

氧化敏感有色金属材料的冷喷涂研究进展

杨理京, 张平祥, 王少鹏, 李争显

(西北有色金属研究院, 西安 710016)

摘要: 有色金属材料通常氧亲和能力强, 在高温时容易氧化。传统热喷涂技术所用的喷涂温度高, 喷涂过程为开放环境, 导致有色金属颗粒的氧化、烧损、相变、残余应力和晶粒长大等问题。如何在减少喷涂材料的热致缺陷和保持喷涂粉末原有特性的同时降低喷涂温度, 这为冷喷涂技术的发展提供了契机。本文针对冷喷涂氧化敏感有色金属材料的国内外研究现状进行总结, 涉及有色金属材料包括: 镁、铝、铜、钛及钛合金、钨、钽、铌材料, 分别从冷喷涂技术、喷涂材料、工艺、后处理四个方面总结了改善沉积层质量的措施, 阐述冷喷涂增材制造存在的问题, 展望冷喷涂技术在氧化敏感有色金属领域的发展趋势。

关键词: 冷喷涂; 氧化敏感金属; 有色金属; 难熔金属; 钛合金; 涂层

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127 (2018) 12-0002-10

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2018.04.002

Research Progress of Oxidizing Sensitive Non-ferrous Metals Produced by Cold Spray

YANG Lijing, ZHANG Pingxiang, WANG Shaopeng, LI Zhengxian

(Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016)

Abstract: Non-ferrous metals are usually prone to absorb oxygen and oxidize at the room temperature. In the thermal spraying process, the spraying temperature is very high, and the spraying process is usually in the air, which results in oxidation, burning loss, phase transition, residual stress and rough grain defects. In the case of lowering the spraying temperature, how to reduce the thermal defects and maintain the intrinsic composition and microstructure of powder, cold spray technology is concerned. In this paper, the research progress of oxidation sensitive non-ferrous metal coating produced by cold spray are summarized, including Magnesium, Aluminum, Copper, Titanium, Tungsten, Tantalum and Niobium based materials. The measures to improve the quality of cold spray coatings were summarized from the aspects of technology, powder, craft and post processing, as well as providing a description about the problem and development trends of cold spray in non-ferrous metals.

Keywords: Coldspray; Oxidation sensitive metal; Non-ferrous metal; Refractory metal; Titanium alloy; Coating

0 引言

金属材料通常分为黑色金属和有色金属两大

类, 其中有色金属中大部分金属氧亲和能力强, 氧溶解度大, 在室温时就容易氧化。常见的氧化敏感有色金属主要有: 镁 (Mg)、铝 (Al)、铜

作者简介: 杨理京 (1984-), 男, 博士。

基金项目: 国家自然科学基金 (51701165); 中国博士后科学基金 (2017M623334XB); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2018JM5005); 陕西省创新人才计划—重点科技创新团队 (2017KCT-06)

(Cu)、钛(Ti),其中镁和铝作为轻质金属常被用在飞机、导弹、鱼雷、雷达、卫星,具有高比强度特性的钛合金主要用于飞机和发动机结构件^[1]。另外,还有一类氧化敏感高熔点有色金属,因其熔点在2000℃以上,所以被称之为难熔金属,包括钨(W)、钼(Mo)、钽(Ta)、铌(Nb)、铼(Re)和钒(V)等六种,难熔金属具有优良的高温力学性能,热膨胀系数小,室温温度范围高达1100~3320℃,是重要航天用高温结构材料^[2,3]。传统热喷涂技术所用的热源温度都较高,加工过程为开放环境,容易造成喷涂材料的氧化、烧蚀、相变、偏析、残余应力和晶粒长大等问题^[4]。如何在保证涂层成分和组织的均匀性、稳定性、致密性的同时降低加热温度,以减少喷涂材料的氧化、烧损、相变、晶粒粗大等现象的发生,这都为冷喷涂技术的发展提供了契机。

冷喷涂技术是新兴的一种低温固态沉积技术,沉积过程中颗粒不发生熔化,依靠高压气流加速到超过临界沉积速率的情况下,颗粒发生强烈塑性变形形成涂层^[5,6]。这项技术是20世纪80年代,前苏联西伯利亚分院的理论与应用力学研究所的A. N. Papyrin教授在用示踪粒子进行超声速风洞试验时,发现当示踪粒子的速度超过某一临界速度时,其对靶材表面的作用由冲蚀变为沉积,由此提出了依靠冷态塑性变形沉积涂层的概念,并在各界引起了巨大的反响^[6]。2002年美国国际热喷涂大会进一步确立了冷喷涂成为了喷涂领域的重要分支。由于冷喷涂沉积过程无冶金反应,能够有效避免氧化敏感有色金属材料在沉积过程中的氧化问题,非常适用于氧化敏感有色金属材料的沉积,探索冷喷涂技术在有色金属领域的应用,将弥补传统沉积技术的缺陷,从而为有色金属的增材制造和再制造提供新的思路,推动冷喷涂技术在航空、航天和国防军工领域的应用。

1 与热喷涂技术沉积原理的区别

冷喷涂与热喷涂最大的区别是颗粒加热程度不同导致的其撞击工具表面之前的状态不同。传统热喷涂技术的三大热源温度分别为:燃烧火焰(温度均高于2000℃)、电弧(温度达到5000

以上)、等离子体(温度更是高达16000℃),颗粒在沉积过程中伴随颗粒的熔化、烧蚀、氧化等问题;而冷喷涂技术的颗粒在沉积过程中不发生熔化,颗粒以固态形成沉积。因此,两种技术在基板上的沉积行为和沉积机理也存在本质区别:热喷涂颗粒的沉积主要伴随熔滴的撞击、焊接、冷却、凝固、相变等冶金过程^[7-9];冷喷涂则主要是固态颗粒在极高应、应变和应变速率条件下,发生“绝热剪切失稳”引起的塑性流变和咬合等机械过程^[52]。不同材料要实现冷喷涂沉积存在一个“临界速度”,只有当颗粒速度大于该速度时,颗粒对基材的冲蚀作用才能转化为穿孔效应沉积形成涂层^[10-14]。相比热喷涂和激光熔覆技术等以冶金反应为特点的增材制造技术,其优势主要有^[15-19]:

- 1) 喷涂效率高,沉积厚度可控;
- 2) 喷涂过程氧化少,无烧蚀和晶粒长大现象,适合喷涂热敏、温敏、相变敏感材料;
- 3) 涂层化学成分与原材料保持一致;
- 4) 对基体的热影响极小;
- 5) 涂层具有压应力;

2 冷喷涂氧化敏感金属材料

2.1 冷喷涂镁系金属材料

镁是最轻的结构金属材料之一,其熔点为648.9℃,密度仅为1.738g/cm³,结构特性类似于铝,具有比强度和比刚度高、阻尼性和切削性好等优点,镁及其合金作为一种极具潜力的轻质材料,广泛应用于宇航技术、飞机机身、航空发动机零件、导弹等国防军工领域^[20]。但镁容易在空气中自燃,具有很强的化学活性和还原性,很难用高热输入技术沉积制备。Suo X. K.等利用冷喷涂技术在铝基材表面成功沉积制备出镁涂层,并研究了铝基材在100、200和300℃预热情况下对Mg涂层组织结构和结合强度的影响规律,结果表明基材预热对镁涂层显微硬度和孔隙率没有明显的影响,但当基材预热温度为200℃时涂层结合强度达到最大(11.6±0.5 MPa),基材预热温度对镁沉积层与基体结合强度的关系如图1所示^[21]。低燃点、轻质金属镁的冷喷涂有效沉积是冷喷涂技术的一

大突破,这也证明冷喷涂技术在易燃、易氧化金属材料方面应用的可行性。

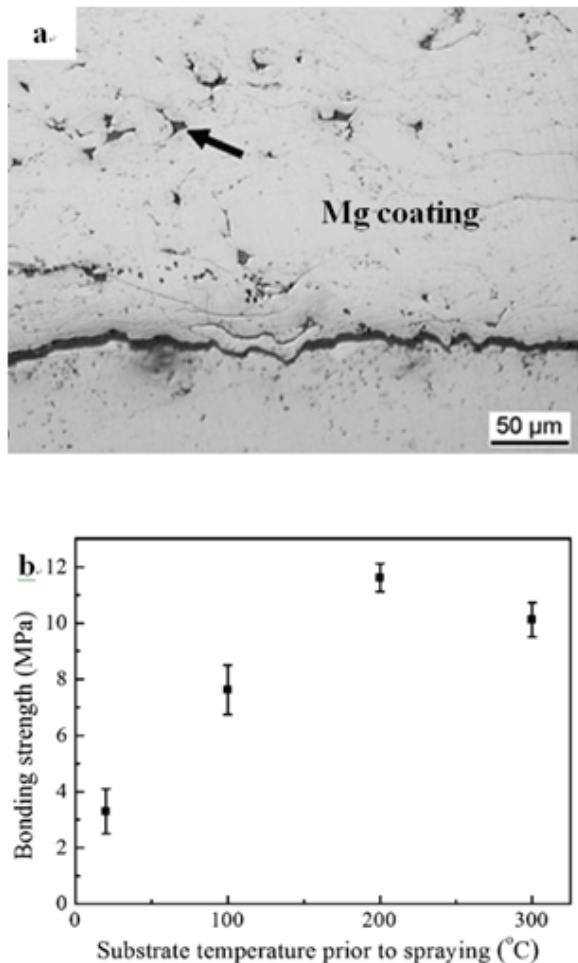


图1 基材预热温度对冷喷涂镁沉积层与基体间结合强度的影响^[21]: (a) Mg 沉积层显微组织; (b) 基材温度与涂层结合强度关系

Fig.1 Effect of substrate temperature on bonding strength between Mg coating produced by cold spray and substrate^[21] (a) Microstructure of Mg coating; (b) Relation between bonding strength and substrate temperature

2.2 冷喷涂铝系金属材料

铝合金是制造飞机的主要结构材料,常被用于制造飞机蒙皮、前机匣、飞机框架等,占飞机用料的50~70%^[22]。铝合金在焊接、热喷涂等过程中容易氧化生成氧化铝夹杂。Ajdelaztajn L. 和 Richer P. 等在铝基材上沉积制备出高温 2618 铝合

金 (Al-Cu-Mg-Fe-Ni)、Al-Mg 涂层,发现铝合金颗粒在沉积过程中发生明显的加工硬化^[23,24];为了优化冷喷涂铝系材料沉积层的性能,Sabard A. 等进行了冷喷涂专用气雾化 7075 铝合金粉末的研究,通过对雾化粉末进行固溶热处理能够去除固溶偏析,降低粉末颗粒硬度,显著提高合金粉末的沉积效率^[25];Wei Y. K. 等利用 200~300 μm 的 1Cr18 颗粒作为喷丸粒子在 AZ31B 镁合金表面沉积涂层,当喷丸粒子体积从 20% 提高到 60% 的时候,沉积层孔隙率从 10.7% 降低到 0.4%^[26];Murray J. W. 等针对冷喷涂高强 C355 铝合金在修复航空部件时存在的高孔隙率和微裂纹问题,研究热处理的对修复层组织结构和力学性能的影响,结果表明在 250 °C 热处理后孔隙率降为 0.02%^[27]。为了进一步提升冷喷涂沉积层力学性能,Spencer K. 等人在镁合金 AZ91E 上沉积不同配比 Al₂O₃-Al/6061Al 复合涂层,发现在无热处理的情况下涂层与基体的结合强度为 42 MPa^[28,29]。Aldwell B. 等对冷喷涂增材制造 6060 铝合金的机械加工性能研究发现,如对沉积层进行热处理,切屑变得连续,接近棒材的切屑形态,但沉积层的刚度在热处理前后没有变化,刚度可达到块体材料的 85~89%^[30];Huang R Z 等^[31] 也发现尽管冷喷涂 Al 涂层伸长率小于 5%,但抗拉强度与块体材料相似。

