才能与基体结合并形成涂层^[27]。

Assadi 等^[28]率先提出: 冷喷涂颗粒与基体碰撞界面发生强烈的塑形变形, 塑性功以热量形式耗散引起温升, 温升导致材料软化, 当热软化效应占优势时, 材料将失去抗剪强度, 并在较小的切应力下表现出过度的变形, 即发生了绝热剪切失稳。他们同时还提出: 能够发生绝热剪切失稳的最低撞击速度即视为临

界速度,粒子内绝热剪切失稳的发生是冷喷涂粒子实现成功沉积的重要条件。2004年,Grujicic等^[29]在肯定了Assadi等研究成果的基础上提出:绝热剪切失稳产生的金属射流破碎并挤出粒子与基体接触界面上的氧化膜,露出大量新鲜的金属表面,并在高压下产生紧密接触,从而促进粒子与基体的结合。研究者们基于绝热剪切失稳提出了4种可能的沉积结合方式:机械结合、冶金结合^[30]、物理结合^[29-31]、化学结合^[32-33]。在不同材料和工艺条件下,涂层中可能存在上述一种或几种结合方式。

目前,在国内外发表的研究成果中,最常采用ABAQUS和LS-DYNA模拟冷喷涂粒子高速撞击基体的过程。Assadi等^[28]通过有限元模拟研究了不同的材料性能对冷喷涂临界速率的影响,并提出了一个用于计算临界速率的简易公式。在该公式中,临界速率是喷涂温度、颗粒密度、颗粒熔化温度和抗拉极限强度的函数。后来Schmidt等^[34]加入颗粒直径这个参数修正了这个公式。他们认为碰撞动力学中的粒子尺寸效应对临界速率有重要影响,从铜和306L不锈钢的研究结果表明,临界速率随着粒子尺寸的增大而减小。Ghelichi^[35]在绝热剪切失稳的基础上建立了另一个有限元模型,用此模型预测评估的临界速率接近于实验得出的值。粒子孔隙度在之前的研究中未被考虑在内,但它对临界速率有很大影响。Li等^[36-37]提出临界速率随着原料中氧元素含量的增加而显著增加。在碰撞过程中,粒子和基体界面氧化物的累积会阻碍激活粒子和基体表面的粘着。Moridi等^[38]研究了一种包含有限元模型和解析解的复合方法,用于预测临界速率和侵蚀速率。殷硕等^[39-40]也基于Euler法计算得到铜粒子与铜基体在碰撞结束后的沉积形貌,与实验结果吻合得很好。

到目前为止,越来越多的研究^[41-42]关注喷涂颗粒的沉积及涂层形成机理,从现有研究成果来看,其本质的结合机理依然存在争论,因此涂层形成机理的研究仍是现阶段的研究热点与重点。

3 冷喷涂设备的研究进展

随着对涂层质量的要求越来越高以及特殊涂层的制备,研究者们传统冷喷涂技术的基础上,开发出新的冷喷涂技术。尽管这些技术的工作原理不同,但都是对传统冷喷涂技术的优化,为高质量涂层以及特殊涂层的制备提供了可能。

3.1 高压固定式与低压便携式冷喷涂系统

俄罗斯科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所自1990年首次报道冷喷涂以来,研发了一系列冷喷涂装置。德国CGT公司于2001年,在俄罗斯冷喷涂装置的基础上推出商用Kinetiks3000,并经较大改进后推出Kinetiks4000,于2009年推出Kinetiks8000。该装置采用双送粉器,工作气体温度提高到1000℃。

20世纪90年代,低压便携喷涂系统出现并开始应用。俄罗斯Obninsk Center for Powder Spraying、波兰Metal Forming Institute、加拿大University of Windsor联合开发了DYMET系列便携喷涂系统。该系统以低压(0.5~1.5 MPa)压缩气体作为加速气体,气流速度低,气流中颗粒体积浓度高,故气体的消耗量可显著减少(0.2~0.3 m³/min)。所用空气压缩机体积与质量减小,设备结构紧凑,便于移动,可用于车间或其他工作现场的修补^[43]。美国Inovati公司也推出了低压喷涂系统KM-CDS系列,采用特殊设计的直通喷嘴,可用低压(小于1 MPa)He实现金属陶瓷涂层(如WC-Co)的制备^[44]。

