

# 镍基高温合金修复强化技术研究现状及发展趋势

李丹阳<sup>1a,2</sup>, 殷凤仕<sup>1b</sup>, 王晓明<sup>2</sup>, 朱胜<sup>2</sup>, 韩国峰<sup>2</sup>

(1.山东理工大学 a.化学化工学院 b.机械工程学院, 山东 淄博 255000;  
2.陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

**摘要:** 镍基高温合金具有优良的高温强度和抗氧化性能, 广泛应用于航空发动机、涡轮叶片等热端部件。其在高温、高压、高转速及交变负荷等恶劣条件下长期使用过程中, 易出现烧蚀、磨损等表面损伤和掉块、断裂等体积损伤。采用特定的表面工程技术和增材修复技术可有效恢复损伤零件的尺寸和性能, 为镍基高温合金综合使役性能的保持和再生提供可行途径。重点综述了表面改性、表面镀层、表面涂层、能束增材、能束能场复合等镍基高温合金修复强化技术国内外研究现状, 归纳总结了各修复方法的技术原理、工艺特点及应用范围。加强能束能场复合修复技术开发、能束能场与材料的作用机理, 以及修复过程形性协同调控等方面的研究, 对拓宽工艺适用范围、降低修复强化层缺陷以及增强修复机动时效性具有重要意义, 是镍基高温合金修复强化技术未来发展趋势。

**关键词:** 镍基高温合金; 表面工程; 增材修复; 修复强化; 多能束能场复合

**中图分类号:** TG430.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)08-0105-18

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.08.012

## Research Status and Development Trend of Reinforcement Technique of Nickel-based Superalloy

LI Dan-yang<sup>1a,2</sup>, YIN Feng-shi<sup>1b</sup>, WANG Xiao-ming<sup>2</sup>, ZHU Sheng<sup>2</sup>, HAN Guo-feng<sup>2</sup>

(1.a. School of Chemistry and Chemical Engineering, b. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2.Key Laboratory of National Defense Science and Technology of Equipment Remanufacturing Technology, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

**ABSTRACT:** Nickel-based superalloys are widely applied to the critical components of aeroengine turbine blades due to their superior strength and oxidation resistance at high temperature. During long-term repeated use under severe conditions such as high temperature, high pressure, high rotation speed and alternating load, nickel-based superalloys are prone to surface damage (such as ablation and wear), and volume damage (such as blockage and fracture). The use of specific surface engineering

收稿日期: 2020-01-02; 修订日期: 2020-03-15

Received: 2020-01-02; Revised: 2020-03-15

基金项目: 中国科协青年人才托举工程(2017QNRC001), 东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室研究基金资助项目(VCAME201706)

Fund: Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (YESS) (2017QNRC001) and Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion System Ministry of Education, Northeastern University (VCAME201706)

作者简介: 李丹阳(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: LI Dan-yang (1993—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 韩国峰(1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为表面工程。邮箱: faf428@sina.com

Corresponding author: HAN Guo-feng (1987—), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: surface engineering. E-mail: faf428@sina.com

引文格式: 李丹阳, 殷凤仕, 王晓明, 等. 镍基高温合金修复强化技术研究现状及发展趋势[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 105-122.

LI Dan-yang, YIN Feng-shi, WANG Xiao-ming, et al. Research status and development trend of reinforcement technique of nickel-based superalloy[J]. Surface technology, 2020, 49(8): 105-122.

techniques and additive repair techniques can quickly restore the size and performance of damaged parts, providing a viable way to maintain and regenerate of the comprehensive performance of nickel-based superalloys. The research status of surface modification, surface plating, surface coating, energy-carrying beam additive and energy beam energy field recombination and other nickel-base superalloy repair and strengthening technology was reviewed emphatically. The technical principles, process characteristics and application range of each repair reinforcement method were summarized. It is pointed out that strengthening the development of energy beam field composite repair technology, the action mechanism of energy beam field and materials, and the shape synergistic regulation of the repair process is of great significance to broaden the application scope of the process, reduce the defects of the repair reinforcement layer and enhance the timeliness of repairing the maneuver and it is also the future development trend of the nickel-based superalloy repair and reinforcement technology.

**KEY WORDS:** nickel-based superalloy; surface engineering; additive repair; repair reinforcement; multi-energy beam field compound

镍基高温合金具有组织结构稳定、抗氧化能力强和工作温度高等优异性能<sup>[1]</sup>,在合金 85%的熔点温度时(高达 650~1000 ℃)仍可保持较高的强度和良好的抗氧化性,因而在航空发动机和工业燃气轮机等热端部件得到广泛应用<sup>[2]</sup>。在现代航空发动机中,镍基高温合金的用量占发动机总质量的 80%左右。由于在高温、高燃气腐蚀、循环载荷、振动以及高推重比等严苛的工作环境中长期服役,镍基高温合金部件易发生烧蚀、掉块等损伤,严重制约着装备的正常使用和服役安全,给国民经济发展带来巨大损失<sup>[3]</sup>。

采用特定的表面工程技术和增材修复技术可有效恢复损伤零件的尺寸和性能,为镍基高温合金综合使役性能的保持和再生提供了可行途径。表面工程技术是指在对损伤零件表面进行预处理的基础上,通过表面改性、表面涂覆或者多种表面技术复合处理,改变固体金属表面形态、化学成分、组织结构和应力状态等技术的总称<sup>[4]</sup>;增材修复技术是指通过对缺损零件进行反求建模、成形分层、路径规划,并采用智能控制软件和适当的载能束增材工艺逐层堆积,最终实现损伤零件的尺寸恢复与性能快速提升的技术<sup>[5-6]</sup>。通过表面工程技术和增材修复技术不仅可以提高镍基合金耐高温腐蚀能力及高温力学性能,还可最大限度地挖掘镍基合金损伤零件所蕴含的附加值,避免废旧零件的直接回炉和再成形等一系列加工中的资源能源消耗和环境污染等问题。

本文综述了基于喷丸强化<sup>[7]</sup>、激光喷丸<sup>[8]</sup>、激光冲击强化<sup>[9]</sup>、化学气相沉积<sup>[10]</sup>、等离子喷涂<sup>[11]</sup>、超音速火焰喷涂<sup>[12]</sup>、冷喷涂<sup>[13]</sup>等的镍基高温合金表面修复强化技术,这些技术通过在镍基合金表面制备几微米到几百微米的修复层,对材料表面起到较好的防护作用。但是由于表面改性层和表面镀层较薄、涂层与基体难以形成冶金结合,修复强化质量受到较大影响。本文同时综述了基于激光熔覆、等离子熔覆、电子束熔覆的镍基合金增材修复技术,通过上述技术可在缺损基体表面制备冶金结合的修复体,实现镍基合金体积损伤修复。为进一步提高镍基高温合金修复层

服役性能,有研究者开发了电磁、超声等能场,火焰束、激光束等能束相结合的能束能场修复强化技术并开展工艺及性能研究,本文也对相关技术进行了综述。加强能束能场复合修复技术开发、能束能场与材料的作用机理,以及修复过程形性协同调控等方面的研究,对拓宽工艺适用范围、降低修复强化层缺陷以及增强修复机动时效性具有重要意义,是镍基高温合金修复强化技术未来发展趋势。

## 1 镍基高温合金修复强化技术研究现状

### 1.1 镍基高温合金表面改性技术

表面改性技术通过改变材料表面化学成分和微观结构达到提高材料表面性能的目的,具有操作方便快捷、适用范围广、成本低等特点,被广泛应用于镍基合金的表面强化。本文重点综述了喷丸强化、激光喷丸强化、激光冲击强化以及电子束表面改性等镍基高温合金表面改性技术,并总结了上述技术的优缺点和适用范围。

#### 1.1.1 镍基合金表面喷丸强化技术

喷丸强化是通过在表面微观弹、塑性形变中引入残余压应力来提高表面层金属微观屈服强度,延长金属部件的疲劳萌生寿命和扩展寿命的一类抗疲劳强化技术<sup>[14]</sup>,国内航空工业大多采用喷丸强化技术来提高转子零部件的疲劳强度。

中国航发北京航空材料研究院王欣等<sup>[15]</sup>对镍基高温合金 GH4169 疲劳试样进行喷丸试验,研究发现:随喷丸强度的增大,合金表面粗糙度呈上升趋势,但合金表面残余压应力随喷丸强度的增大而减小;镍基高温合金 GH4169 高温光滑弯曲疲劳寿命对喷丸强度不敏感,疲劳寿命随喷丸强度的增大而增大;表面残余应力-喷丸强度曲线均存在一个残余应力数值的极大点,当喷丸强度为 0 时, GH4169 表面残余应力为 -234 MPa,喷丸强度为 0.050 mmA 时,极大值约为

-827 MPa，如表 1 所示。上海交通大学陈艳华等<sup>[16-17]</sup>对 DD3 镍基单晶合金表面进行喷丸处理，研究发现：喷丸层中存在的残余压应力随喷丸层深度的增加，呈先增大后降低趋势，残余应力在 10 μm 层深处达到最大值；在(0.25+0.1) mmA 喷丸强度下，表面分布各向同性的残余应力，但随喷丸层厚的增加，应力分布呈各向异性，且在<110>方向存在较大的残余压应力和

层深。清华大学谢惠民<sup>[18]</sup>将聚焦离子束-电子束（FIB-EB）和真空镀膜复合工艺技术应用用于喷丸镍基高温合金表面，分别进行了在不同温度和保温时间下残余应力高温释放规律的研究，结果表明，随保温时间的延长，残余应力释放速度逐渐减小直到趋于稳定，800 ℃下接近完全释放。

表 1 不同喷丸工艺下 GH4169 合金的表面残余应力<sup>[15]</sup>  
Tab.1 Surface residual stress of the GH4169 alloy under different shot peening processes<sup>[15]</sup>

Alloy	Times	Shot peening strength/mmA						MPa
		0.050	0.067	0.083	0.100	0.150	0.200	
GH4169	1	-822.4	-805.9	-727.7	-695.5	-633.9	-622.4	
	2	-832.6	-813.3	-730.5	-685.5	-643.3	-624.2	
	Average	-827.5	-809.6	-729.1	-690.5	-638.6	-623.3	

喷丸强化通过表面微观塑性变形提高表层金属微观屈服强度，延长金属部件的疲劳寿命。镍基高温合金变形能力较强，喷丸产生微裂纹可能性较小，随喷丸强化因素大于弱化因素，因此喷丸强度越大，合金疲劳寿命越高。当喷丸强度控制不当时，可能会造成过喷丸，从而可能导致零件疲劳性能降低等严重问题。因此也需优化喷丸参数，在实际工业生产中防止出现喷丸“弱化”现象。

1.1.2 镍基合金表面激光喷丸强化技术

激光喷丸强化技术（Laser peening, LP）是一种新型材料表面改性技术，该技术结合了激光喷丸、动态应变时效以及动态析出的综合作用，在材料表面诱发晶粒细化、位错增值、纳米级颗粒析出等现象，可有效提高结构材料性能在高温环境下的稳定性，延缓残余压应力的高温释放速度，大幅改善结构零件的高温疲劳寿命<sup>[19-20]</sup>。激光温喷丸技术（Warm laser peening, WLP）<sup>[21]</sup>，是由激光喷丸强化技术基础上发展而来，其将预热表面的热效应与反冲力的机械效应相结合，可显著提高材料的高温稳定性。

江苏大学周建忠等<sup>[22-24]</sup>为了提高 Inconel 718 镍基高温合金耐热腐蚀性能，利用 Spit Light 2000 型纳秒激光器对合金表面进行激光喷丸强化处理。结果表明：喷丸区细化明显且晶粒形态出现了分层现象。激光喷丸强化试样经过 10、25 h 腐蚀后的质量损失分别为未处理试样的 18.9%和 17.9%。WLP 处理后，在 260 ℃下对试样进行热腐蚀测试，试样表面的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧化膜未出现明显剥落且没有 CrS、NiO 产物生成，分析认为 WLP 试样表面晶粒细化及 γ'相析出能有效减缓 O、S 的侵入，表明激光喷丸强化有效提高了该合金的耐热腐蚀性能。经处理后的试样表层出现高幅值的残余压应力，表层硬度显著提高，高温保持后试样的残余压应力发生释放，同时显微硬度降低，但强

化效果仍然存在。与室温激光喷丸强化相比，高温（260 ℃）激光喷丸强化处理后材料表面位错密度更大，晶粒细化更明显。在高温保温测试中，LP 较 WLP 残余应力释放幅度更快，位错密度减小明显，表明经 WLP 处理后材料高温稳定性更好，如图 1 所示。