2.3 冷喷涂铜系金属材料

铜在有色金属材料的消费中仅次于铝,而铜系金属材料在焊接、激光熔覆、热喷涂过程中存在以下问题:1) 高温下铜容易氧化,产生缺陷;2) 高温环境下过饱和氢的析出,容易导致气孔产生;3) 由于导热快,铜在焊接或者熔覆过程中需要预热^[32]。利用冷喷涂技术的低温固体特性能有效避免沉积过程中颗粒的氧化问题。如 Li Y. J. 等对比研究发现电解铜粉的沉积效率是雾化粉末的两倍,且两种铜粉孔隙率均低于 0.5%,电解铜粉更适合于冷喷涂增材制造^[33];Zhang Y. Y. 等利用冷喷涂在 6060 铝合金表面制备出 Cu-MoS₂ 复合减摩涂层,复合涂层摩擦系数比纯铜涂层降低 75%^[34];徐玲玲等在 6061 铝合金表面制备导电铜涂层^[35]。在冷喷涂 Cu 沉积层力学性能研

究方面, Li W. Y. 等利用冷喷涂技术在火箭发动机部件上制备用于冷却的 Cu-4Cr-2Nb 合金涂层, 通过对沉积层进行 350 °C 真空热处理, 使其性能达到真空等离子喷涂制备的沉积层性能^[36]; Kim Y. K. 等对冷喷涂制备的厚度 7mm, 直径为 7mm 的 Cu 棒进行室温压缩测试, 结果显示冷喷涂 Cu 棒屈服强度高达 340MPa^[37]; Huang R. Z. 等利用冷喷涂技术在 5052 铝合金、6063 铝合金和 316L 不锈钢三种基材表面沉积制备铜涂层, 发现当粒子速度大于 800m/s 的时候涂层与三种基体结合强度均可以超过 200MPa, 他们也发现尽管冷喷涂态 Cu 的延展率和伸长率都小于 5%, 但喷涂态 Cu 的抗拉强度优于块体 Cu 材料, 当热处理温度为 400 和 500 °C 的时候力学性能最优, 抗拉强度达到 340MPa, 伸长率达到 40%^[31,38]。

2.4 冷喷涂钛系金属材料

钛合金因具有比强度高、耐腐蚀好、热强度高突出优点而被称作“太空金属”或“海洋金属”, 其中 Ti-6Al-4V 合金因具有良好的综合性能, 其使用量已占全部钛合金的 75% ~ 85%^[39,40]。然而, 钛及其合金硬度较高, 冷喷涂过程中不易形变, 李文亚等冷喷涂制备出多孔钛材^[41]; 王祺等利用冷喷涂在 1Cr13 不锈钢基体上制备 Ti 涂层, 并证明沉积层中无氧化物存在^[42]; Yin S. 等利用冷喷涂将不规则 Ti 粉沉积在铝和不锈钢表面, 发现 Ti 颗粒在 Al 基材表面的沉积临界速率高于不锈钢基材^[43]; 为了进一步改善钛沉积层致密度, Luo X. T. 等提出原位喷丸致密化的方式, 沉积制备出高致密度的 Ti 和 TC4 涂层, 且随着粉末中喷丸粒子含量的增加沉积层加工硬化效应显著增强, 沉积层孔隙率随着喷丸粒子含量的升高显著下降, 冷喷涂原位喷丸钛沉积层显微组织如图 2 所示^[44]。

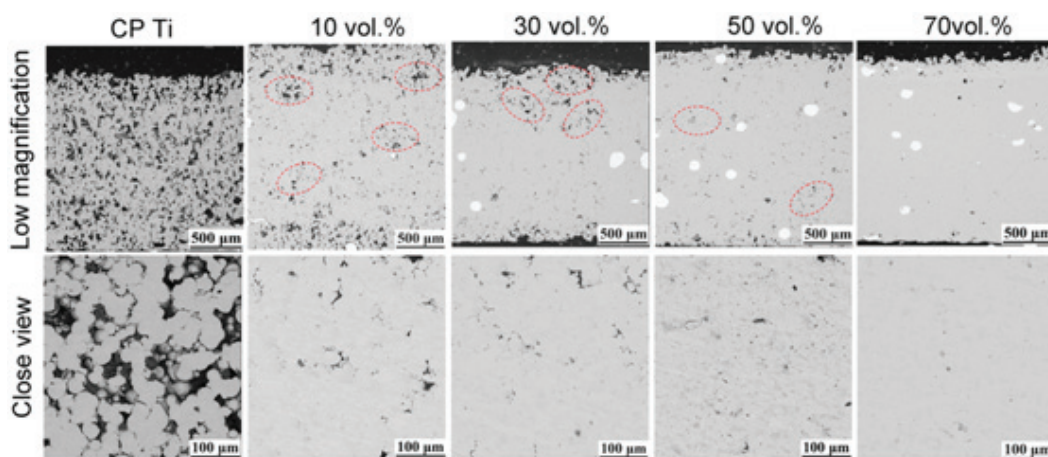


图 2 冷喷涂沉积 Ti 粉末与不同含量喷丸粒子沉积层显微组织^[44]

Fig.2 Microstructures of Ti coatings deposited with pure Ti powder and powder with different proportions of the SP particles^[44]