3.2 真空冷喷涂系统

西安交通大学结合传统冷喷涂原理及微纳米颗粒在高速气流中的加速行为,设计并构造了真空度从 $8 \times 10^2 \sim 8 \times 10^3$ Pa范围可调,可实现微纳米颗粒沉积的真空冷喷涂系统。这套真空冷喷涂系统主要增加了对密闭喷涂室抽真空的真空泵,微纳米颗粒经过喷管加速之后,气固两相不会受到空气的阻碍作用而明显减速。

3.3 激光辅助冷喷涂技术

激光辅助冷喷涂技术是由英国剑桥大学的Bray等于2006年提出的^[45]。该系统是在传统喷涂系统的基础上增加了一套激光器,激光光斑与喷涂斑点的形状和尺寸相同,加工过程中,工件静止不动,激光光斑与喷涂斑点重合并保持同步运动,或者工件运动,两斑点保持重合不动,从而实现同步加工。该技术可以降低临界沉积速度,使涂层与基体的选材更为广泛。在喷涂系统中还安装了一套测温装置,对喷涂点的温度进行测量,针对不同涂层材料,调节激光功率便可控制加热点的温度,以获得高质量的涂层。

3.4 脉冲气体冷喷涂技术

脉冲气体冷喷涂,又名激波推进冷喷涂,是加拿

大渥太华大学冷喷涂实验室^[46]在冷喷涂技术的基础上开发出的脉冲气体动力喷涂技术。图2所示为脉冲气体动力喷涂系统的工作原理图。工作气体送入左侧的加热容器内被加热(图中A), V_1 和 V_2 是两个高频截止阀门, 两个阀门与它们之间的密闭空间构成振动发生器, 高频截止阀门的非同步开启和关闭使气体产生一定频率的脉冲振动(图中B), 脉冲气体压缩波向前传播, 预热并带动送粉器中送入的粉末, 最终沉积在右侧的基板上形成涂层(图中C)。阀门每次打开只产生一道激波, 激波在阀门关闭后迅速消失, 因此需要不断启闭阀门, 以获得连续激波。激波产生的时间间隔取决于阀门开启的频率, 脉冲喷涂也由此而来。目前应用这一技术已成功制备多种材料涂层^[47-48]。

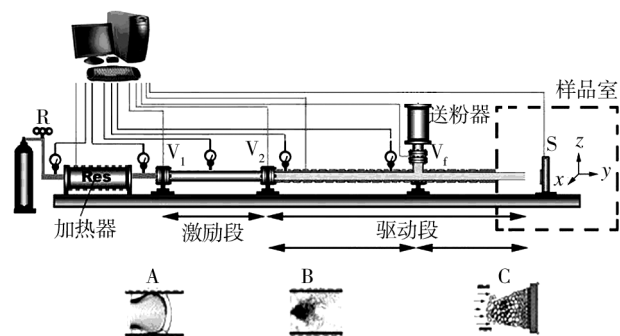


图2 脉冲气体动力冷喷涂示意图^[46]

Fig. 2 Schematic of pulsed gas dynamic cold spray

3.5 激波风洞冷喷涂技术

激波风洞冷喷涂技术原理如图3所示。在高压部分(HPS)和双隔膜室(DD)充入压缩气体至所需压力, 在低压部分(LPS)、超音速喷嘴(N)和存储罐(DT)充入1个大气压的氮气(如(a)所示)。打开释放阀, 双隔膜室的压力会急速下降, 膜片破裂并形成冲向低压段的激波(ISW), 同时会产生一个冲向上游的高压段的膨胀波(EF)。此时, 会形成一个使激波后的高温流动区域和膨胀波引起的低温流动区域区别开来的接触表面(CS)(如(b)所示)。在这两个区域的气体具有相同的压力和速度。当激波碰撞到超音速喷嘴的入口, 由于喷嘴入口和喉部的尺寸都非常小, 激波几乎完全被反射(如(c)所示)。反射导致在喷嘴入口和反射激波(RSW)之间形成了一个可以视为贮存器的高温高压区域。当反射激波与接触面相互作用时, 会产生传播激波(TSW)和反射激波(如(d)所示)。从接触面向右传播的反射波到达喷嘴入口, 几乎再次被完全反射, 并再次与接触面相互作用(如(e)所示)。在相互作用过程中, 激波的震荡强度降低并形成几乎稳定的贮存条件。当入射波通过喷嘴, 经过很短的时间便形成准稳态的喷嘴流, 颗粒进入气体流并被加速, 与基体碰撞形成致密的涂层^[49](如(f)所示)。德国亚琛工业大学激波实验室设立了激波风洞冷喷涂设备, 实验测得10 μm 的颗粒冲击速度可达1500 m/s。