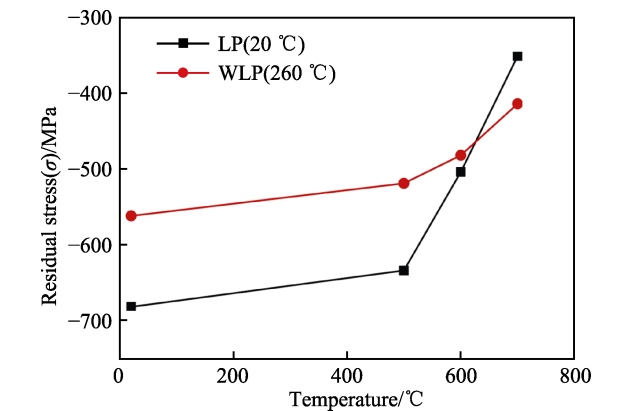


图 1 不同温度下保温 3 h 后残余应力的分布<sup>[24]</sup>  
Fig.1 Surface residual stress after exposed for 3 h at different temperature<sup>[24]</sup>

1.1.3 镍基合金表面激光冲击强化技术

激光冲击强化（Laser shock peening, LSP）是在激光喷丸（LP）<sup>[25]</sup>技术基础上发展起来的，又称为微尺度激光喷丸（μLSP）<sup>[26]</sup>。激光冲击强化技术处理后具有冷作硬化率低和热稳定性好等优点，比 LP 有更好的强化效果和工程应用，是针对有特殊表面强化要求的结构部件一种新型表面强化技术。空军工程大学聂祥樊等<sup>[27]</sup>利用激光冲击强化技术对定向凝固型镍基高温合金 GZ17G 进行强化处理，用于解决航空发动机涡轮叶片疲劳断裂问题，研究发现，水下无吸收保护层微激光高频冲击后可有效降低 GZ17G 塑性层深度，疲劳强度由 257 MPa 提高到 302 MPa，在 800 ℃保温 2 h 后，疲劳强度仍然会提高 11.7%，合金

浅表层观察到高密度位错, 而晶粒未发生明显细化。

王学德等<sup>[28]</sup>利用激光冲击强化技术改善了镍基高温合金 DZ17G 的力学性能。研究发现, 在无吸收保护层条件下, 1 次微激光冲击处理后, 材料表面发生熔融现象且出现深度为 100  $\mu\text{m}$  的硬化层, 硬度达到 503HV, 表面硬度和硬化层深度均随激光冲击次数的增加而增加, 同时合金表面形成大量的烧蚀孔洞和难溶的硬质颗粒。王学德团队<sup>[29]</sup>还将激光冲击强化技术应用于提高镍基高温合金 K24 的疲劳强度, 研究发现: 无吸收保护层条件下, 激光冲击强化处理一次后, 显微硬度提高 29.2%; 不等应力冲击后, 合金的疲劳强度由原始的 282 MPa 提高到 327 MPa, 合金疲劳强度值随不等应力冲击增加而提高。汪诚等<sup>[30]</sup>进一步研究了无保护层激光冲击强化技术 (Laser shock processing without coating, LSPwC) 和水砂纸磨除烧蚀层的复合工艺对镍基高温合金 GH3044 显微组织和力学性能的影响, 研究发现, 无保护层激光冲击强化合金后, 在表面产生 C、O 元素富集和残余拉、压应力交替存在的烧蚀层, 在烧蚀层下的晶粒和碳化物均有不同程度的细化。LSPwC 处理对该合金疲劳寿命提高不明显, 水砂纸磨除烧蚀层后, 试样表面残余压应力为 510 MPa, 影响层深为 1 mm, 疲劳寿命提高到原试样的 3 倍。

在激光冲击强化技术的基础上, 通过引入温热或高温条件, 结合热力耦合效应, 温度辅助激光冲击强化 (Temperature-assisted laser shock peening) 技术应运而生<sup>[31]</sup>。中国科学院李松夏等<sup>[32]</sup>利用脉冲激光器对镍基高温合金 GH4169 试件进行常温 and 高温辅助激光冲击强化处理, 结果表明, 高温辅助激光冲击强化处理后的残余压应力和显微硬度均比常温处理试样要高, 且随着温度的升高呈继续增加的趋势。适当地提高强化辅助温度可进一步提高合金的强化效果。

#### 1.1.4 电子束表面改性技术

电子束表面改性技术 (Electronic beam modification technology, EB) 是近 20 年来新发展起来的材料表面改性技术<sup>[33]</sup>, 电子束加热速度高达 109 K/s<sup>[34]</sup>, 可使极高的能量瞬间作用在材料表面, 使材料表层瞬间熔化或蒸发, 利用基体急剧冷却形成的温度梯度<sup>[35]</sup>及热膨胀产生的动态应力, 对材料表面微观组织甚至宏观状态产生强烈影响。

天津大学邹慧等<sup>[36]</sup>采用强流脉冲电子束对 DD3 镍基高温合金进行表面改性处理, 结果表明, HCPEB 处理后, 基体表面出现不均匀的熔坑, 并且随着脉冲次数的增加, 熔坑密度先由小变大, 再由大变小, 最后趋于平整。经过多次 HCPEB 轰击后, 截面形成晶粒细小的热影响区和成分均匀的重熔区, 在第 5 次 HCPEB 轰击后, 截面硬度达到最大。江苏大学吕鹏等<sup>[37]</sup>采用强脉冲电子束技术 (HCPEB) 对镍基高温合金 GH80A 燃气轮机叶片进行表面改性处理。20 次

HCPEB 处理后, GH80A 合金表面熔化形成 3  $\mu\text{m}$  厚的熔覆层, 层内出现位错滑移和晶粒细化现象, 如图 2 所示。在 850  $^{\circ}\text{C}$  下 HCPEB 处理 20 次后, 合金表面氧化膜连续且致密, 氧化动力学符合抛物线规律, 如图 3 所示, 氧化产物主要由 Ni-Cr-O 组成, 合金抗高温氧化能力提高了 35% 以上。

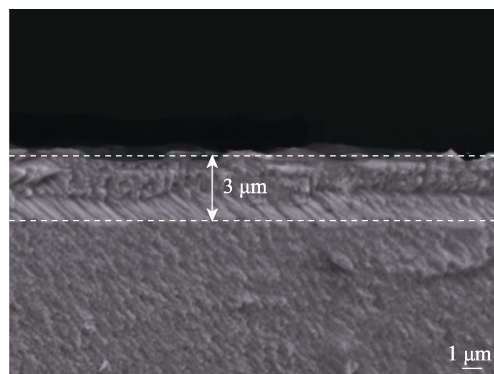


图 2 HCPEB 辐照 20 次样品的截面扫描图像<sup>[37]</sup>

Fig.2 SEM image for cross section of the sample irradiated by HCPEB for 20 times<sup>[37]</sup>

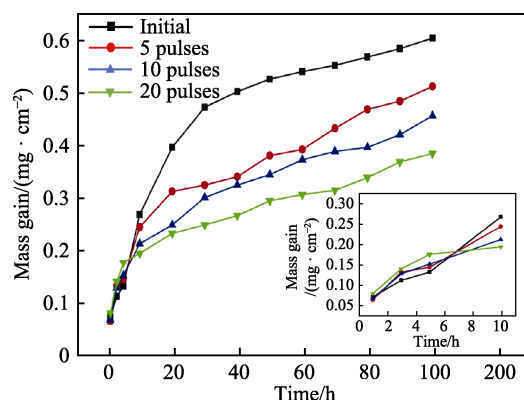


图 3 850  $^{\circ}\text{C}$  下不同辐照次数时 GH80A 合金试样的氧化增重曲线<sup>[37]</sup>

Fig.3 Oxidation weight gain curves of GH80A alloy sample irradiated for different times at 850  $^{\circ}\text{C}$ <sup>[37]</sup>

HAN Z. Y. 等<sup>[38]</sup>采用大气等离子喷涂技术在镍基高温合金 GH4169 表面制备了 CoCrAlY 涂层, 并利用真空电子束沉积技术在涂层表面制备纳米级铝膜。采用 HCPEB 技术对铝膜表面进行处理后, 镀铝涂层中出现 Al 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Co 基氧化物基本消失, CoCrAlY 涂层中孔隙、夹杂物显著降低; 此外, 涂层表面晶粒细化且分散均匀, 可以有效抑制腐蚀性气体向涂层内部渗入, 从而提高了涂层的抗氧化性。LIU H. L. 等<sup>[39]</sup>利用 HVOF 在 Inconel 617 基体上沉积 WC-CoCr 涂层, 研究了经过电子束重熔处理后所获得表面改性层的性能。研究发现, 经电子束处理后, 涂层孔隙等缺陷减小, 基体与涂层达到了良好的冶金结合。晶粒细化生成 Co<sub>6</sub>W<sub>6</sub>C 高硬度相, 熔覆层的显微硬度达到 11000 MPa, 是 Inconel 617 基体的两倍。通过摩擦磨损实验发现, 熔覆层磨损率较基体显著降低。



喷丸强化适用于大型零件的表面处理,效率较高,但处理后材料表面粗糙度较大,强化层深度较浅,残余压应力易消除,工件表面不适合进行后续机加工。激光冲击强化可以在镍基高温合金表面引发强烈的塑性变形,从而改变材料中的应力分布,在表层诱导较深的残余应力场,残余压应力耗散慢,表面粗糙度小且可维持更久的强化效果,经处理后可对工件进行机加工,但该技术工作效率较低,只适用于零件关键部位的强化。电子束产生的热-应力耦合作用会导致辐照表面晶粒细化,改变表层微观结构取向和应力状态,这是常规表面改性方法无法做到的。无论是喷丸强化、激光冲击强化,还是电子束表面改性,处理形成的残余应力在高温服役状态下都会发生释放,降低材料的强化效果。

## 1.2 镍基高温合金表面镀层技术

表面镀层技术通过在金属表面镀一层塑料或稀薄的金属,来获得比基体材料更高的硬度、耐磨性。其生产效率高,工艺可控性好,非常适合形状复杂零件的表面保护,渗层均匀,生产过程清洁环保,并且涂层厚度可控制度高。

### 1.2.1 镍基合金表面化学气相沉积技术

化学气相沉积是一种化工类的材料表面改性技术,主要利用含有薄膜元素的一种或几种气相化合物或单质在基体表面进行化学反应生成薄膜,包括三个步骤:1)产生挥发性物质;2)将挥发性物质运输到沉积区;3)基体上发生化学反应而生成固态产物<sup>[40]</sup>。

Jan Sieniawski 等<sup>[41]</sup>采用电镀和化学气相沉积的方法分别将钽材和铝合金涂层沉积到 In 713 LC、In 625 和 CMSX4 镍基高温合金基体表面,并对改性和未改性涂层进行氧化实验。研究发现,钽改性的铝化物比未改性的具有更好的抗氧化性,经过 15 个氧化循环,钽会抑制 Co、Cr 元素扩散;另外,钽会稳定  $\beta$ -NiAl 相,增强基材的高温使用寿命。JERZY MORGIEL<sup>[42]</sup>研究了采用 CVD 法在 CMSX4 高温合金上沉积改性铝涂层,并研究铈元素的微观结构和氧化行为。研究发现,沉积层中主要由  $\beta$ -NiAl 相构成,采用 TEM 分析发现有  $\sigma$  和  $\mu$  相的析出;铈元素在铝涂层中的溶解度高于在合金基体中的溶解度,且铈元素能提高涂层的抗氧化性,铈改性的铝化物涂层的抗氧化性是未改性的两倍。崔启正等<sup>[43]</sup>为了提高 K444 镍基高温合金抗高温氧化性和耐热腐蚀性,在基体表面利用 CVD 做渗铝工艺。研究表明,气流流速越慢,涂层平均厚度越大,但沿气流方向,涂层厚度有所差异;热处理后,涂层外表面生成新的 NiAl 相,涂层厚度增加了 2~10  $\mu\text{m}$ ,扩散层占总涂层比例从平均 30%下降到 27%,外层铝含量从平均 27%下降到 18%。任维鹏等<sup>[44]</sup>采用低压化学气相沉积法(LP-CVD)在

DZ466 定向凝固型镍基高温合金表面制备 CoAl 涂层,研究了在 900  $^{\circ}\text{C}$ 、约 5000 h 恒温热暴露实验中涂层的高温氧化行为和内部组织演变规律。结果表明,高温氧化会促进涂层表面生成致密的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜,合金的抗氧化性能提高;涂层的基体相  $\beta$ -NiAl/CoAl 会转变为  $\gamma$ -Ni<sub>3</sub>Al 相,基体与涂层的元素互扩散优先在靠近基体侧进行,经过长时间热暴露后,涂层中析出的  $\alpha$ -Cr 在碳化物附近形核并依附于其上生长。

### 1.2.2 镍基合金表面物理气相沉积技术

物理气相沉积技术(Physical vapour deposition, PVD)是在真空环境下,采用物理方法将固体或液体表面气化成气态原子、分子或部分电离成离子,并通过低压气体在基体表面沉积具有某种特殊功能的薄膜<sup>[45]</sup>。电子束-物理气相沉积技术(EB-PVD)是电子束技术和物理气相沉积技术相结合的材料表面改性技术产物。EB-PVD 属于溅射镀,在高真空度的环境下用高能电子束轰击靶材,使其以原子或分子的形式沉积到基体表面<sup>[46]</sup>。