冷喷涂载气是影响粒子沉积速度的关键因素, Khun N. W. 等对比研究了氦气和氮气作为载气冷喷涂制备的 TC4 涂层的耐磨性和耐腐蚀性, 发现氦气喷涂 TC4 层具有较低的孔隙率、较高的硬度和结合强度, 耐磨性和耐盐雾腐蚀性均优于氮气喷涂涂层, 他们还在 TC4 表面沉积不同厚度的 Ti 涂层, 发现随着沉积层厚度的增加 Ti 涂层的硬度越高, 冷作硬化效应越显著, 导致厚沉积层的耐

磨性优于薄涂层^[45-47]; 除了载气因素, 粉末状态也是影响颗粒沉积效率的关键因素, Bhattiprolu V. S. 等对比研究了 TC4 粉末状态对沉积特性的影响, 发现等离子旋转雾化粉末沉积层孔隙率为 0.6%, 结合强度大于 65MPa, 脱氢 TC4 粉末需要优化工艺参数才能达到较到此水平^[48]。冷喷涂显微组织演变方面, Birt A. M. 等研究发现随着 TC4 颗粒在冷喷涂沉积过程中剪切形变程度的不同, 诱发马

显微组织转变为纳米尺度马氏体组织、 α 等轴晶和纳米尺度 α 晶粒^[49,50]。冷喷涂沉积层结合强度也是冷喷涂技术的瓶颈，Vidaller M. V. 等为了揭示沉积层与基材结合强度的关系，将球形 TC4 颗粒分别沉积在 Ti、TC4、Al 和 Mg 合金表面，结果表明沉积颗粒与基材的性质越相近结合强度越好^[51]；Goldbaum D. 等发现只有当 Ti 和 TC4 粒子的速度超过 1000m/s 的时候可能在形变粒子和基材间出现冶金结合，当 Ti 颗粒以 825m/s 速度沉积在预热温度为 400 的基材时结合强度可以达到 285MPa，Ti6Al4V 颗粒撞击在预热基材上的扁平结合结合强度从 100- 提升到 250MPa^[52]。Huang R Z 等^[31]发现冷喷涂态 Ti 抗拉强度和伸长率相比块体材料很差，经过 1000 的热处理后抗拉强度依然小于 200MPa，伸长率小于 0.5%。

为了改善冷喷涂钛合金性能，引入外场能量辅助也是一种有效的性能提升方式^[53,54]。Pertou

M. 等对激光预热和激光加热两种情况下沉积的 TC4 层与基体间结合强度进行研究，发现在喷涂前对基材进行激光烧蚀能够增强结合前度，当激光同步加热会影响沉积层间的结合强度^[55]；Alidokht S. A. 等利用冷喷涂沉积制备出耐磨性优异的 Ti-TiC 复合涂层^[56]；Matthew B 和 Lupoi R. 等利用同步激光辅助冷喷涂技术 3min 在直径 50mm 钢管上制备出厚度 4mm 的高致密钛涂层，结合强度 77 MPa，沉积原理和涂层形貌如图 3 所示^[57,58]。以上研究进展表明，冷喷涂钛系材料存在的问题主要有两个：1) 钛系材料较硬导致的沉积层致密性差的问题，2) 沉积层与基材之间的结合强度差。虽然研究者通过调整粉末状态、调整工艺参数、引入激光同步软化、同步引入喷丸致密化等方式，使冷喷涂钛合金涂层有了显著的性能优化和改善，但冷喷涂沉积层的应用可靠性依然有待提升。

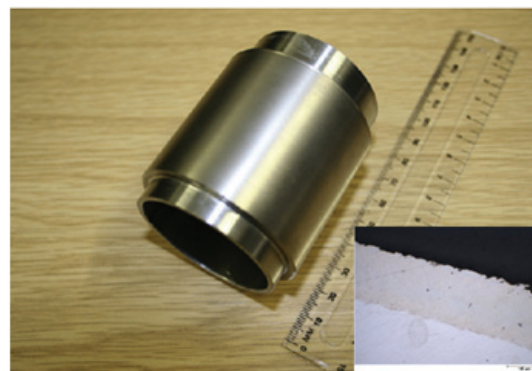
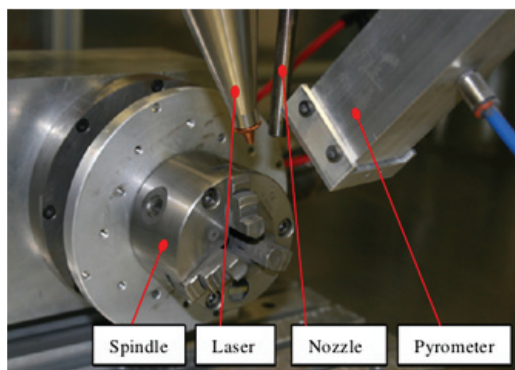


图 3 激光辅助冷喷涂沉积^[58](a) 激光辅助冷喷涂沉积系统 ;(b) 激光辅助冷喷涂沉积 Ti 试样

Fig.3 Laser-assisted cold spray^[58](a) Laser-assisted cold spray deposition system;(b)Ti specimen produced by laser-assisted cold spray

2.5 冷喷涂钨系材料

钨属于难熔金属材料，其熔点高达 3400，密度为 19.3 g/cm³，具有高硬度（莫氏 7.5）、低膨胀系数、低饱和蒸汽压和良好的导电性等特点，常用于制造航空航天、电子、核工业等极端服役环境零部件^[59-61]。然而，由于钨具有较高的熔点，且氧化敏感性高，很难使用常规的铸造方法和表面技术进行增材制造，通常这类零件都是采用粉末冶金的方式进行制备，但常规烧结态钨零件存

在密度低、强度低和氧化含量高等缺点。为了克服传统成型方法的不足，有研究者已经尝试利用激光选区熔化和电子束选区熔化的方式进行钨及其合金的增材制造，但增材制造过程中细小熔滴不稳定、球化现象显著，且整个成型过程需要在高纯度惰性保护气氛或真空环境工作，成型难度较大、效率低^[62]。冷喷涂技术的出现为难熔金属的沉积提供了新的途径，Jones M. 等利用激光辅助冷喷涂技术在 Mo 板上制备出致密的 W 涂层，沉