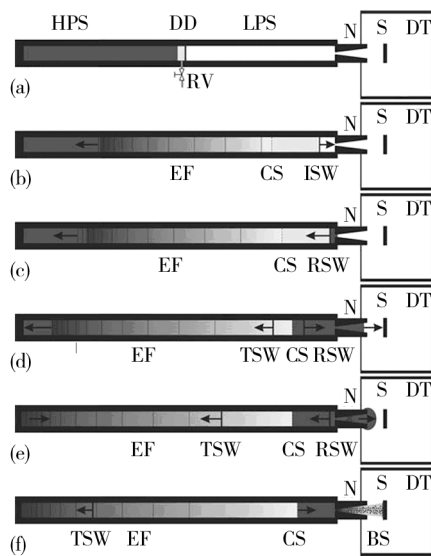


图3 激波风洞冷喷涂示意图^[47]

Fig. 3 Schematic of shock tunnel cold spray

4 冷喷涂技术的应用

随着冷喷涂技术的发展与成熟, 逐渐由实验室研究向工业应用过渡。可沉积涂层包括大部分金属涂层、有机涂层、金属陶瓷涂层等。研究表明, 可以在金属、陶瓷、环氧树脂或玻璃等基体表面形成涂层, 实现异种材料的良好结合。按照目前的研究应用, 可以分为以下几种类型。

4.1 保护涂层

1) 防腐涂层。零件的腐蚀是表面改性的研究重点之一, 也得到了广泛的关注^[50-52]。冷喷涂涂层具有致密度高、气孔少的特点, 能够制备性能优良的防腐涂层。Al, Zn^[53-54], Ni^[55]等均可作为防腐涂层, 使材料防腐性能和使用寿命提高。刘德鑫等^[56]在ZM6 镁合金基体上采用冷喷涂技术制备了纯铝涂层, 涂层自腐蚀电位比镁合金提高了约700 mV。朱传琳等^[57]采用冷喷涂技术在IF 钢表面制备了304 不锈钢涂层, 涂层表现出良好的耐腐蚀性能。

2) 耐高温涂层。冷喷涂技术可以制备耐高温涂

层,以改善零件的耐高温氧化性能。用于火箭发动机的典型保护涂层有 TBCs 热障涂层、MCrAlY 高温保护涂层、Cu-Cr-Al 抗氧化保护涂层^[58]等。张林伟等^[59]利用冷喷涂技术制备了 CoNiCrAlY 涂层,研究结果表明:涂层经过热腐蚀 150 h 后,表面生成了以 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为主的氧化膜,该氧化膜连续、致密,从而保护基体免遭腐蚀。

3) 耐磨涂层。为降低设备部件表面的磨损,可以在设备部件表面喷涂制备陶瓷、合金、氧化物等耐磨涂层。高培虎等^[60]利用冷喷涂技术制备 WC-Co 涂层,并取得了良好成果。利用冷喷涂制备的 WC-Co 等涂层是代替镀硬铬的良好途经。

4.2 功能涂层

与热喷涂涂层相比,冷喷涂涂层的化学成分以及显微组织结构可与原材料保持一致,因此特别适合制备敏感材料涂层。现在研究者们发现的冷喷涂功能涂层有导电及导热涂层、抗菌涂层、光催化涂层、生物医用涂层、非晶涂层、热障涂层等。由于冷喷涂技术起步不久,新的功能涂层还有待研究开发。

4.3 近净成形

由于冷喷涂热影响小,涂层孔隙率低,存在残余压应力等特点,可以制备厚涂层,甚至可以用于零部件的近净成形^[61]。

4.4 零件修复

零件的表面修复属于再制造,零件不需加热,对零件热影响小,相比其他热修复具有很大的优势,特别是对于热敏感材料。Ogawa 等^[62]利用 Al 及其合金涂层对航天飞机固体燃料火箭推进器和飞行器结构中的部件进行了修复。美国陆军研究实验室^[63]也利用冷喷涂技术对直升机用镁合金曲轴箱外壳进行了修复。陈利修等^[64]利用冷喷涂技术喷涂 Cu-Zn- Al_2O_3 复合粉修复斯太尔发动机水道腐蚀区域,延长了设备服役期。