北京航空航天大学王喜忠等<sup>[47]</sup>利用 EB-PVD 技术在 K3 型镍基高温合金表面制备了  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7(\text{LC})/8\text{YSZ}$  双陶瓷热障涂层,用以提高材料在高温燃气热腐蚀条件下的组织结构稳定性,研究发现,该陶瓷涂层在 950  $^{\circ}\text{C}$  高温热暴露 100 h 未见相变与分解,表现出极强的抗高温腐蚀性能。涂层表面生成了致密的氧化层,在循环热腐蚀过程中没有发生剥落失效。J. M. Saldana<sup>[48]</sup>利用磁控溅射法将 NiAlCr-X 涂层沉积到 In100 和 CMSX-4 镍基高温合金表面,利用物理气相沉积的方法在该合金基体上制备了掺杂 Hf 和 Zr 元素的热障涂层,研究发现,基体合金与掺杂元素类型对热障涂层使用寿命有显著影响。当无 Hf 和 Zr 元素的添加时,会导致涂层中形成裂纹缺陷轻微,影响涂层使用寿命;在 NiAlCr-X 涂层中添加 Zr 元素,可使 CMSX-4 比 In100 基体有更长的使用周期,而添加 Hf 会出现相反的效果。Liang S. J.<sup>[49]</sup>利用电子束物理气相沉积(EB-PVD)的方法在高 Mo 含量的 IC211 镍基单晶高温合金基体上制备了 NiAlHf 和 NiAlHfCrSi 两种合金复合涂层。研究发现, NiAlHf 涂层较 NiAlHfCrSi 涂层的晶粒尺寸更均匀;在 1150  $^{\circ}\text{C}$  循环氧化, NiAlHfCrSi 涂层中 Al 元素的扩散速度较 NiAlHf 涂层中的扩散速度慢; NiAlHfCrSi 涂层相比于 NiAlHf 具有更好的耐蚀性。

PVD 制备工艺过程简单,耗材少,对环境无污染,基体表面生成均匀致密保护膜,但是膜与基体结合力较弱,易发生破碎、脱落等现象,镀膜不耐磨且没有方向性。CVD 技术工艺可控性较强,且在气态下进行沉积,适用于修复复杂零件的表面改性要求,但是参与沉积的气体易燃易爆或有毒,要在特定区域采取防止污染环境的措施,同时 CVD 成膜时的工作温度高于 PVD,在实际应用上受到一定的限制。

### 1.3 镍基高温合金表面涂层制备技术

#### 1.3.1 镍基合金等离子喷涂修复技术

等离子喷涂 (Plasma spraying, PS) 是一种表面强化技术制备方法<sup>[50]</sup>之一。等离子喷涂是以高能束热源等离子弧为热源的热喷涂技术<sup>[51]</sup>, 其横截面积的能量可高达  $10^5 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ , 弧柱中心温度可升高达到  $15\,000 \sim 33\,000 \text{ K}$ 。等离子喷涂技术分为大气等离子喷涂和低压等离子喷涂技术。大气等离子喷涂 (Air plasma spraying, APS)<sup>[52]</sup>是在大气条件下, 利用等离子射流将金属或者是非金属粉末加热到熔融或半熔融状态, 并随高速气流喷射到工件表面形成涂层。低压等离子喷涂 (Low pressure plasma spraying, LPPS)<sup>[53]</sup>是将等离子喷涂工艺在低压保护性气体中操作, 从而获得不受污染、结合强度高、致密的涂层的一种喷涂工艺。

中南大学罗顺、陈和兴等<sup>[54]</sup>采用低压等离子喷涂的方法在镍基耐热合金基体表面制备了 NiCoCrAlYTa 热障涂层, 经扩散热处理后, 涂层与基体结合界面两侧出现元素扩散带, 出现明显的冶金结合, 可以较大程度提高涂层的结合强度。他们采用涂盐法研究了  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  对试样在  $1123 \text{ K}$  空气中热腐蚀的影响, 镍基合金基体表面出现开裂、剥落以及生成蓬松的腐蚀产物, 而 NiCoCrAlYTa 涂层腐蚀倾向较小, 宏观上没有腐蚀产物生成, 表面形成一层均匀致密的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜, 没有形成内氧化和内硫化, 表现出优异的抗热腐蚀性能。刘伟等<sup>[55]</sup>为了提高 GH586 镍基合金抗高温氧化性能, 采用等离子喷涂技术在该合金表面制备了 CoCrAlYTaSi 涂层。研究发现, 涂层氧化速率曲线呈明显的抛物线上升趋势; 涂层中 Al 元素优先与氧生成  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , Cr 和 Si 元素也会发生氧化, 并最终形成一层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  为主的混合氧化膜, 阻止外界氧元素向内部扩散, 对基体材料起到很好的保护作用。曾威等<sup>[56]</sup>利用等离子喷涂在 GH3536 镍基高温合金表面制备了 NiAlW 涂层, 涂层主要以  $\beta\text{-NiAl}$  相组成。在  $600^\circ\text{C}$  下, 涂层的耐磨损性能高于基体材料, GH3536 合金基体与 NiAlW 涂层的磨损率分别为  $1.53 \times 10^{-4}$ 、 $9.04 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , 涂层磨损率远低于镍基高温合金基体, 表明涂层比基体在  $600^\circ\text{C}$  时有更良好的耐磨损性能, 摩擦因数曲线与磨痕三维形貌如图 4 所示。

K. N. Pandey<sup>[57]</sup>采用大气等离子喷涂 (APS) 技术在 Inconel 800 镍基高温合金基体表面制备了热障涂层 (CoNiCrAlY), 用于研究热障涂层 (CoNiCrAlY) 在高温应用中的适用性。通过 TEM 分析发现, 该热障涂层中存在  $\gamma/\gamma'$  相纳米级晶粒, 从而使 CoNiCrAlY 热障涂层具有出色的耐热循环稳定性, 适合高温应用。H. Pei 等<sup>[58]</sup>采用低压等离子喷涂 (LPPS) 和超音速火焰喷涂 (HVOF) 在铸造 Ni 基高温合金 K438 上制备了 Ni-Cr-Al-Y 涂层, 并对涂层进行了显微组织、

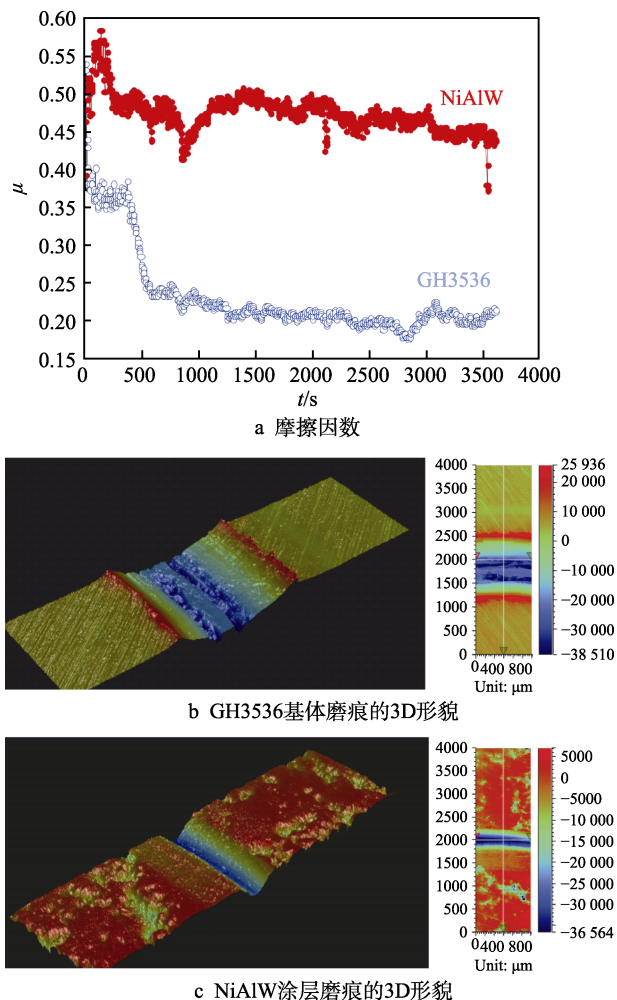


图4  $600^\circ\text{C}$  下 GH3536 基体及 NiAlW 涂层的摩擦因数及磨痕 3D 形貌<sup>[56]</sup>

Fig.4 Friction coefficients and 3D morphologies of wear tracks of GH3536 substrate and NiAlW coating at  $600^\circ\text{C}$ <sup>[56]</sup>: a) friction coefficient; b) 3D morphology of wear track of GH3536 substrate; c) 3D morphology of wear track of NiAlW coating

元素分布及基本性能对比研究。结果表明, LPPS 涂层无分层结构, 具有较高的显微硬度和良好的抗氧化性, 且氧含量低; HVOF 涂层具有典型的层状结构, 显微硬度低, 抗氧化性能差, 且氧含量较高。在两种工艺制备的涂层中均发现元素扩散现象, 低压等离子喷涂 (LPPS) 较超音速火焰喷涂 (HVOF) 制备的 Ni-Cr-Al-Y 涂层具有更优良的力学性能和高温稳定性, 适用于高温工作环境中。

#### 1.3.2 镍基合金超音速火焰喷涂修复技术

超音速火焰喷涂<sup>[59]</sup>中, 进入燃烧室的液体燃烧, 发生强烈的气相反应, 燃烧放出的热能使产物剧烈膨胀, 此膨胀气体流经 Laval 喷嘴时受喷嘴的约束形成超音速高温焰流。此焰流加热、加速喷涂材料至基体表面, 形成高质量涂层。超音速火焰喷涂技术分为氧-燃料超音速火焰喷涂和空气-燃料超音速喷涂技术。氧-燃料超音速火焰喷涂 (High-velocity oxygen-fuel,

HVOF) 是将燃气 (如氢气、丙烯、丙烷、乙炔) 或者液体燃料 (如煤油、柴油等) 与氧气在燃烧室内进行充分混合燃烧<sup>[60]</sup>。空气-燃料超音速火焰喷涂技术 (High-velocity air-fuel, HVOF)<sup>[61]</sup>。是利用空气作为燃料。与传统热喷涂技术相比, 该技术具有焰流速度快、喷涂火焰温度低等特点, 可制备出孔隙率较低的纳米结构涂层, 同时还可以抑制脱碳的发生, 且涂层有较高硬度和结合强度, 但同时也会出现热喷涂导致涂层残余应力较高等现象。

Christophe Lyphout、Per Nylen 等<sup>[62]</sup>利用氧-燃料超音速火焰喷涂 (HVOF) 在 In718 合金基体上制备 In718 合金涂层, 对喷涂过程中颗粒的飞行特征、涂层内部残余应力以及涂层与基体的结合强度进行了研究。研究发现, 涂层厚度达到 2.5 mm 时, 最大结合强度为 110 MPa, 结合强度随着喷涂角度的减小而降低, 但可以通过提高气体流量或降低粉末的进给率来提高涂层的显微硬度与结合强度。Lars Gosta

Ostergren 等<sup>[63]</sup>利用超音速火焰喷涂制备 In 718 合金涂层对航空零部件 (In718 合金部件) 进行修复, 研究发现, 热喷涂制备的涂层组织各向异性会对涂层材料整体性能产生很大影响。采用微压痕、纳米压痕和四点压痕弯曲实验进行研究, 发现涂层不同区域性能差异较大, 这是由于涂层微观结构的不均匀性导致的。结合上述测试可以更深入了解 HVOF 涂层杨氏模量的特点, 从而提供合理的修复工艺。

天津大学叶福兴、牛安宁等<sup>[64]</sup>采用有限元法研究了超音速火焰喷涂 (HVOF) 过程中 WC-17Co 颗粒与 In718 基体的碰撞行为, 分析表明, WC-17Co 颗粒与基体材料碰撞瞬间, 温度处于液相与固相线之间, 颗粒从固态转变为半熔融状态, 如图 5 所示。对于直径分别为 15、30、45  $\mu\text{m}$  的喷涂颗粒, 与基体碰撞后达到最大的等效塑性应变的时间分别为 32、64、96 ns, 颗粒直径越大, 达到最大塑性变形的时间越长。

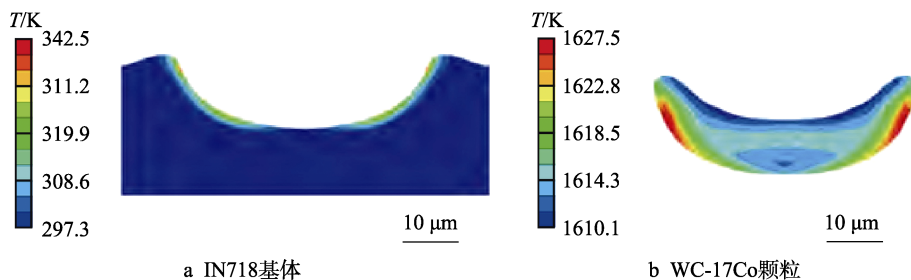


图 5 直径 30  $\mu\text{m}$  粒子撞击后 80 ns 时的温度分布历程<sup>[64]</sup>

Fig.5 Temperature distribution of 30  $\mu\text{m}$  particle impacted at 80 ns<sup>[64]</sup>: a) IN718 substrate; b) WC-17Co particle