积层厚度超过 $300\mu\text{m}$ ，结合三点弯曲测试方法计算得到沉积层抗拉强度达到 724MPa ，沉积层组织特征及三点弯曲测试位移与载荷变化曲线如图

4 所示，这项研究结果有望用于 X 射线靶材的修复^[63]。

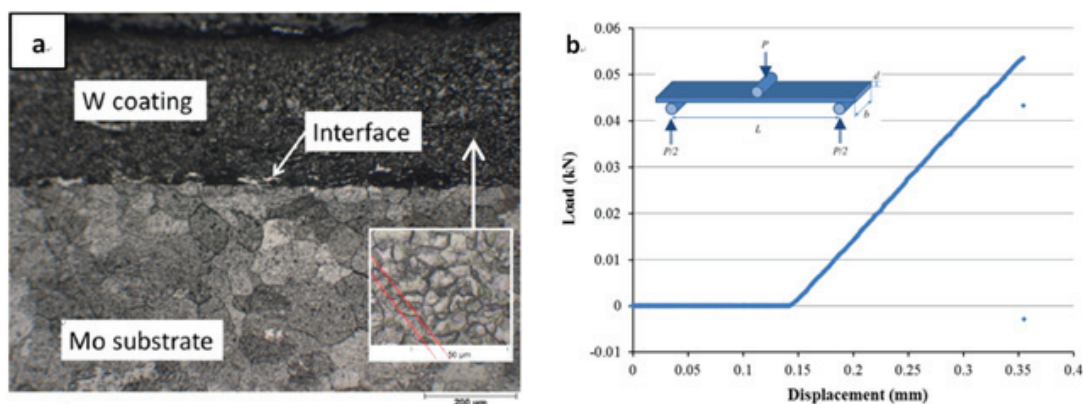


图 4 激光辅助冷喷涂在 Mo 基板沉积制备 W 涂层^[63]

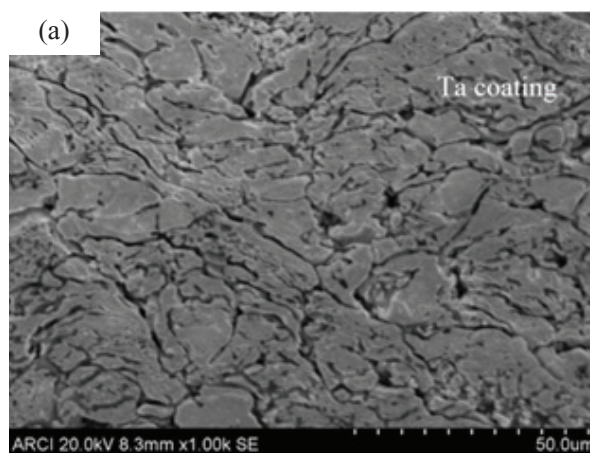
(a) 钨涂层显微组织 ;(b) 三点弯曲法测试所得载荷与位移变化曲线

Fig.4 Tungsten coating produced on the molybdenum substrate by laser-assisted cold spray^[63](a)Microstructure of tungsten; (b)The relationship between load and displacement obtained by three-point bending method

2.6 冷喷涂钽系材料

钽的熔点高达 3033°C ，密度为 16.68g/cm^3 ，塑-脆转变温度较低 (-196°C 以下)，其室温加工性、焊接性、延展性和抗氧化性均优于钨和钼，是重要的航空、航天和武器系统所需的高温结构材料，但钽及其合金的抗氧化性很差， 600°C 就开始发生氧化^[64,65]。金属钽优良的塑形非常适合于冷喷涂技术的塑形变形沉积特性，Koivuluoto H. 等系统研究了冷喷涂沉积钽涂层的沉积特性、显微组织结构、耐腐蚀性等，发现沉积层在 $3.5\text{wt}\%\text{NaCl}$ 溶液和 $40\text{wt}\%\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液中均表现出优异的耐腐蚀性，这证明沉积层中没有通孔缺陷；而且在 1M 的 KOH 溶液中冷喷涂钽涂层相比保护气氛等离子沉积钽涂层表现出更好的钝化反应，在 $1\text{wt}\%\text{HF}$ 溶液中冷喷涂钽比铸态钽表现出更好的耐腐蚀性^[65-67]。力学性能的好坏关系钽沉积层在结构件的应用，Bolelli G. 等利用深度传感压痕法对冷喷涂钽涂层的力学性能进行评估，证明沉积层力学性能与层状组织有直接关系^[68]；Kumar S. 等利用热处理优化钽涂层的性能，

并对不同温度热处理冷喷涂钽涂层的机械性能进行评价，发现当热处理温度为 1500°C 时沉积层的力学性能与钽块材相近，热处理温度与孔隙率、硬度和弹性模量的关系如图 5 所示^[69]。另外，Piercy B. 等还探索了冷喷涂钽在钛电极上的应用，结果表明冷喷涂钽涂层能够有效延长电极使用寿命，但同时也会增加催化剂的使用量^[70]。



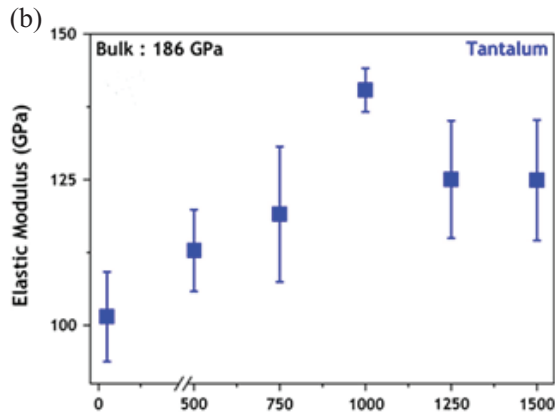


图5 冷喷涂钽沉积层热处理温度与组织结构和性能的关系^[69](a)冷喷涂钽沉积层显微组织；(b)沉积层热处理温度与弹性模量关系

Fig.5 Correlation between heat treatment temperature and structure, property of Ta coating deposited with cold spray^[69](a)Microstructure of Ta coating; (b)The relationship between heat treatment temperature of Ta coating and elasticity modulus