5 结语

冷喷涂技术是一种实现材料表面多功能化的有效技术,涂层材料系统从金属粉末扩展到纳米结构粉末、陶瓷和高分子材料系统,潜在的应用范围可覆盖到电子元件、汽车制造、航空航天、医疗卫生等众多领

域与行业。随着未来研究的深入,将会有助于冷喷涂技术更多的应用与实践,并大大降低成本。

参考文献

- [1] ALKHIMOV A P, KOSAREV V F, PAPYRIN A N. A Method of Cold Gas-dynamic Deposition [J]. Soviet Physics-Doklady, 1990, 35 (12): 1047—1049.
- [2] ALKHIMOV A P, KOSAREV V F, NESTEROVICH N I, et al. Method of Applying Coating: Russian, 1618778 [P]. 1990-09-08.
- [3] ALKHIMOV A P, KLINKOV S V. Gas-dynamic Spraying Study of a Plane Supersonic Two-phase [J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1997, 38 (2): 324—330.
- [4] MCCUNE R C, DONLON W T, CARTWRIGHT E L, et al. Characterization of Copper and Steel Coating Made by the Cold Gas-dynamic Spray Method [C]//Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems. OH, United States: ASM International Materials Park, 1996: 397—403.
- [5] MCCUNE R C, PAPYRIN A N, HALL J N, et al. An Exploration of the Cold Gas-dynamic Spray Method for Several Materials Systems [C]//Proceedings of the 8th National Thermal Spray Conference. OH, United States: ASM International Materials Park, 1995: 1—5.
- [6] 王非凡, 李文亚, 余敏. 基于稳定最大应变的喷涂粒子临界速度预测 [J]. 中国表面工程, 2012, 25 (6): 96—100.
WANG Fei-fan, LI Wen-ya, YU Min. Prediction of Critical Velocity in Cold Spraying Based on Numerically Calculated Steady Maximum Equivalent Plastic Strain [J]. China Surface Engineering, 2012, 25 (6): 96—100.
- [7] 郑建新, 金耀辉, 刘传绍. 真空冷喷涂铜颗粒加速特性数值研究 [J]. 表面技术, 2013, 42 (1): 5—8.
ZHENG Jian-xin, JIN Yao-hui, LIU Chuan-shao. Numerical Study on Accelerating Characteristics of Copper Particles in Vacuum Cold Spraying Process [J]. Surface Technology, 2013, 42 (1): 5—8.
- [8] 王洪涛, 李长久, 杨冠军. 硬质相对冷喷涂 FeAl 金属间化合物涂层性能的影响 [J]. 材料保护, 2010, 43 (4): 90—94.
WANG Hong-tao, LI Chang-jiu, YANG Guan-jun. The Influence of Hard Phase on Coating Property of Cold Spray FeAl Intermetallic Compound [J]. Materials Protection, 2010, 43 (4): 90—94.
- [9] 高俊国, 陆峰, 汤智慧, 等. 喷涂距离对超音速火焰喷涂 CoCrAlYTa 涂层组织性能的影响 [J]. 表面技术, 2013, 42 (1): 1—4.
GAO Jun-guo, LU Feng, TANG Zhi-hui, et al. The Influence