李云初、毛杰等<sup>[65]</sup>利用超音速火焰喷涂在一种镍基单晶高温合金表面制备了 NiCoCrAlYTa 合金涂层, 结果表明, 低温超音速火焰喷涂制备的涂层在 900、1000、1100  $^{\circ}\text{C}$  均达到完全抗氧化级别, 涂层在 900  $^{\circ}\text{C}$  氧化时, 先生成  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ , 后随着氧化时间的延长转变为稳定的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  氧化相, 在 1000  $^{\circ}\text{C}$  氧化 200 h, 涂层表面会生成致密连续的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  薄膜, 在 1100  $^{\circ}\text{C}$  氧化 200 h, 生成外层为  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和尖晶石氧化物、内层为  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  的氧化层。涂层表面通过生长不同种类、形态的氧化膜阻止外界氧元素继续向涂层、基体内部扩散, 对提高涂层抗高温氧化性能起到积极作用。徐涛等<sup>[66]</sup>为了提高 Inconel 690 镍基合金的耐磨性, 采用了超音速火焰喷涂技术在 Inconel 690 合金表面制备了 WC-10Co-4Cr 和 CoCrW 两种涂层。研究表明, WC-10Co-4Cr 和 CoCrW 涂层的摩擦因数均小于 Inconel 690 合金基体, WC-10Co-4Cr 涂层的耐磨性优于 CoCrW 涂层, 两种涂层的磨痕表面均存在剥落现象, 且磨损机制主要以磨粒磨损为主。

### 1.3.3 镍基合金冷喷涂修复技术

冷气体动力喷涂技术 (Cold gas dynamic spray, CGDS) 简称冷喷涂 (Cold spray), 是利用空气动力

学原理将高压气源 (300~1200 m/s) 通过 Laval 喷管产生的超高速气流将固态粉末颗粒带动到极高的速度撞击基板, 通过产生剧烈的塑性变形沉积形成涂层<sup>[67]</sup>。冷喷涂技术因在喷涂过程中颗粒温度低于其熔点, 减少了喷涂过程中的氧化、氮化、烧蚀、相变等现象, 这使得传统热喷涂技术难以制备得到的氧化敏感性、非晶、纳米材料涂层成为可能<sup>[68-69]</sup>。此外, 冷喷涂在装备再制造领域也有广泛应用, 可以实现失效部件现场快速修复。虽然喷涂颗粒在冷喷涂过程中保持了原有的化学成分, 但是该工艺只是依靠喷涂颗粒撞击基板产生的塑性变形, 形成沉积涂层, 这样造成沉积涂层与基体的结合强度较低, 极大地限制了该技术进一步的实施与应用<sup>[70]</sup>。影响喷涂颗粒速度的因素主要有: 喷管几何性质、粒子密度、气体压力以及喷涂颗粒预热温度等。

新加坡南洋理工大学 Wen Sun、Ayan Bhowmik 等<sup>[71-72]</sup>利用高压冷喷涂技术在镍基高温合金 In 718 基体上制备了纯 In718 涂层和 MAR-M002 合金复合涂层, 研究了热处理对复合涂层在高温环境中的组织演变和化学元素扩散等的影响。In718 基体与涂层颗粒边界形成约为 10  $\mu\text{m}$  宽的扩散区, 如图 6 所示。热处理之后, 合金元素扩散作用可有效消除涂层中的缺



陷,使复合涂层的孔隙率降低到 1.2%左右,并且 MAR-M002 复合涂层的显微硬度和弹性模量也显著高于基体 In718 合金,如图 7 所示。在基体表面预热条件下,涂层与基体的结合强度会有更大程度的提高。在室温下,大约有一半的 In718 合金粉末颗粒粘附在基体表面并且没有明显的射流特征。当温度升高

到 100 °C 时,颗粒与基体结合处还有明显的缺口;当预热温度达到 200 °C 时,在结合界面右侧没有形成缺口,可以认为涂层与基体形成良好的结合迹象;当预热温度达到 450 °C 时,形成的金属射流更加明显,In718 合金粉末几乎全部与基体结合,如图 8 所示。

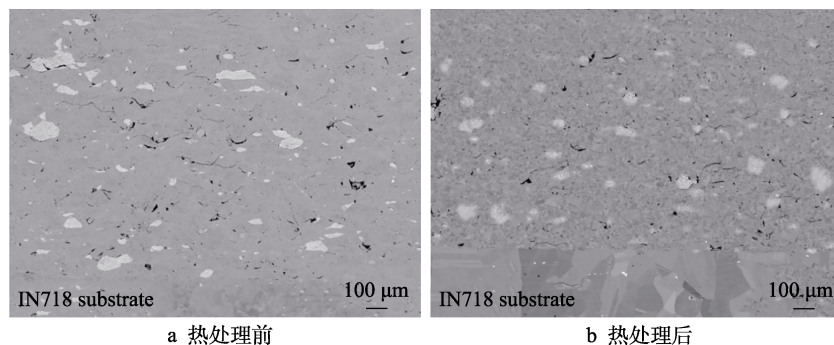


图 6 涂层的微观组织<sup>[71]</sup>

Fig.6 Microstructure of coating<sup>[71]</sup>: a) before thermal treatment; b) after thermal treatment

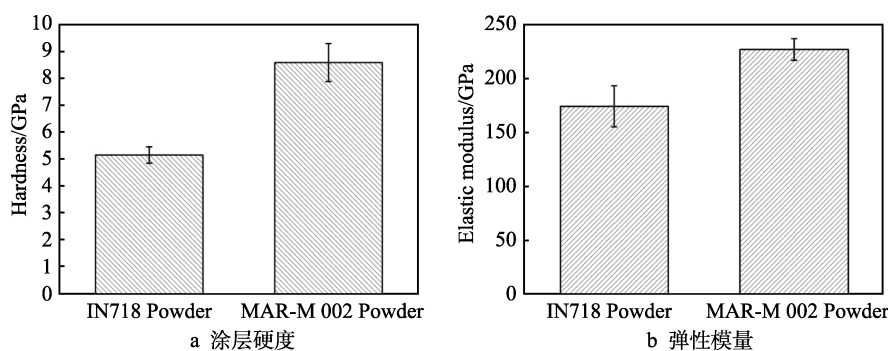


图 7 In718 和 MAR-M002 涂层的硬度和弹性模量<sup>[71]</sup>

Fig.7 Hardness and elastic modulus of IN718 and MAR-M 002 coatings<sup>[71]</sup>: a) coating hardness; b) elastic modulus

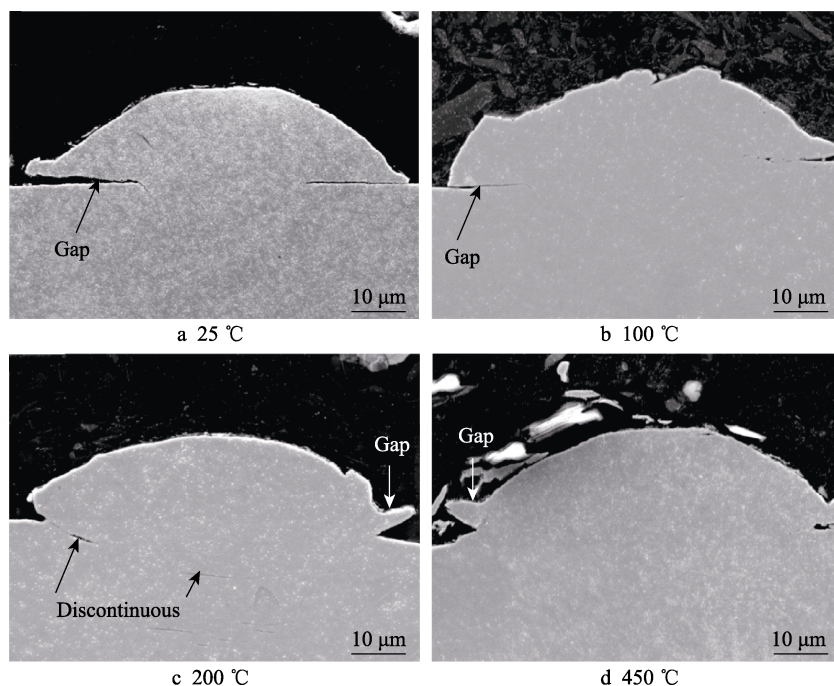


图 8 不同预热温度下涂层与基体的截面扫描照片<sup>[72]</sup>

Fig.8 SEM images of cross-section of coatings and substrate at different preheating temperature<sup>[72]</sup>



综合以上学者研究结果,通过热处理可以加快涂层内化学元素的扩散,降低涂层内部孔隙率等缺陷。基体表面预热会使金属射流现象更加明显,使涂层与基体有更良好的结合状态。

R. Singh、K. H. Rauwald 等<sup>[73]</sup>将冷喷涂技术用于航空发动机零部件的修复,修复粉体材料和零件均为 In718 合金,研究发现,基体表面粗糙度和喷涂角度对沉积效率影响显著。当喷涂粉末颗粒与粗糙度较高的基体表面相互作用时,界面处材料混合程度较高且发生局部塑性变形。为了使 In718 粉末颗粒在 In718 合金基体上有更好的沉积行为,需要 In718 合金基体表面有较大的表面粗糙度。研究不同喷涂角度对沉积效率影响发现,切向动量会导致粒子的不对称变形,即喷涂角度越小,沉积效率越低。针对上述学者未对涂层氧含量及涂层耐热腐蚀进行研究,H. Singh 等<sup>[74]</sup>利用冷喷涂的方法在 Superni 600 镍基高温合金基体表面制备了 NiCoCrAlY 涂层,并对涂层抗热腐蚀性进行评价。制备的涂层均匀、致密,显微硬度高且氧化程度低,在低温喷涂过程中无相变发生,可以起到很好的保护工业部件免受热腐蚀侵害的作用。该涂层完全可以代替生产的耐腐蚀涂料。涂层与基体结合界面状态、涂层内部碳化物分布也是评价涂层质量的重要标准。Henna Khosla<sup>[75]</sup>利用冷喷涂方法将 75%Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25%(Ni-20%Cr)合金粉末沉积到 N07718(Inconel718)合金基体。冷喷涂形成的涂层表面光滑且与基体结合牢固,涂层硬度达到 881.5HV。涂层中碳化物颗粒陶瓷相以粉末颗粒形式存在。涂层表面微观组织性能良好,可在耐腐蚀、耐磨工业生产环境中使用。美国 Sikorsky<sup>[76]</sup>飞机制造公司采用冷喷涂技术修复高强镍基合金燃气轮机部件,由于这种金属不容易焊接,焊接修复过程中容易在焊区与主体区形成缺陷,通过冷喷涂技术与焊接结合处理后,可形成性能较好的修复件,满足叶片的使用性能要求。

## 1.4 镍基高温合金增材修复技术

### 1.4.1 镍基合金激光熔覆增材修复技术

激光熔覆技术是一种涉及表面物理、冶金、材料学等领域的具有远大前景的表面技术<sup>[77]</sup>。在基体表面添加熔覆材料,利用高功率的激光束使基体和熔覆材料一起加热熔融,形成具有冶金结合特征的熔覆层。与传统表面处理技术相比,激光熔覆技术具有诸多优点,如适用熔覆材料体系广泛,熔覆层厚度和稀释率可控,基体热变形较小,工艺易于实现自动化<sup>[78]</sup>,但不可避免地会发生氧化氮化等现象。

浙江工业大学姚建华等<sup>[79]</sup>利用激光熔覆技术,在不同送粉气和不同保护气体条件下,在 In718 合金基体上制备了 In718 高温合金熔覆层。与氩气相比,采用氦气作为送粉气体对熔池进行保护时,能够增强对液态熔池的冷却作用,提高熔池的凝固速率,熔高变

大但熔宽降低,缩小熔池的流动区域,说明氦气作为送粉气体能在一定程度上提高粉末的利用率。Chongliang Zhong、Johannes Henrich Schleifenbaum 等<sup>[80]</sup>采用激光熔覆技术制备了 Inconel718 和 Inconel625 合金熔覆层,对比发现 Inconel718 熔覆层较 Inconel625 熔覆层有更高的孔隙率。在 Inconel625 熔池中对流更强,从而导致更好的传热,同时较强的对流促进了熔化区气体的逸出,使得 Inconel625 熔覆层孔隙率较低。上海交通大学李柱国等<sup>[81]</sup>利用流体动力学(CFD)、物理能量函数和有限元方法(FEM)在内的数值模拟方法,研究了镍基高温合金激光熔覆过程中粉末、熔覆层和基体的显微组织变化。研究发现,激光熔覆较小的粉末颗粒更倾向于形成较细的凝固组织,激光功率和熔覆速度以及颗粒尺寸会影响凝固速度,进而导致对二次枝晶臂间距的削弱,减小粉末尺寸有利于获得细微结构的熔覆层,对提高熔覆层的性能是有益的。Pulin Nie、Yixiong Wu 等<sup>[82]</sup>研究了激光熔覆 Inconel718 合金涂层碳化物和氮化物的析出行为。研究发现,熔覆层中 MC 和 MN 的含量与激光熔覆扫描速度有关,随着激光扫描速度的提高,熔覆层的微观结构得到细化。MC 和 MN 的纳米压痕硬度及杨氏模量比基体 Inconel718 镍基合金更高,但塑性变形能力降低,激光熔覆涂层的维氏硬度升高与 MC 和 MN 的析出有关。