2.7 冷喷涂铌系材料

铌的熔点为 2467℃，密度为 8.57g/cm³，具有较好的延展性、物理化学性质稳定、和高温力学性能，其热中子俘获截面小，在腐蚀介质中极为稳定，已经成为航空、航天和核工业中高温结构件的重要候选材料之一，可用于制造液体和轨控火箭发动机喷管^[71,72]。尽管铌合金比传统的镍基和钴基高温合金极限工作温度还高几百度，但其抗氧化性能较差，纯铌在 600℃ 就发生粉化失效（即“pest”现象），严重制约了铌系材料的制备手段^[73]。关于冷喷涂沉积铌的研究工作主要来自于 Kumar S. 等，他们使用空气作为载气，冷喷涂沉积铌涂层，通过对沉积层进行热处理消除孔隙和形变颗粒间结合界面，从而达到提高沉积层力学性能的目的，研究表明当热处理温度为 1500℃ 时沉积层弹性模量为 103GPa，几乎与铌块体材料相同；他们还结合有限元分析，深入研究了冷喷涂沉积铌涂层过程中颗粒状态与沉积条件之间的关系，发现粒子的结合状态主要受到颗粒温度和撞击速度的影响，粒子形变过程中产生的弹性形变能可用于评价粒子的沉积状态，通过模拟可知当铌颗粒的速度为 515m/s 时能

够获得良好结合界面的沉积层^[74,75]。

3 结论

本文针对冷喷涂技术在氧化敏感稀有金属材料方面的应用进行了综述，对现有国内外稀有金属冷喷涂研究方面的文献进行归纳总结。目前，冷喷涂有色金属研究主要集中在 Al 系和 Cu 系材料，而 Mg 系材料的冷喷涂研究还处于工艺探索阶段；Ti 系材料的冷喷涂研究也较多，但由于 Ti 系材料硬度较高，沉积层致密度和力学性能是制约其工业应用的关键问题；难熔金属的特点是高熔点，需要使用激光或电子束这类高能束才能沉积制备，冷喷涂的固态沉积特征恰巧避免了“难熔”问题，其中冷喷涂钽已经成功应用于钽靶材的增材制造和再制造，而铌和钨系材料的冷喷涂研究还处于工艺探索阶段。但将冷喷涂技术在稀有金属方面的应用还存在以下几个亟待解决的问题：1）如何通过合理的预处理和后处理策略来改善沉积层力学性能，提高沉积层可靠性需要系统研究；2）为了获得良好的沉积层质量，还需要结合冷喷涂技术特征开发冷喷涂专用粉末；3）针对不同系列沉积材料，开发适用于冷喷涂增材制造的专用喷嘴。总之，冷喷涂氧化敏感稀有金属材料的研究还处于工艺和基础理论探索阶段，受限于冷喷涂沉积层力学性能、涂层/基材间结合强度、昂贵的喷涂成本的原因，尚未有航空、航天结构件的成功应用。

参考文献

- [1] 葛志军, 邓琦林, 宋建丽, 等. 有色金属上激光熔覆的研究进展 [J]. 电加工与模具, 2006, (6):1-4.
- [2] 汪欣, 李争显, 杜继红, 等. 难熔金属表面高温防护涂层研究进展与技术展望 [J]. 装备环境工程, 2016, 13(3):1-11.
- [3] 郑欣, 白润, 王东辉, 等. 航天航空用难熔金属材料的研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(10): 1871-1875.
- [4] 柳建, 孟凡军, 殷凤良, 等. 热喷涂涂层与基体结合界面研究进展 [J]. 材料工程, 2017, 45(01):101-110.
- [5] ALKHEIMOV A P, KOSAREV V F, PAPYRIN A N. A Method of Cold Gas-dynamic Spraying[J]. Doklady Akademii Nauk SSSR, 1990, 315(05): 1062-1065.
- [6] ASSADI H, GARTNER F, STOLTENHOFF T, et al. Bonding Mechanism in Cold Gas Spraying[J]. Acta Materialia, 2003,