- of Spraying Distance on Structure and Properties of CoCrAl-YTa Coating Prepared by HVOF [J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 1—4.
- [10] 周小平, 王小军, 朱理奎. 反应等离子喷涂 Al_2O_3 - TiB_2 -Al 复相涂层的反应机理[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 6—10.
- ZHOU Xiao-ping, WANG Xiao-jun, ZHU Li-kui. Reaction Mechanism of the Formation of Plasma-spraying Al_2O_3 - TiB_2 -Al Composite Coatings [J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 6—10.
- [11] MORIMOTO J, ONODA T, SASAKI Y, et al. Improvement of Solid Cold Sprayed TiO_2 -Zn Coating with Direct Diode Laser [J]. Vacuum, 2004, 73(3/4): 527—532.
- [12] KIM H, LEE C, HWANG S. Fabrication of WC-Co Coatings by Cold Spray Deposition [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 191(2/3): 335—340.
- [13] 王洪涛, 陈泉, 纪岗昌, 等. 冷喷涂 WC-Co 涂层的组织结构 and 性能研究[J]. 材料工程, 2013(10): 29—35.
- WANG Hong-tao, CHEN Xiao, JI Gang-chang, et al. Microstructure and Performance of Cold Sprayed WC-Co Coatings [J]. Journal of Materials Engineering, 2013(10): 29—35.
- [14] KOIVULUOTO H, VUOISTO P. Effect of Powder Type and Composition on Structure and Mechanical Properties of Cu+ Al_2O_3 Coatings Prepared by Using Low-pressure Cold Spray Process [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(5): 1081—1092.
- [15] 肖正涛, 李相波, 王佳, 等. 热处理对冷喷涂 Cu-20% Al_2O_3 复合涂层耐磨损性能的影响研究[J]. 材料导报, 2012, 26(3): 76—80.
- XIAO Zheng-tao, LI Xiang-bo, WANG Jia, et al. Effect of Heat Treatment on Tribological Properties of Cold-sprayed Cu-20% Al_2O_3 Composite Coatings [J]. Materials Review, 2012, 26(3): 76—80.
- [16] KIM J S, KWON Y S, LOMOVSKY O I, et al. Cold Spraying of in situ Produced TiB_2 -Cu Nanocomposite Powders [J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(11/12): 2292—2296.
- [17] LEE H Y, YU Y H, LEE Y C, et al. Cold Spray of SiC and Al_2O_3 with Soft Metal Incorporation: A Technical Contribution [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2004, 13(6): 184—189.
- [18] WANG Q, SPENCER K, BIRBILIS N, et al. The Influence of Ceramic Particles on Bond Strength of Cold Spray Composite Coatings on AZ91 Alloy Substrate [J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(1): 50—56.
- [19] POIRIER D, LEGOUX J, ROBIN A L, et al. Consolidation of Al_2O_3 /Al Nanocomposite Powder by Cold Spray [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(1/2): 275—284.
- [20] WOLFE D E, EDEN T J, POTTER J K, et al. Investigation and Characterization of Cr_3C_2 -based Wear-resistant Coatings Applied by the Cold Spray Process [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2006, 15(3): 400—412.
- [21] SANSOUCY E, MARCOUX P, AJDELSZTAJN L, et al. Properties of SiC-reinforced Aluminum Alloy Coatings Produced by the Cold Gas Dynamic Spraying Process [J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(16): 3988—3996.
- [22] BAKSHI S R, WANG D, PRICE T, et al. Microstructure and Wear Properties of Aluminum-Silicon Composite Coatings Prepared by Cold Spraying [J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204(4): 503—510.
- [23] HU H X, JIANG Y S, XIONG T Y, et al. Cavitation Erosion and Jet Impingement Erosion Mechanism of Cold Sprayed Ni- Al_2O_3 Coating [J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(12): 4929—4937.
- [24] LI W Y, YANG C, LIAO H. Effect of Vacuum Heat Treatment on Microstructure and Microhardness of Cold-sprayed TiN Particle-reinforced Al Alloy-based Composites [J]. Materials and Design, 2011, 32(1): 388—394.
- [25] FENG C, GUIPONT V, JEANDIN M, et al. B_4C /Ni Composite Coatings Prepared by Cold Spray of Blended or CVD-Coated Powders [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(3/4): 561—570.
- [26] PATTISON J, CELOTTO S, MORGAN R, et al. Cold Gas Dynamic Manufacturing: A Non-thermal Approach to Free-form Fabrication [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(3/4): 627—634.
- [27] ASSADI H, SCHMIDT T, RICHTER H, et al. On Parameter Selection in Cold Spraying [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(6): 1161—1176.
- [28] ASSADI H, GARTNER F, STOLTENHOFF T, et al. Bonding Mechanism in Cold Gas Spraying [J]. Acta Materialia, 2003, 51(15): 4379—4394.
- [29] 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.
- [30] LI C J, LI W Y, WANG Y Y. Formation of Metastable Phases in Cold-sprayed Soft Metallic Deposit [J]. Surface and Coating Technology, 2005, 198(1/2/3): 469—473.
- [31] 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.
- [32] BOLESTA A V, FOMIN V M, SHAFRUTDINOV M R, et