李金华等<sup>[83]</sup>采用正交工艺参数在 NJ-4 镍基高温合金上进行激光熔覆,研究发现:显微硬度主要受晶粒尺寸和过冷度大小的影响,在熔覆区上部的等轴晶区的显微硬度最大,是基体的 2.5 倍以上;基体与熔覆区产生板条马氏体,提高了冶金结合强度。李养良等<sup>[84]</sup>利用 CO<sub>2</sub> 激光器在 GH4169 镍基高温合金表面熔覆 Ni60 镍基合金粉末,研究发现:熔覆层中存在颗粒强化、细晶强化以及固溶强化,显著提高了涂层的耐磨性和硬度;基体 GH4169 的磨损机制主要是磨粒磨损和粘着磨损,而熔覆层主要是磨粒磨损。张松等<sup>[85]</sup>利用激光熔覆技术在 Monel400 镍基合金表面制备了 Ni 基稀土合金熔覆层,研究发现:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的添加细化了熔覆层组织,熔覆层主要由  $\gamma$ -Ni、Ni<sub>3</sub>B 和 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 等硬质相组成;Ni 基稀土合金熔覆层的平均显微硬度达到 9040 MPa,相比 Monel400 合金与 Ni 基合金熔覆层,显微硬度分别提高 7 倍和 1.06 倍;抗空蚀能力是 Ni 基合金熔覆层的 1.29 倍,是 Monel 400 合金基材的 8.7 倍。

### 1.4.2 镍基高温合金电子束熔覆增材修复技术

电子束熔覆技术具有能量密度极高、热输入小、熔覆速度快、温度梯度大、凝固速度快等特点,有利于熔覆层的定向生长<sup>[86]</sup>。与激光熔覆等其他增材修复技术相比,电子束熔覆在真空条件下工作,清洁度高且不易被氧化。电子束焊是指利用加速和聚焦的电子束轰击置于真空或非真空中的焊接面,使被焊工件熔

化实现焊接。真空电子束焊是应用最广的电子束焊。该技术具备不易氧化、热变形小等优点,广泛应用于航空航天、原子能、军工及汽车等众多行业<sup>[87]</sup>。

王国富等<sup>[88]</sup>发现,镍基高温合金在含氯元素的介质中耐腐蚀性良好,但耐磨性不足。采用电子束在 Inconel 617 基体表面熔覆 Co+CeO<sub>2</sub> 复合涂层,研究发现:不添加 CeO<sub>2</sub> 的 Co 基熔覆层最高显微硬度是基体的 1.8 倍,耐磨性得到改善;添加 CeO<sub>2</sub> 后,熔覆层中孔隙等缺陷得到有效改善,降低了 Co 基熔覆层在滑动摩擦中的摩擦因数和磨损率,耐磨性得到提高。当添加 2% 的 CeO<sub>2</sub> 时,熔覆层的耐磨性最佳。Liu H. 等<sup>[89]</sup>学者在镍基高温合金 Inconel617 表面利用电子束制备 NbSi<sub>2</sub> 熔覆层,研究发现,当电子束电流为 19 mA,扫描速度为 8 mm/s,电子束直径为 3 mm 时,熔覆层最为致密,与基体粘结状态最好,熔覆效果最佳。

A. K. A. Jawwad 等<sup>[90]</sup>详细研究了利用电子束焊接 Inconel718 的微观结构及疲劳裂纹萌生,研究发现,全熔焊缝金属快速冷却,微观组织主要由  $\gamma$ +NbC+Laves 相组成,而不是相关学者报道的由共晶  $\gamma$ +Laves 相组成的枝晶间产物。样品在 523 °C 进行疲劳测试发现,最大应力在 579~820 MPa。南昌航空大学王善林等<sup>[91]</sup>采用真空电子束填丝焊对镍基高温合金 IC10 进行修复试验(GH4169 焊丝作为熔覆材料),研究发现,熔覆层上部分区域出现等轴晶区和转向枝晶区。当沉积速度较小时,基体与熔覆层硬度基本相同,熔覆层的显微硬度随着沉积速度的增加而降低。M. R. Rahimpour 等<sup>[92]</sup>研究了利用电子束焊接 ZrS6U 镍基高温合金的显微组织,结果表明,在热处理(1140 °C/2 h 炉冷+1050 °C/6 h 水冷)后,焊缝中  $\gamma'$ 析出物的尺寸发生变化,达到 0.55  $\mu\text{m}$ ,从而改变了电子束焊后焊接试样冷却释放拉应力的能力。

#### 1.4.3 镍基高温合金等离子熔覆增材修复技术

等离子熔覆技术<sup>[93]</sup>是以微束等离子弧作为热源,采用合金粉末作填充金属,将合金粉末与基体表面一起加热熔化形成合金层的一种堆焊工艺方法。

ZHU Z. 等<sup>[94]</sup>利用等离子熔覆技术在 Ni<sub>7</sub>Cr<sub>19</sub>AlTi 合金表面制备钴基合金 Stellite 6 熔覆层。研究发现:钴基合金熔覆层有枝晶结构;熔覆层的显微硬度为 390HV,高于基体的 300HV,熔覆层中的硬质相 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 和 WC 显著增强熔覆层耐磨性。王文权等<sup>[95]</sup>在 Ni60A 镍基高温合金基体表面利用等离子堆焊技术制备 Ni60A 焊层,添加不同含量(质量分数 0%、4%、8%、12%)的 Mo 元素,分析研究了 Mo 对堆焊层组织与性能的影响。研究结果表明:不添加 Mo 元素的 Ni60A 堆焊层组织粗大,硬质相分布不均匀;添加 Mo 元素后,堆焊层组织细化,促进了等轴晶的形成,Mo<sub>2</sub>C、MoSi<sub>2</sub>、MoC 等硬质相弥散分布;添加质量分数 8%Mo 时,堆焊层耐磨性与不添加 Mo 元素时相比提高了

30%。Su C. Y. 等<sup>[96]</sup>研究等离子堆焊对镍基高温合金 Inconel738LC 部件修复的影响,测试了焊接样品在室温、760 °C、980 °C 的拉伸性能。结果表明:焊接试样的抗拉强度为 Inconel738LC 基体的 96%;Inconel738LC 在熔焊过程中容易出现焊缝,采用低的热输入等离子焊接工艺可将样品中的裂纹敏感性降到最低。

#### 1.4.4 小结

本小节重点综述了镍基高温合金激光熔覆、电子束熔覆、等离子熔覆增材修复技术。激光熔覆对基体热影响区小,相比于等离子堆焊层,稀释率较低,熔覆层晶粒度细,表面硬度高,具有较好的耐磨性,工业上可实现三维自动加工。但若熔覆合金与基体熔点差异较大,则熔覆层与基体结合较差,熔覆层中孔隙等缺陷增多。电子束熔覆变形较小,在工业生产中能够实现较厚工件的焊接。等离子熔覆对材料的限制较少,对碳化物、氧化物熔覆亦可适用。

### 1.5 镍基高温合金复合修复强化技术

为了进一步提高镍基高温合金修复层的服役性能,有研究者开发了激光辅助冷喷涂、电磁辅助激光熔覆、激光熔覆+超声冲击强化等能束能场复合修复强化技术,并研究了不同复合能量场对镍基高温合金修复层微观组织与力学性能的影响,为镍基高温合金修复技术提供了新的技术途径。

#### 1.5.1 镍基合金激光辅助冷喷涂修复技术

随着研究的不断发展,剑桥大学 O'Neill 课题组首次提出将激光加热与冷喷涂(Cold spray, CS)相结合的超音速激光沉积技术(Supersonic laser deposition, SLD)<sup>[97-98]</sup>。利用激光对喷涂颗粒、基材两者同时加热并使之软化,瞬间调节和改善材料的力学性能和碰撞沉积状态。激光辐照仅会对喷涂颗粒及沉积基体起到加热效果,但不会产生熔池,所以利用这种方法可有效避免激光熔覆、热喷涂等造成的喷涂颗粒氧化氮化、相变、晶粒长大以及烧蚀等现象,保持了喷涂颗粒原有的性质和相成分<sup>[99-100]</sup>。该系统组成如图 9 所示,主要由高压气体系统、送粉系统、激光加工系统、温度控制系统等构成。

YANG Shuo 等<sup>[101]</sup>采用超音速激光沉积技术在镍基高温合金 IC10 基体上沉积 IC10 合金粉末,研究了圆形和方形激光束对沉积层的影响。与圆形激光束相比,方形激光束无论在室温条件下,还是较低温度条件下,都具有更宽更薄的熔覆层。在自然冷却条件下,圆形激光束与方形激光束作用下,柱状晶沉积中心和边缘均形成外延晶粒;然而在强制冷却条件下,在两种激光束作用下,柱状晶的中心和边缘均形成柱状晶颗粒,如图 10 所示。热梯度和凝固速度的高比值有利于形成体积分数较高的柱状晶。

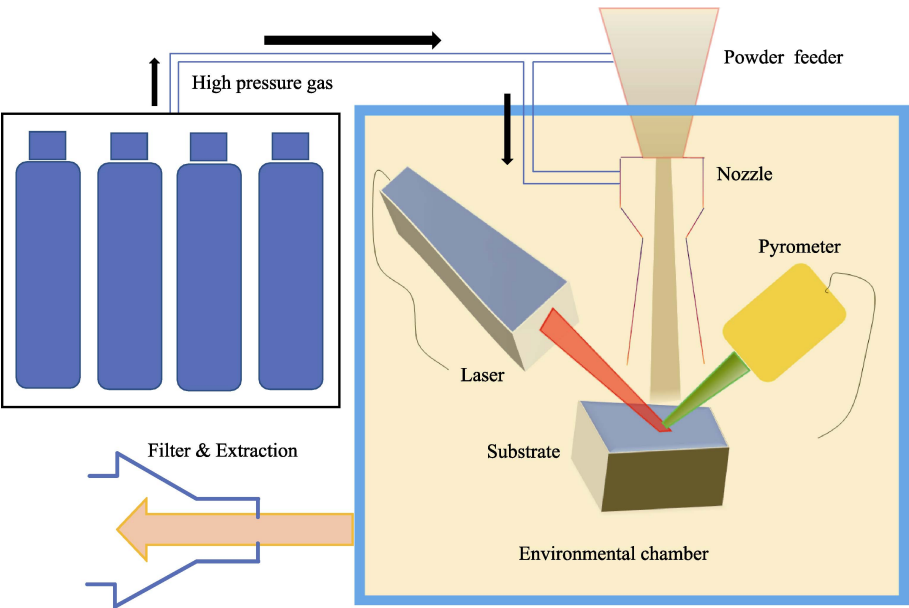


图 9 激光辅助冷喷涂系统技术原理示意图<sup>[97]</sup>  
Fig.9 Schematic diagram of technical principle of LCS system<sup>[97]</sup>

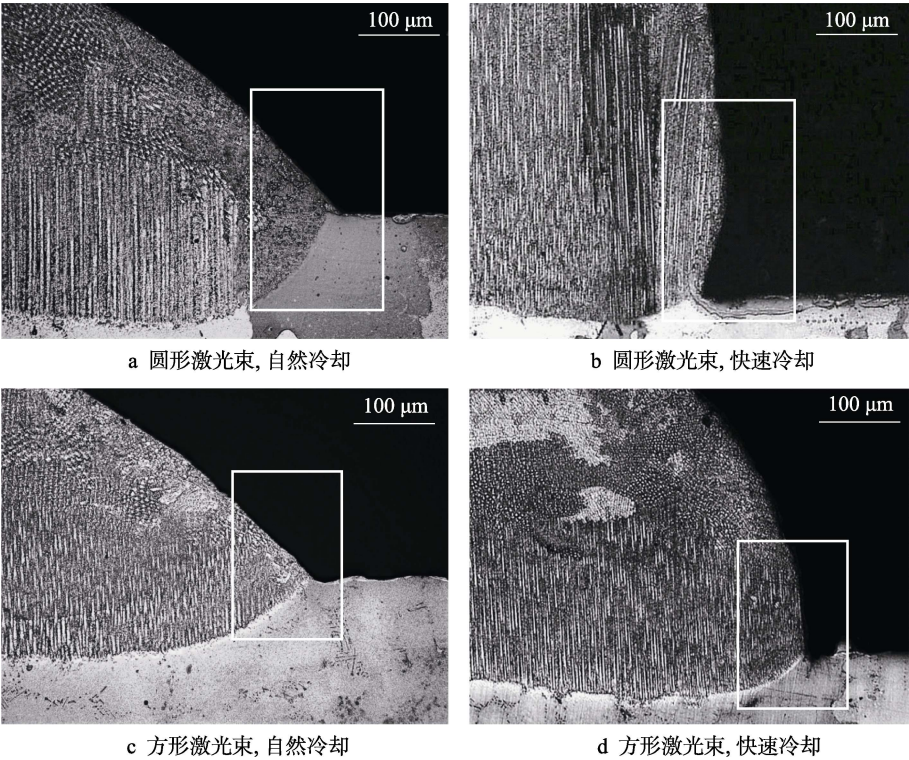


图 10 不同条件下沉积层边缘柱状晶的生长<sup>[101]</sup>  
Fig.10 Columnar grains growth at edges of deposits under different conditions<sup>[101]</sup>: a) natural cooling of circular laser beam; b) rapid cooling of circular laser beam; c) natural cooling of square laser beam; d) rapid cooling of square laser beam