- 51(15): 4379-4394.
- [7] XIE L D, MA X Q, JORDAN E H, et al. Identification of Coating Deposition Mechanisms in the Solution-precursor Plasma-spray Process Using Model Spray Experiments[J]. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure Processing*, 2003, 362(1-2): 204-212.
- [8] SCHMIDT T, GARTNER F, ASSADI H, et al. Development of a Generalized Parameter Window for Cold Spray Deposition[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(03): 729-742.
- [9] WU J W, FANG H Y, YOON S, et al. The Rebound Phenomenon in Kinetic Spraying Deposition[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54(4): 665-669.
- [10] SINGH H, SIDHU T S, KALSI S B S, et al. Development of Cold Spray from Innovation to Emerging Future Coating Technology[J]. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2013, 35(3): 231-245.
- [11] LI S Q, DUAN Y P, GONG S L, et al. Microstructure and Deposition Mechanism of Laser-hybrid Plasma Spraying NiCr-Cr₃C₂ Coating[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42: 106-109.
- [12] LEE H Y, YU Y H, LEE Y C, et al. Cold Spray of SiC and Al₂O₃ with Soft Metal Incorporation: a Technical Contribution[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2004, 13(02): 184-189.
- [13] 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(08): 681-688.
- [14] 周香林, 张济山, 巫湘坤. 先进冷喷涂技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [15] WU X K, ZHANG J S, ZHOU X L, et al. Advanced Cold Spray Technology: Deposition Characteristics and Potential Applications[J]. *Science China-Technological Sciences*, 2012, 55(02): 357-368.
- [16] STOLTENHOFF T, KREYE H, RICHTER H J. An Analysis of the Cold Spray Process and its Coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2002, 11(04): 542-550.
- [17] PAPYRIN A. Cold Spray Technology[J]. *Advanced Materials Processes*, 2001, 159(09): 49-51.
- [18] PAPYRIN A, BLOSE R. Cold Spray Technology: From R&D to Commercial Applications[J]. *Materials Technology*, 2003, 18(02): 73-78.
- [19] IRISSOU E, LEGOUX J G, RYABININ A N, et al. Review on Cold Spray Process and Technology: Part I-Intellectual Property[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2008, 17(04): 495-516.
- [20] 韩文静, 宋进朝, 张晓光. 镁合金冷喷涂防护涂层的研究进展 [J]. *电镀与涂饰*, 2017, 36(22): 1239-1245.
- [21] SUO X K, YU M, LI W Y, et al. Effect of Substrate Preheating on Bonding Strength of Cold-Sprayed Mg Coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, 21(5): 1091-1098.
- [22] 柳东, 王浩程, 孙荣禄. 铝及其合金表面改性技术的研究与发展 [J]. *表面技术*, 2007, 36(5): 75-83.
- [23] AJDELSZTAJN L, ZUNIGA A, JODOIN B, et al. Cold Gas Dynamic Spraying of a High Temperature Al Alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201: 2109-2116.
- [24] RICHER P, JODOIN B, AJDELSZTAJN L, et al. Substrate Roughness and Thickness Effect on Cold Spray Nanocrystalline Al-Mg Coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2006, 15(2): 246-254.
- [25] SABARD A, VILLIERS H L, HUSSAIN T. Microstructural Evolution in Solution Heat Treatment of Gas-Atomized Al Alloy (7075) Powder for Cold Spray[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2018, 27: 145-158.
- [26] WEI Y K, LUO X T, LI C X, et al. Optimization of In-Situ Shot-Peening-Assisted Cold Spraying Parameters for Full Corrosion Protection of Mg Alloy by Fully Dense Al-Based Alloy Coating[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26: 173-183.
- [27] MURRAY J W, ZUCOLI M V, HUSSAIN T. Heat Treatment of Cold-Sprayed C355 Al for Repair: Microstructure and Mechanical Properties[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2018, 27: 159-168.
- [28] SPENCER K, LUZIN V, MATTHEWS N, et al. Residual Stresses in Cold Spray Al Coatings: the Effect of Alloying and of Process Parameters[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 206: 4249-4255.
- [29] SPENCER K, FABIJANIC D M, ZHANG M X. The use of Al-Al₂O₃ cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 204: 336-344.
- [30] ALDWELL B, KELLY E, WALL R, et al. Machinability of Al 6061 Deposited with Cold Spray Additive Manufacturing[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26: 1573-1584.
- [31] HUANG R Z, SONE M, MA W H, et al. The Effects of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Cold-sprayed Coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 258: 832-841.
- [32] 陈正涵, 孙晓峰, 史玉鹏, 等. 冷喷涂技术在铜质螺旋桨维修中的应用研究 [J]. *理论探究*, 2016, 8(3): 20-24.
- [33] LI Y J, LUO X T, LI C J. Dependency of Deposition Behavior, Microstructure and Properties of Cold Sprayed Cu on Morphology and Porosity of the Powder[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 328: 304-312.
- [34] ZHANG Y Y, SHOCKLEY M, VO P, et al. Tribological