- al. Investigation of Interface Boundary Occurring During Cold Gas-dynamic Spraying of Cold Sprayed Face Centered Cubic Metals[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(8): 4288—4292.
- [33] WANK A, WIELAGE B, PODLESIAK H, et al. High-resolution Microstructural Investigations of Interfaces between Light Metal Alloy Substrates and Cold Gas-sprayed Coating [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2006, 15(2): 280—283.
- [34] SCHMIDT T, GARTNER F, ASSADI H. Development of a Generalized Parameter Window for Cold Spray Deposition [J]. Acta Materialia, 2006, 54: 729—742.
- [35] GHELICHI R, BAGHERIFARD S, GUAGLIANO M, et al. Numerical Simulation of Cold Spray Coating [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205: 5294—5301.
- [36] LI W Y, LI C J, LIAO H L. Significant Influence of Particle Surface Oxidation on Deposition Efficiency, Interface Microstructure and Adhesive Strength of Cold-sprayed Copper Coatings [J]. Applied Surface Science, 2010, 256: 4953—4958.
- [37] 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: 95—101.
- [38] MORIDI A, HASSANI-GANGARAJ S M, GUAGLIANO M. A Hybrid Approach to Determine Critical and Erosion Velocities in the Cold Spray Process [J]. Applied Surface Science, 2013, 273: 617—624.
- [39] 殷硕. 冷喷涂粉末粒子加速行为及沉积机理的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- YIN Shuo. A Systematic Investigation on the Acceleration Behavior and Deposition Mechanism of Cold Sprayed Particles [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [40] 殷硕, 王晓放. 基于 Euler 法的冷喷涂粒子与基体高速冲击过程数值分析 [J]. 材料热处理学报, 2011, 32(4): 154—158.
- YIN Shuo, WANG Xiao-fang. Numerical Simulation of High Velocity Impact Process in Cold Spraying Based on Euler Method [J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(4): 154—158.
- [41] 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.
- [42] KING P C, BUSCH C, KITTEL-SHERRI T, et al. Interface Melding in Cold Spray Titanium Particle Impact [J]. Surface and Coating Technology, 2014, 239: 191—199.
- [43] VILLAFUERTE J, ENG P. Low Pressure Cold Spray for Corrosion Protection [R]. America: Centerline Supersonic Spray Technologies, 2008.
- [44] TAPPHORN R, GABEL H, HENNESS J. Kinetic Metallization-coating Development System [C]//International Thermal Spray Conference. America: American Society for Metals, 2009.
- [45] BRAY M, COCKBURN A, ÓNEILL W. The Laser-assisted Cold Spray Process and Deposit Characterisation [J]. Surface and Coating Technology, 2009, 203(19): 2851—2857.
- [46] JODOIN B, RICHER P, BÉRUBÉ G, et al. Pulse-cold Gas Dynamic Spraying: Process Analysis, Development and Selected Coating Examples [J]. Surface and Coating Technology, 2007, 201(16/17): 7544—7551.
- [47] YANDOUZI M, AJDELSZTAJN L, JODION B. WC-based Composite Coating Prepared by the Pulsed Gas Dynamic Spraying Process: Effect of the Feedstock Powders [J]. Surface and Coating Technology, 2008, 202(16): 3866—3877.
- [48] YANDOUZI M, RICHER P, JODION B. SiC Particulate Reinforced Al-12Si Alloy Composite Coating Produced by the Pulsed Gas Dynamic Spray Process: Microstructure and Properties [J]. Surface and Coating Technology, 2009, 203(20/21): 3260—3270.
- [49] LUO X, OLIVIER H. Gas Dynamic Principles and Experimental Investigations of Shock Tunnel Produced Coating [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 18(4): 546—554.
- [50] 钟厉, 李国川, 王立文. 基于 BP 网络的不锈钢多元离子共渗优化设计 [J]. 表面技术, 2014, 43(2): 79—82.
- ZHONG Li, LI Guo-chuan, WANG Li-wen. Multiple Ion Nitriding of Stainless Steel Optimization Design Based on BP Neural Network [J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 79—82.
- [51] 李旭东, 穆志韬, 刘治国, 等. 航空高强度 LY12CZ 铝合金腐蚀剩余强度预测 [J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 1—4.
- LI Xu-dong, MU Zhi-tao, LIU Zhi-guo. Prediction of High-strength Aero LY12CZ Aluminum Alloy Residual Strength with Corrosion Damage [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 1—4.
- [52] 孙琳, 王振尧, 赵春英, 等. 碳钢和耐候钢在盐雾环境下的腐蚀行为研究 [J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 1—4.
- SUN Lin, WANG Zhen-yao, ZHAO Chun-ying, et al. Study on Corrosion Behavior of Carbon Steel and Weathering Steel in Salt Spray Test [J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 1—4.
- [53] 李相波, 许立坤, 邱善广, 等. 碳钢低压冷喷涂铝涂层的海水耐蚀性 [J]. 电化学, 2013, 19(5): 425—429.