卞宏友等<sup>[102]</sup>利用超音速激光沉积技术对 GH738 镍基合金贯通槽式损伤试样进行修复。研究表明，修复区的组织为典型的外延生长柱状晶且垂直于基体，修复区中心的枝晶取向出现较大偏析，但未发现  $\gamma$  相，枝晶干含有粒状的  $M_{23}C_6$  和少量较大立方体的 MC 型碳化物。激光沉积修复试样的室温抗拉强度与

断后伸长率分别为锻件的 78.2%和 69.2%。J. Ruiz 等<sup>[103]</sup>进行激光金属沉积（LMD），研究了氩气、氮气对 MetcoClad 718 颗粒在 Inconel718 镍基高温合金基体上沉积过程的影响。在氩气为基础的 LMD 过程中，气体中氮浓度的增加会导致基体温度稍微降低，但会使熔池温度升高。M. Bambach 等<sup>[104]</sup>采用激光金属沉



积技术对镍基高温合金 Inconel718 等温热压缩实验显微组织进行了研究,对锻造态和热处理态的激光金属沉积试样进行比较,发现热处理后的激光金属沉积试样具有更好的热稳定性。

### 1.5.2 镍基合金电磁辅助激光熔覆修复技术

南昌航空大学刘奋成<sup>[105]</sup>利用电磁辅助激光熔覆技术对航空发动机材料镍基高温合金 GH4169 基材进行修复实验。性能分析表明, GH4169 合金修复试样的抗拉强度随磁场强度的提高,呈现先增大后减小的变化规律;当磁场强度为 2.0 T、频率为 100 Hz 时,试样的抗拉强度达到最大值 1487.8 MPa,延伸率达到 14.1%,抗拉强度和延伸率性能均接近锻件热处理标准。刘奋成<sup>[106]</sup>进一步利用磁场辅助激光熔覆技术对 V 型槽 Inconel718 合金开展修复实验,优化参数后,激光成形区与 Inconel718 基体材料无明显的界线,形成致密的冶金结合,如图 11 所示。对修复

的 Inconel718 进行拉伸测试时,未加磁场时(0 A),修复材料的最大抗拉强度为 487 MPa,抗拉强度随着施加磁场强度的增大(20、40、60 A),呈上升趋势,分别为 510、673、770 MPa。在该合金的修复试验中,电磁辅助激光处理对枝晶间  $\gamma$ +Laves 共晶反应有影响,抑制了 Laves 相的生长。

电磁搅拌可使搭接区内冶金缺陷减小。未施加磁场搅拌时,脆性相 Laves 降低了液态金属对流作用,导致显微硬度减小。电磁搅拌辅助激光强化使修复层缺陷进一步减少,修复强化区  $\gamma$  相数目增多,显微硬度值提高,抗拉强度也达到最大,可以获得更高致密度和高性能涂层。但后续研究也需注意,激光修复镍基高温合金沉积态试样抗拉强度随辅助磁场强度的提高是呈现先增大后减小的趋势变化,后续需要大量实验,进一步优化工艺参数,从而得到最佳沉积层。

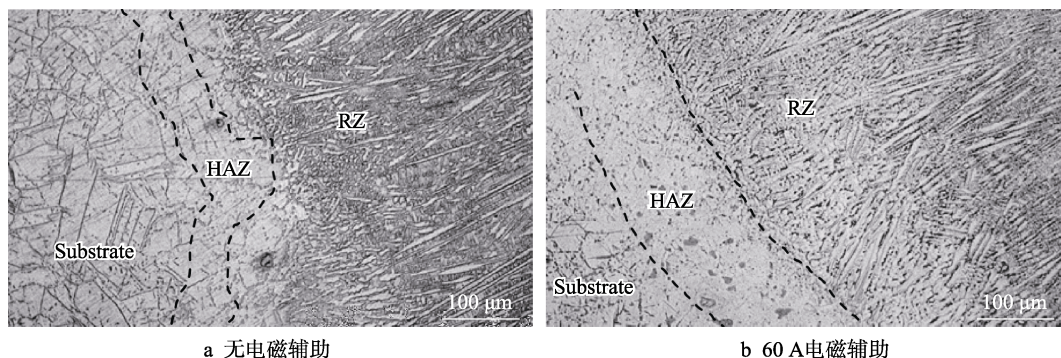


图 11 Inconel718 显微组织照片<sup>[106]</sup>

Fig.11 Microstructure of Inconel718<sup>[106]</sup>: a) repaired sample without electromagnetic intensity; b) repaired sample with 60 A electromagnetic intensity

西北工业大学林鑫等<sup>[107]</sup>为了改善激光立体成形 GH4169 镍基合金的组织 and 力学性能,在不同磁场强度下进行了该合金的激光立体成形。结果表明,在一定范围内,沉积态组织中的枝晶间共晶 Laves 相随着磁场强度的增加呈减少趋势,且其相形貌由不规则蠕虫状变为颗粒状,显微硬度随磁场强度的提高而增大。浙江工业大学激光先进制造研究院姚建华等<sup>[108]</sup>通过在激光熔覆过程中引入电磁辅助处理,实现了对多道 Ni60 合金缺陷与组织结构的有效调控。在施加电磁复合场后, Ni60 合金熔覆层表面裂纹得到抑制,且气孔得到消除,熔覆层中的脆性相偏聚降低,且柱状晶增多,对实现大面积无裂纹 Ni60 合金熔覆层制备提供了有效途径。

### 1.5.3 镍基合金激光熔覆+超声冲击强化修复技术

南京航空航天大学田宗军等<sup>[109]</sup>建立了超声冲击强化镍基高温合金 GH4169 基体上镍基合金粉末 GH95 熔覆层过程的仿真模型,分析了超声冲击强化激光熔覆层工艺过程中应力场的变化规律。超声冲击

熔覆层残余应力显著减小,且表层形成了一定深度的压应力区域,仿真结果为超声冲击熔覆层试验提供了理论指导。田宗军团队<sup>[110]</sup>进一步研究了超声冲击强化对镍基高温合金激光熔覆层组织结构和成形质量的影响规律,结果表明,超声冲击强化后,熔覆层残余应力基本得到消除,晶粒得到细化。南京航空航天大学赵剑锋等<sup>[111]</sup>对 FGH95 镍基高温合金熔覆层进行超声冲击后处理,结果表明,超声处理后,熔覆层塑性变形区位错塞积显著,熔覆层显微硬度达到 594.25HV,比未处理的熔覆层提高 1.3 倍。

超声冲击作为激光熔覆的后处理技术,会对材料的微观组织、应力状态和性能产生有益影响,能够解决熔覆层组织不均匀、残余应力较大等问题,进一步提高材料的疲劳性能。此外,超声冲击能在材料内部形成压应力且使晶粒细化,最大压应力值超过母材的屈服强度。超声冲击还能够显著降低焊接构件的残余应力,提高零件的疲劳寿命。但超声冲击最大的问题是能量输出不稳定,控制不当会出现不合格样品。



## 2 镍基高温合金修复强化技术发展趋势

为进一步提高镍基高温合金修复层服役性能,未来应在能束能场复合修复技术开发、能束能场与材料的作用机理,以及修复过程形性协同调控等方面加强研究:

### 1) 镍基高温合金能束能场复合修复技术开发。

针对严苛工作环境对镍基高温合金服役性能提出更高要求,而单一镍基高温合金修复强化技术存在相应的局限性,开发能束能场复合技术应用于诸多镍基高温合金修复强化领域是目前较为迫切的工作之一。能束能场复合修复技术基于激光、等离子、电子束等能束的增材修复技术与热、力、声、电磁等能场以及先进的数控加工技术与后处理技术复合,并集成为智能化成套系统,是未来镍基高温合金修复强化技术发展的一个重要方向。

### 2) 镍基高温合金能束能场与材料的作用机理。

能束能场复合技术作为一种新型镍基高温合金表面修复强化手段,与镍基高温合金相互作用机理比较复杂,修复工艺参数众多。利用有限元建模与数值仿真模拟,结合试验结果优化工艺参数,阐明能束能场对镍基高温合金修复强化协同作用机理,具备快速、高效、优质等优点,对拓宽工艺适用范围、降低修复强化层缺陷以及增强镍基高温合金修复机动时效性具有重要意义。

3) 镍基高温合金修复过程形性协同调控。能束能场对镍基高温合金修复强化复合制造不是单一工艺装备进行简单组装,而是需要大量工艺试验数据采集、分析、检测与控制,最终将大量数据分析整理得出最优的工艺参数搭配。通过工艺参数的优化调配,提高修复层成形效率和精度的同时,改善其内部组织结构及性能,实现智能化设计、高效修复、高质量修复等一体化形性协同控制,对拓宽镍基高温合金修复技术应用范围具有促进作用。

## 3 结语

本文面向镍基高温合金烧蚀、磨损等表面损伤和掉块、断裂等体积损伤修复需求,综述基于喷丸强化、激光喷丸、激光冲击强化、电子束表面处理等表面改性技术,化学气相沉积、物理气相沉积等表面镀层技术,等离子喷涂、超音速火焰喷涂、冷喷涂等的表面涂层技术,激光熔覆、电子束熔覆、等离子熔覆等增材修复技术,以及激光辅助冷喷涂、电磁辅助激光熔覆、激光熔覆+超声冲击强化等能束能场复合修复技术,介绍了上述修复方法的技术原理、国内外研究现状,归纳总结了各技术工艺特点及应用范围。随着镍基高温合金表面修复强化技术的不断发展、进步、成

熟,人们对修复层的制备方法、微观表征研究及分析影响修复强化层性能的主要因素、作用机理等提出了更高的要求。因此,开发能束能场复合修复强化技术、修复强化全过程智能化控制技术,以及适应现场复杂环境的移动式修复技术及装备,对拓宽工艺适用范围、降低修复强化层缺陷以及增强修复机动时效性具有重要意义,是镍基高温合金修复强化技术未来的发展趋势。

### 参考文献:

- [1] 王会阳, 安云岐, 李萍, 等. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 23(8): 482-486.  
WANG Hui-yang, AN Yun-qi, LI Ping, et al. Advances in nickel-based superalloy materials[J]. Materials review, 2011, 23(8): 482-486.
- [2] LEE D, SANTELLA M L. Thermal aging effects on the mechanical properties of as-cast Ni<sub>3</sub>Al-based alloy[J]. Materials science and engineering, 2006, A428: 196-204.
- [3] 朱胜, 徐滨士, 姚巨坤. 再制造设计基础及方法[J]. 中国表面工程, 2003(3): 27-31.  
ZHU Sheng, XU Bin-shi, YAO Ju-kun. Study on the foundation and method of remanufacturing design[J]. China surface engineering, 2003(3): 27-31.
- [4] 徐滨士, 朱绍华. 表面工程的理论技术[M]. 第二版. 北京: 国防工业出版社, 2010.  
XU Bin-shi, ZHU Shao-hua. Theoretical techniques of surface engineering[M]. The second edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [5] 徐滨士. 绿色再制造工程及其在我国的应用前景[J]. 水利电力机械, 2001, 23(6): 33-35.  
XU Bin-shi. Green remanufacturing engineering and its application prospect in China[J]. Water conservancy & electric power machinery, 2001, 23(6): 33-35.
- [6] 朱胜. 柔性增材再制造技术[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 1-5.  
ZHU Sheng. Flexible additive remanufacturing technology[J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49(23): 1-5.
- [7] 王仁智. 金属材料的喷丸强化原理及其强化机理综述[J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 1-9.  
WANG Ren-zhi. Overview on the shot peening principle and its strengthening mechanisms for metallic materials[J]. China surface engineering, 2012, 25(6): 1-9.
- [8] 刘珂璟, 王海斗, 徐滨士. 激光喷丸改善零件疲劳性能的研究现状及展望[J]. 材料热处理学报, 2017(3): 1-9.  
LIU Ke-jing, WANG Hai-dou, XU Bin-shi. Review and expect of laser peening for improving fatigue performance of parts[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2017(3): 1-9.
- [9] 张永康. 激光冲击强化产业化关键问题及应用前景[J]. 激光与光电子学进展, 2007(3): 74-77.