- Behavior of a Cold-Sprayed Cu-MoS₂ Composite Coating During Dry Sliding Wear[J]. Tribology Letters, 2016, 62:9.
- [35] 徐玲玲, 周香林, 孙澄川, 等. 冷喷涂导热导电铜涂层的制备与研究[J]. 热喷涂技术, 2017, 9(04):7-12.
- [36] LI W Y, GUO X P, VERDY C, et al. Improvement of Microstructure and Property of Cold-sprayed Cu-4 at.%Cr-2 at.%Nb Alloy by Heat Treatment[J]. Scripta Materialia, 2006, 55:327-330.
- [37] KIM Y K, KIM K S, KIM H J, et al. Microstructure and Room Temperature Compressive Deformation Behavior of Cold-Sprayed High-Strength Cu Bulk Material[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2017, 26:1498-1508.
- [38] HUANG R Z, MA W H, FUKANUMA H. Development of Ultra-strong Adhesive Strength Coatings Using Cold Spray[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 258:832-841.
- [39] WANG X M, FENG F, KLECKA M A, et al. Characterization and Modeling of the Bonding Process in Cold Spray Additive Manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2015, 8: 149-162.
- [40] 刘莹, 曲周德, 王本贤. 钛合金 TC4 的研究开发与应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(1): 47-50.
- [41] 李文亚, 余敏, LIAO Han-lin. 真空热处理对冷喷涂多孔 Ti 组织与拉伸性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(10):902-905.
- [42] 王祺, 王洪仁, 杜敏. 冷喷涂钛涂层与 1Cr13 不锈钢的电偶腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(11):544-547.
- [43] YIN S, HE P J, LIAO H L, et al. Deposition Features of Ti Coating Using Irregular Powders in Cold Spray[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 23(6):984-990.
- [44] 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.
- [45] KHUN N W, TAN A W Y, BI K J W, et al. Effects of Working Gas on Wear and Corrosion Resistances of Cold Sprayed Ti-6Al-4V Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 302:1-12.
- [46] KHUN N W, TAN A W Y, LIU E. Mechanical and Tribological Properties of Cold-Sprayed Ti Coatings on Ti-6Al-4V Substrates[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2016, 25(4):715-724.
- [47] KHUN N W, TAN A W Y, SUN W, et al. Wear and Corrosion Resistance of Thick Ti-6Al-4V Coating Deposited on Ti-6Al-4V Substrate via High-Pressure Cold Spray[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2017, 26:1393-1407.
- [48] BHATTIPROLU V S, JOHNSON K W, OZDEMIR O C, et al. Influence of Feedstock Powder and Cold Spray Processing Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Cold Spray Depositions[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 335:1-12.
- [49] BIRT A M, CHAMPAGNE JR V K, SISSON JR RD, et al. Microstructural Analysis of Cold-Sprayed Ti-6Al-4V at the Micro- and Nano-Scale[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, 24(7):1277-1288.
- [50] BIRT A M, CHAMPAGNE JR V K, SISSON JR RD, et al. Microstructural Analysis of Ti-6Al-4V Powder for Cold Gas Dynamic Spray Applications[J]. Advanced Powder Technology, 2015, 26:1335-1347.
- [51] VIDALLER M V, LIST A, GAERTNER F, et al. Single Impact Bonding of Cold Sprayed Ti-6Al-4V Powders on Different Substrates[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, 24(4):644-658.
- [52] GOLDBAUM D, SHOCKLEY J M, CHROMIK R R, et al. The Effect of Deposition Conditions on Adhesion Strength of Ti and Ti6Al4V Cold Spray Splats[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(2):288-303.
- [53] 杨理京, 李争显, 黄春良, 等. 激光辅助冷喷涂制备高硬度材料涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(03):412-417.
- [54] 酉琪, 章德铭, 于月光, 等. 激光辅助冷喷涂技术应用进展[J]. 热喷涂技术, 2018, 10(02):15-21.
- [55] PERTON M, COSTIL S, WONG W, et al. Effect of Pulsed Laser Ablation and Continuous Laser Heating on the Adhesion and Cohesion of Cold Sprayed Ti-6Al-4V Coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(6):1322-1333.
- [56] ALIDOKHT S A, MUNAGALA V N V, CHROMIK R R. Role of Third Bodies in Friction and Wear of Cold-Sprayed Ti and Ti-TiC Composite Coatings[J]. Tribology Letters, 2017, 65:114.
- [57] BRAY M, COCKBURN A, O'NEILL W. The Laser-assisted Cold Spray Process and Deposit Characterisation[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203:2851-2857.
- [58] LUPOI R, SPARKES M, COCKBURN A, et al. High Speed Titanium Coatings by Supersonic Laser Deposition[J]. Materials Letters, 2011, 65:3205-3207.
- [59] COLMENARES-ANGULO J, MOLZ R, HAWLEY D, 等. 关于钨成分与涂层性能之间的关系[J]. 热喷涂技术, 2015, 7(04):61-66.
- [60] 崔云涛, 李炳山, 彭鹰, 等. 多元复合稀土钨电极的制备及其焊接特性研究[J]. 热喷涂技术, 2013, 5(02):65-68.
- [61] 刘其宗, 张迎春, 刘艳红, 等. 电沉积钨及钨合金涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(1):142-146.
- [62] 杨广宇, 汤慧萍, 刘楠, 等. 增材制造技术制备钨材料研究进展[J]. 热加工工艺, 2016, 45(24):16-18.
- [63] JONES M, COCKBURN A, LUPOI R, et al. Solid-state Manufacturing of Tungsten Deposits onto Molybdenum Substrates

- (上接62页)

- 涂层的组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(16): 117-119.
- [12] 程国东, 王引真, 秦清彬. 燃气流量对超音速喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ 涂层组织与冲蚀性能的影响[J]. 中国表面工程, 2008, 21(1): 41-44.
- [13] 姬寿长, 李争显, 杜继红, 等. $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 合金表面超音速火焰喷涂 $\text{WC-}12\text{Co}$ 涂层组织及相分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(11): 2005-2009.
- [14] 伍细斌. 热处理对 HVOF 喷涂制备低碳 $\text{WC-}12\text{Co}$ 涂层性能的影响[D]. 湖南大学, 2012.
- [15] Zhao XQ, Zhou HD, Chen JM. Comparative study of the friction and wear behavior of plasma sprayed conventional and nanostructured $\text{WC-}12\text{Co}$ coatings on stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 431(1-2): 290-297.
- [16] Jia K, Fischer T.E. Sliding wear of conventional and nanostructured cemented carbides[J]. Wear, 1997, 203(96): 310-318.
- [17] Chen H, Xu C, Zhou Q, et al. Micro-scale abrasive wear behaviour of HVOF sprayed and laser-remelted conventional and nanostructured WC-Co coatings[J]. Wear, 2005, 258(1): 333-338.
- [18] Almond E A, Roebuck B. Identification of optimum binder phase compositions for improved WC hard metals[J]. Materials Science and Engineering, 1988, 105(88): 237-248.
- [19] Qiao Y, Fischer T E, Dent A. The effects of fuel chemistry and feedstock powder structure on the mechanical and tribological properties of HVOF thermal-sprayed WC-Co coatings with very fine structures[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 172(1): 24-41.
- [20] Xie MX, Zhang SH, Li MX. Comparative investigation on HVOF sprayed carbide-based coatings[J]. Applied Surface Science, 2013, 273: 799-805.
- [21] Vashishtha N, Sapate S G, Bagde P, et al. Effect of heat treatment on friction and abrasive wear behavior of $\text{WC-}12\text{Co}$ and $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ coatings[J]. Tribology International, 2018, 118: 381-399.
- [22] Matthews S, Asadov A, Ruddell S, et al. Thermally induced metallurgical processes in $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ thermal spray coatings as a function of carbide dissolution[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 728(25): 445-463.
- [23] Bobzin K, Zhao L, Öte M, et al. Impact wear of an HVOF-sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ coating[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2018, 70: 191-196.