- LI Xiang-bo, XU Li-kun, QIU Shan-guang. The Seawater Corrosion Resistance of Carbon Steel Low Pressure of Cold Sprayed Aluminum Coatings[J]. Journal of Electrochemistry, 2013, 19(5): 425—429.
- [54] 李海祥, 李相波, 孙明先, 等. 冷喷涂 Zn-50Al 复合涂层在海水中的耐蚀性能[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(1): 62—66.
- LI Hai-xiang, LI Xiang-bo, SUN Ming-xian, et al. The Corrosion Resistance Property of the Cold Spray Composite Coating Zn-50Al in Seawater[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(1): 62—66.
- [55] 黄国胜, 李相波, 邢路阔, 等. 冷喷涂锌镍合金层的组织结构与耐蚀性[J]. 材料保护, 2013, 46(4): 1—4.
- HUANG Guo-sheng, LI Xiang-bo, XING Lu-kuo. The Organization Structure and Corrosion Resistance of Cold Spray Zinc Nickel Alloy Layer[J]. Materials Protection, 2013, 46(4): 1—4.
- [56] 刘德鑫, 石仲川, 张晓云, 等. ZM6 镁合金冷喷涂 Al 涂层结构与耐蚀性研究[J]. 材料工程, 2012(12): 50—60.
- LIU De-xin, SHI Zhong-chuan, ZHANG Xiao-yun, et al. Structure and Anti-corrosion Properties of Cold Sprayed Al Coatings on ZM6 Magnesium Alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2012(12): 50—60.
- [57] 朱传琳, 孟宪明, 程从前, 等. 真空热处理对冷喷涂 304 不锈钢涂层组织与性能的影响[J]. 机械工程材料, 2012, 36(10): 23—26.
- ZHU Chuan-lin, MENG Xian-ming, CHENG Cong-qian, et al. Effect of Vacuum Heat Treatment on Microstructure and Properties of Cold Sprayed 304 Stainless Coating[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 36(10): 23—26.
- [58] RAJ S V, BARRETT C, KARTHIKEYAN J, et al. Comparison of the Cyclic Oxidation Behavior of Cold Sprayed Cu-CrAl-Coated and Uncoated GRCop-84 Substrates for Space Launch Vehicles [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(16/17): 7222—7234.
- [59] 张林伟, 王鲁, 王全胜, 等. 真空预氧化对冷喷涂 CoNi-CrAlY 涂层组织及热腐蚀性能的影响[J]. 材料工程, 2013(4): 12—16.
- ZHANG Lin-wei, WANG Lu, WANG Quan-sheng, et al. Effect of Vacuum Pre-oxidation on Microstructure and Hot Corrosion Behavior of CoNiCrAlY Coating Prepared by Cold Spray [J]. Journal of Materials Engineering, 2013(4): 12—16.
- [60] 高培虎, 杨冠军, 李毅功, 等. 双尺度结构 WC-12Co 涂层的冷喷涂制备[J]. 材料研究与应用, 2009, 3(1): 243—248.
- GAO Pei-hu, YANG Guan-jun, LI Yi-gong, et al. The Cold Spray Preparation of the Double Scale Structure WC-12Co Coating [J]. Materials Research and Application, 2009, 3(1): 243—248.
- [61] DUPUIS P, CORMIER Y, FARJAM A, et al. Performance Evaluation of Near-net Pyramidal Shaped Fin Arrays Manufactured by Cold Spray [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 69: 34—43.
- [62] OGAWA K, NIKI T. Repairing of Degraded Hot Section Parts of Gas Turbines by Cold Spraying[J]. Key Engineering Materials, 2010, 417/418: 545—548.
- [63] CHAMPAGNE V K. The Repair of Magnesium Rotorcraft Components by Cold Spray[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2008, 8(2): 164—175.
- [64] 陈利修, 陈铭. 冷喷涂 Cu-Zn-Al₂O₃ 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-Al₂O₃ for Repairing the Waterway Corrosion Area of Steyr Engine [J]. Machine Design and Research, 2013, 29(1): 69—74.