- ZHANG Yong-kang. Key issues and application prospects of laser shock strengthening industrialization[J]. *Laser & optoelectronics progress*, 2007(3): 74-77.
- [10] 胡昌义, 李靖华. 化学气相沉积技术与材料制备[J]. *稀有金属*, 2001, 25(5): 364-369.
- HU Chang-yi, LI Jing-hua. Chemical vapor deposition and preparation of materials[J]. *Rare metal*, 2001, 25(5): 364-369.
- [11] 陈丽梅, 李强. 等离子喷涂技术现状及发展[J]. *热处理技术与装备*, 2006, 27(1): 1-5.
- ZHANG Li-mei, LI Qiang. Status and development of plasma spray technology[J]. *Heat treatment technology and equipment*, 2006, 27(1): 1-5.
- [12] KAMNIS S, GU S. 3-D modeling of kerosene-fuelled HVOF thermal spray gun[J]. *Chemical engineering science*, 2006, 61(16): 5427-5439.
- [13] 朱胜, 王晓明, 韩国峰. 激光熔覆制备铝基非晶复合层的组织及性能[J]. *轻金属*, 2016(6): 44-49.
- ZHU Sheng, WANG Xiao-ming, HAN Guo-feng. The research on structure and performance of Al based amorphous composite laser by laser cladding[J]. *Light metal*, 2016(6): 44-49.
- [14] HB/Z 26—2011, 航空零件喷丸强化工艺[S].
- HB/Z 26—2011, Shot peening technology for aviation parts[S].
- [15] 王欣, 云辉, 付书红, 等. 喷丸强度对 TC17 及 GH4169 合金表面完整性和高温疲劳性能的影响[J]. *金属热处理*, 2018, 43(1): 67-71.
- WANG Xin, YUN Hui, FU Shu-hong, et al. Effect of shot peening intensity on surface integrity and high-temperature fatigue performance of TC17 and GH4169 alloys[J]. *Heat treatment of metals*, 2018, 43(1): 67-71.
- [16] 陈艳华, 须庆. DD3 镍基单晶高温合金喷丸层残余应力的 X 射线衍射分析[J]. *机械工程材料*, 2012, 36(3): 76-78.
- CHEN Yan-hua, XU Qing. X-ray diffraction analysis of residual stress of DD3 nickel base single crystal superalloy peening layer[J]. *Mechanical engineering materials*, 2012, 36(3): 76-78.
- [17] 陈艳华. 镍基单晶高温合金喷丸层塑性变形行为及其表征研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- CHEN Yan-hua. Study on plastic deformation behavior of Ni-based single-crystal superalloy subjected to shot peening and its characterization[D]. Shanghai: Shanghai Jiao-tong University, 2014.
- [18] 朱荣华, 尹元杰, 谢惠民, 等. 喷丸镍基合金材料微区残余应力的切槽法测量研究[J]. *实验力学*, 2017, 32(2): 145-151.
- ZHU Rong-hua, YIN Yuan-jie, XIE Hui-min, et al. Study on the measurement of residual stress in micro-zone of nickel base alloy with shot peening by slotting method[J]. *Experimental mechanics*, 2017, 32(2): 145-151.
- [19] YE C, GARY J C. Fatigue performance improvement in AISI 4140 steel by dynamic strain aging and dynamic precipitation during warm laser shock peening[J]. *Acta materialia*, 2011, 59(3): 1014-1025.
- [20] 孟宪凯, 周建忠, 黄舒, 等. 激光温喷丸诱发单晶铜位错扩展的分子动力学模拟[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0702003.
- MENG Xian-kai, ZHOU Jian-zhong, HUANG Shu, et al. Molecular dynamics simulation of dislocation development in monocrystal linecopper induced by warm laser peening[J]. *Chinese journal of lasers*, 2015, 42(7): 0702003.
- [21] YE C, SUSLOV S, KIM B J, et al. Fatigue performance improvement in AISI 4140 steel by dynamic strain aging and dynamic precipitation during warm laser shock peening[J]. *Acta materialia*, 2011, 59(3): 1014-1025.
- [22] 郑刚, 孟宪凯, 周建忠, 等. 激光温喷丸强化 Inconel718 镍基合金热腐蚀性能研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 5-11.
- ZHENG Gang, MENG Xian-kai, ZHOU Jian-zhong, et al. Research on hot-corrosion of Inconel718 nickel-based alloy treated by warm laser shock peening[J]. *Chinese journal of lasers*, 2016, 43(4): 5-11.
- [23] 黄舒, 盛杰, 周建忠, 等. IN718 镍基合金激光喷丸微观组织特性及其高温稳定性[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(12): 3284-3290.
- HUANG Shu, SHENG Jie, ZHOU Jian-zhong, et al. Microstructure characteristics and high-temperature performance of laser peened IN718 nickel-based alloy[J]. *Rare metal materials and engineering*, 2016, 45(12): 3284-3290.
- [24] 周建忠, 韩煜航, 黄舒, 等. 激光温喷丸 IN718 镍基合金残余应力高温释放行为[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(12): 1509-1515.
- ZHOU Jian-zhong, HAN Yu-hang, HUANG Shu, et al. Thermal relaxation behavior of residual stress in warm laser peened Inconel718 superalloy[J]. *Rare metal materials and engineering*, 2016, 45(12): 1509-1515.
- [25] MONTROSS C S, CHARLES S, WEI T, et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. *International journal of fatigue*, 2002, 24(10): 1021-1036.
- [26] ZHANG W, YAO Y L. Microscale laser shock processing-modeling, testing, and microstructure characterization[J]. *Journal of manufacturing processes*, 2001, 3(2): 128-143.
- [27] 聂祥樊, 李应红, 何卫锋, 等. DZ17G 定向凝固高温合金的微激光冲击强化方法与疲劳试验研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(10): 3141-3147.
- NIE Xiang-fan, LI Ying-hong, HE Wei-feng, et al. Microscale laser shock peening method and fatigue test of DZ17G directionally solidified superalloy[J]. *Journal of manufacturing processes*, 2018, 47(10): 3141-3147.
- [28] 王学德, 李一鸣, 聂祥樊, 等. 微激光冲击 DZ17G 合金的表面完整型影响研究[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29(8): 1-5.
- WANG Xue-de, LI Yi-ming, NIE Xiang-fan, et al. Effect of micro laser impact on the surface integrity of DZ17G

- alloy[J]. High power laser and particle beams, 2017, 29(8): 1-5.
- [29] 王学德, 聂祥樊, 焦阳, 等. 无保护层激光冲击对 K24 镍基合金力学性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 5-11.
- WANG Xue-de, NIE Xiang-fan, JIAO Yang. Effects of laser shock processing without coating on mechanical properties of K24 nickel based alloy[J]. Infrared and laser engineering, 2017, 46(1): 5-11.
- [30] 谢孟芸, 汪诚, 张佩宇, 等. 无保护层激光冲击对 GH3044 涡轮机匣围裙组织和性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 5-12.
- XIE Meng-yun, WANG Cheng, ZHANG Pei-yu, et al. Effects of LSPwC on microstructure and properties of GH3044 turbine case[J]. Infrared and laser engineering, 2018, 47(4): 5-12.
- [31] TANI G, ORAZI L, FORTUNATO A, et al. Warm laser shock peening: new developments and process optimization[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2011, 60(1): 219-222.
- [32] 吴嘉俊, 胡太友, 李松夏, 等. 温度辅助激光冲击强化对 GH4169 合金力学性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(1): 199-205.
- WU Jia-jun, HU Tai-you, LI Song-xia, et al. Effect of temperature-assisted laser shock peening on mechanical properties of GH4169 alloy[J]. Journal of plasticity engineering, 2019, 26(1): 199-205.
- [33] ZHANG K M, YANG D Z, ZOU J X, et al. Improved invitro corrosion resistance of a NiTi alloy by high current pulsed electron beam treatment[J]. Surface & coatings technology, 2006, 201(6): 3096-3102.
- [34] HAN Z Y, HAN J, JING Z Z, et al. Surface microstructure of nanoaluminized CoCrAlY coating irradiated by HCPEB[J]. Journal of nanomaterials, 2016(4): 1-8.
- [35] CAI J, GUAN Q F, YANG S, et al. Microstructural characterization of modified YSZ thermal barrier coatings by high-current pulsed electron beam[J]. Surface & coatings technology, 2014, 254(18): 187-194.
- [36] 邹慧, 荆洪阳, 徐连勇, 等. 镍基单晶高温合金 DD3 强流脉冲电子束的表面改性[J]. 天津大学学报, 2011, 44(11): 1029-1035.
- ZOU Hui, JING Hong-yang, XU Lian-yong, et al. Surface treatment of Ni based single crystal superalloys DD3 bombarded by high current pulsed electron beam[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(11): 1029-1035.
- [37] 刘迪, 吕鹏, 关庆丰, 等. GH80A 经强流脉冲电子束改性后的高温氧化行为研究[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 157-165.
- LIU Di, LYU Peng, GUAN Qing-feng, et al. High temperature oxidation behavior of nickel-based superalloy GH80A treated by high-current pulsed electron beam[J]. Surface technology, 2018, 47(11): 157-165.
- [38] HAN Z Y, HAN J, JING Z Z, et al. Surface microstructure of nanoaluminized CoCrAlY coating irradiated by HCPEB [J]. Journal of nanomaterials, 2016(4): 1-8.
- [39] LIU H L, WANG D Z, QI Z W. Surface microstructure and anti-wear of WC-CoCr coatings cladded by electron beam[J]. Rare metal materials and engineering, 2018, 47(11): 3338-3344.
- [40] 胡昌义, 李靖华. 化学气相沉积技术与材料制备[J]. 稀有金属, 2001, 25(5): 364-368.
- HU Chang-yi, LI Jing-hua. Chemical vapor deposition and preparation of materials[J]. Rare metal, 2001, 25(5): 364-368.
- [41] ZAGULA-YAVORSKA M, SIENIAWSKI J. Cyclic oxidation of palladium modified and nonmodified aluminide coatings deposited on nickel base superalloys[J]. Science direct, 2018(18): 130-139.
- [42] ZAGULA-YAVORSKA M, MORGIEL J. Microstructure and oxidation behaviour investigation of rhodium modified aluminide coating deposited on CMSX4 superalloy [J]. Journal of microscopy, 2016, 261(3): 320-325.
- [43] 崔启政, 张铁磊, 王烜烽, 等. 镍基合金上化学气相沉积铝涂层的试验研究[J]. 热力透平, 2017, 46(3): 194-198.
- CUI Qi-zheng, ZHANG Tie-lei, WANG Xuan-feng, et al. Experimental study of chemical vapor depositional aluminizing coatings on Ni-based superalloy[J]. Thermal turbine, 2017, 46(3): 194-198.
- [44] 任维鹏, 李青, 黄强. 定向凝固镍基高温合金 DZ466 表面 CoAl 涂层的氧化及组织演变[J]. 金属学报, 2018, 54(4): 566-574.
- REN Wei-peng, LI Qing, HUANG Qiang. Oxidation and microstructure evolution of CoAl coating on directionally solidified Ni-based superalloys DZ466[J]. Acta metallurgica sinica, 2018, 54(4): 566-574.
- [45] ZHANG X F, ZHOU K S, SONG J B, et al. deposition and CMAS corrosion mechanism of 7YSZ thermal barrier coatings prepared by plasma spray-physical vapor deposition[J]. Journal of inorganic materials, 2015, 30(3): 287.
- [46] 郭洪波, 彭立全, 宫声凯, 等. 电子束物理气相沉积热障涂层技术研究进展[J]. 热喷涂技术, 2009, 1(2): 7-14.
- GUO Hong-bo, PENG Li-quan, GONG Sheng-kai. Progress in EB-PVD thermal barrier coatings[J]. Thermal spray technology, 2009, 1(2): 7-14.
- [47] 王喜忠, 吴建颢, 彭徽. 电子束物理气相沉积  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  热障涂层的高温燃气热腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(1): 38-42.
- WANG Xi-zhong, WU Jian-hao, PENG Hui. Hot-gas corrosion resistance of  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ /8YSZ doubleceramic-layered thermal barrier coating[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(1): 38-42.
- [48] SALDAÑA J M, SCHULZ U, RODRÍGUEZ G C M, et al. Microstructure and lifetime of Hf or Zr doped sputtered NiAlCr bond coat/7YSZ EB-PVD TBC systems[J]. Surface & coatings technology, 2018, 335: 41-51.
- [49] LIANG S J, SONG H H, ZHENG L. Cyclic oxidation behavior of electron beam physical vapor deposition

- NiAlHf and NiAlHfCrSi coatings at 1150 °C[J]. Rare metals, 2017(4): 1-6.
- [50] 张啸, 刘敏, 周克崧, 等. 等离子喷涂-物理气相沉积高温防护涂层研究进展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 39-51.
- ZHANG Xiao, LIU Min, ZHOU Ke-song, et al. Research progress of high temperature protective coatings by plasma spray-physical vapor deposition[J]. China surface engineering, 2018, 31(5): 39-51.
- [51] 李长久, 李成新, 杨冠军, 等. 大气等离子喷涂球磨 Fe-Al 合金制备 FeAl 涂层及结构表征[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 20-26.
- LI Chang-jiu, LI Cheng-xin, YANG Guan-jun, et al. Characterization of the microstructure of atmospheric plasma-sprayed FeAl intermetallies using mechanically alloyed Fe-Al powder[J]. China surface engineering, 2010, 23(2): 20-26.
- [52] CHOI H, YOON B, KIM H, et al. Isothermal oxidation of air plasma spray NiCrAlY bond coatings[J]. Surface & coatings technology, 2002, 150(2): 297-308.
- [53] VINAYO M E, KASSABJI F, GUYONNET J, et al. Plasma sprayed WC-Co coatings: influence of spray conditions (atmospheric and low pressure plasma spraying) on the crystal structure, porosity, and hardness[J]. Journal of vacuum science & technology a vacuum surfaces and films, 1985, 3(6): 2483-2489.
- [54] 罗顺, 陈和兴. 高温镍基单晶合金 NiCoCrAlYTa 涂层的抗热腐蚀性能[J]. 材料保护, 2010, 43(3): 17-21.
- LUO Shun, CHEN He-xing. Thermal corrosion resistance of NiCoCrAlYTa coating with high temperature nickel base single crystal alloy[J]. Materials projection, 2010, 43(3): 17-21.
- [55] 刘伟, 陈瑞芳, 曹将栋, 等. GH586 等离子喷涂 CoCrAlYTaSi 涂层的高温氧化性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(10): 188-193.
- LIU Wei, CHEN Rui-fang, CAO Jiang-dong, et al. Study on high temperature oxidation performance of CoCrAlYTaSi coating on GH586 prepared by plasma spraying[J]. Hot working technology, 2017, 46(10): 188-193.
- [56] 曾威, 杨焜, 陈龙飞. GH3536 高温合金表面等离子喷涂镍铝钨涂层的微观结构与性能[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(24): 1123-1127.
- ZENG Wei, YANG Kun, CHEN Long-fei. Microstructure and properties of plasma-sprayed NiAlW coating on GH3536 superalloy[J]. Electropating & finishing, 2018, 37(24): 1123-1127.
- [57] KUMAR D, PANDEY K N, DAS D K. Microstructure studies of air-plasma-spray-deposited CoNiCrAlY coatings before and after thermal cyclic loading for high-temperature application[J]. International journal of minerals, 2016(8): 934-942.
- [58] ZHANG X, DENG C, PEI H. Ni-Cr-Al-Y alloy coatings prepared by different technologies and their properties[J]. Heat treatment of metals, 2015, 40(8): 79-83.
- [59] 纪岗昌, 王豫跃, 李长久, 等. 超音速火焰喷涂  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr 涂层的冲蚀磨损特性[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(5): 59-63.
- JI Gang-chang, WANG Yu-yue, LI Chang-jiu, et al. Erosion and wear characteristics of  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr coatings sprayed by supersonic flame[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(5): 59-63.
- [60] BOLELLI G, BURSI M, LUSVARGHI L, et al. Ville matikainen tribology of FeVCrC coatings deposited by HVOF and HVOF thermal spray processes[J]. Wear, 2018: 113-133.
- [61] ZENG Z, SAKODA N, TAJIRI T, et al. Structure and corrosion behavior of 316L stainless steel coatings formed by HVOF spraying with and without sealing[J]. Surf coat technol, 2008, 203: 284-290.
- [62] LYPHOUT C, NYLEN P, OSTERGREN L G. Adhesion strength of HVOF sprayed IN718 coatings[J]. Journal of thermal spray technology, 2012, 21(1): 86-95.
- [63] LYPHOUT C, FASTH A, NYLEN P. Mechanical property of HVOF Inconel 718 coating for aeronautic repair[J]. Journal of thermal spray technology, 2014, 23(3): 380-388.
- [64] 叶福兴, 牛安宁, 丁坤磊, 等. HVOF 喷涂 WC-17Co 粉末的粒子撞击行为研究[J]. 天津大学学报, 2016, 49(8): 882-888.
- YE Fu-xing, NIU An-ning, DING Kun-lei, et al. Impact behavior of WC-17Co Particle in HVOF spraying[J]. Journal of Tianjin University (science and technology), 2016, 49(8): 882-888.
- [65] 李运初, 毛杰, 邓子谦, 等. 低温超音速火焰喷涂 MCrAlY 涂层的高温氧化[J]. 金属热处理, 2017, 42(6): 51-56.
- LI Yun-chu, MAO Jie, DENG Zi-qian, et al. High temperature oxidation of MCrAlY coating prepared by low temperature high velocity oxygen-fuel spraying[J]. Heat treatment of metals, 2017, 42(6): 51-56.
- [66] 徐涛, 任平弟, 张晓宇, 等. Inconel690 合金表面 WC-10Co-4Cr 和 CoCrW 涂层的微动磨损特性[J]. 润滑与密封, 2017, 42(1): 57-63.
- XU Tao, REN Ping-di, ZHANG Xiao-yu, et al. Fretting wear behavior of WC-10Co-4Cr and CoCrW coatings on Inconel690 alloy surface[J]. Lubrication engineering, 2017, 42(1): 57-63.
- [67] SHUO Y, SUO X K, GUO Z W, et al. Deposition features of cold sprayed copper particles on preheated substrate[J]. Surface coating technology, 2015, 268: 252-256.
- [68] 钟厉, 王昭银, 张华东. 冷喷涂沉积机理及其装备的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 16-20.
- ZHONG Li, WANG Zhao-yin, ZHANG Hua-dong. Research progress of precipitation mechanism and apparatus of cold spray[J]. Surface technology, 2015, 44(4): 16-20.
- [69] 李文亚, 李长久. 冷喷涂特性[J]. 中国表面工程, 2002, 15(1): 12-16.
- LI Wen-ya, LI Chang-jiu. Characteristics of cold spraying



- [J]. China surface engineering, 2002, 15(1): 12-16.
- [70] 赵国锋, 王莹莹, 张海龙, 等. 冷喷涂设备及冷喷涂技术应用研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(11): 198-206.  
ZHAO Guo-feng, WANG Ying-ying, ZHANG Hai-long, et al. Application of cold spraying equipment and cold spraying technology[J]. Surface technology, 2017, 46(11): 198-206.
- [71] SUN Wen, BHOWMIK A, XUE Fei. Strategy of incorporating Ni-based braze alloy in cold sprayed Inconel 718 coating[J]. Surface & coatings technology, 2019, 358: 1006-1012.
- [72] SUN Wen, BHOWMIK A, XUE Fei. Deposition characteristics of cold sprayed Inconel718 particles on Inconel718 substrates with different surface conditions[J]. Materials science & engineering, 2018, 720: 75-84.
- [73] SINGH R, RAUWALD K H, WESSEL E, et al. Effects of substrate roughness and spray-angle on deposition behavior of cold-sprayed Inconel718[J]. Surface & coatings technology, 2017, 319: 249-259.
- [74] KALSIS S S, SIDHU T S, KARTHIKEYAN J, et al. Evaluation of NiCoCrAlY coatings deposited on superalloy with novel cold spray process[J]. Surface engineering, 2015, 31(11): 840-845.
- [75] HARMINDER S, HENNA K, SIDHU T S, et al. Characteristic study of N07718 superalloy surface prepared by cold spray[J]. Materials and manufacturing processes, 2016, 32(2): 140-148.
- [76] BARANOVSKI V E, BARANOVSKI A V. Gas dynamic cold spray method and apparatus: US, 20160047052[P]. 2016-04-07.
- [77] 高东强, 王蕊, 陈威, 等. 激光熔覆改善材料性能的研究进展[J]. 热加工工艺, 2017, 46(12): 14-18.  
GAO Dong-qiang, WANG Rui, CHEN Wei, et al. Research progress of improving material properties by laser cladding[J]. Hot working technology, 2017, 46(12): 14-18.
- [78] 刘海青, 周伟. 激光熔覆材料的研究进展[J]. 现代制造技术与装备, 2017(11): 83-84.  
LIU Hai-qing, ZHOU Wei. Research progress of laser cladding materials[J]. Modern manufacturing technology and equipment, 2017(11): 83-84.
- [79] 李栋, 张群莉, 姚建华, 等. 不同气氛对激光熔覆 IN718 涂层形貌、组织与性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 185-191.  
LI Dong, ZHANG Qun-li, YAO Jian-hua, et al. Influence of atmospheres on morphology, microstructure and properties of laser cladding IN718 coatings[J]. Surface technology, 2018, 47(7): 185-191.
- [80] ZHONG C L, KITTEL J, GASSER A, et al. Study of nickel-based super-alloys Inconel 718 and Inconel 625 in high deposition-rate laser metal deposition[J]. Optics and laser technology, 2019, 109: 352-360.
- [81] NIE Pu-lin, OJO O A, LI Zhu-guo. Modeling analysis of laser cladding of a nickel-based superalloy[J]. Surface & coatings technology, 2014, 258: 1048-1059.
- [82] ZHANG Yao-cheng, LI Zhu-guo, NIE Pu-lin, et al. Carbide and nitride precipitation during laser cladding of Inconel 718 alloy coating[J]. Optics & laser technology, 2013, 52: 30-36.
- [83] 李金华, 李高松, 张德强, 等. 激光熔覆 NJ-4 镍基合金涂层显微硬度的探究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 77-83.  
LI Jin-hua, LI Gao-song, ZHANG De-qiang, et al. Study on microhardness of lasercladding NJ-4 powder[J]. Surface technology, 2018, 47(8): 77-83.
- [84] 李养良, 王利. 高温合金表面激光熔覆镍基合金研究[J]. 应用激光, 2015, 25(3): 295-299.  
LI Yang-liang, WANG Li. Study on superalloy surface laser cladding nickel base alloy[J]. Applied laser, 2015, 25(3): 295-299.
- [85] 张松, 武世奇, 关锰, 等. Monel 合金表面激光熔覆 Ni 基稀土合金空蚀性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(5): 1517-1522.  
ZHANG Song, WU Shi-qi, GUAN Meng, et al. Cavitation erosion properties of Ni-based RE alloy coating on monel alloy by laser cladding[J]. Rare metal materials and engineering, 2018, 47(5): 1517-1522.
- [86] 胡芳友, 回丽, 易德先, 等. 飞机损伤的激光抢修技术[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2245-2250.  
HU Fang-you, HUI Li, YI De-xian, et al. The laser repair technology for aircraft damage[J]. China laser, 2009, 36(9): 2245-2250.
- [87] 周广德. 电子束焊接技术的特点与应用[J]. 电工电能新技术, 1994(4): 25-30.  
ZHOU Guang-de. Characteristics and application of electron beam welding technology[J]. New technology of electrical energy, 1994(4): 25-30.
- [88] 张瑞宾, 王国富, 陈元华. 镍基合金表面电子束熔覆 Co/CeO<sub>2</sub> 复合涂层的耐磨性研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(4): 181-185.  
ZHANG Rui-bin, WANG Guo-fu, CHEN Yuan-hua. Study on wear resistance of electron beam cladding Co/CeO<sub>2</sub> composite coating on nickel-based alloy[J]. Hot working technology, 2019, 48(4): 181-185.
- [89] LIU H, QI Z, WANG B, et al. Numerical simulation of temperature field during electron beam cladding for NbSi<sub>2</sub> on the surface of Inconel617[J]. Materials research express, 2018, 5(3): 1591-1603.
- [90] JAWWAD A K A, STRANGWOOD M, DAVIS C L. Microstructural modification in full penetration and partial penetration electron beam welds in INCONEL-718 (IN-718) and its effect on fatigue crack initiation[J]. Metallurgical & materials transactions A, 2005, 36(5): 1237-1247.
- [91] 耿志杰, 王善林, 张子阳, 等. 电子束修复 IC10 高温合金熔覆层组织分析[J]. 精密成形工程, 2018, 10(5): 119-124.  
GENG Zhi-jie, WANG Shan-lin, ZHANG Zi-yang, et al. Microstructure of cladding layer by electron beam for

- IC10 single crystal superalloy[J]. Journal of net shape forming engineering, 2018, 10(5): 119-124.
- [92] KHAKZADSHAHANDASHTI A, RAHIMIPOUR M R, SHIRVANI K, et al. Weldability and liquation cracking behavior of ZhS6U superalloy during electron-beam welding[J]. International journal of minerals metallurgy & materials, 2019, 26(2): 111-119.
- [93] 严大考, 张洁溪, 唐明奇, 等. 等离子熔覆技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2015(4): 28-32.  
YAN Da-kao, ZHANG Jie-xi, TANG Ming-qi, et al. Research progress of plasma cladding technology[J]. Hot working technology, 2015(4): 28-32.
- [94] ZHU Zhi-yuan, YIN Zhi-ming, TENG Hao. Plasma cladding of Stellite 6 powder on Ni76Cr19AlTi exhausting valve[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(1): 35-40.
- [95] 张野, 王文权, 徐红勇. Mo 对等离子喷焊 Ni60A 涂层组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2016(7): 185-190.  
ZHANG Ye, WANG Wen-quan, XU Hong-yong. Effect of Mo on microstructure and properties of plasma spray welding Ni60A coating[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2016(7): 185-190.
- [96] SU C Y, CHOU C P, WU B C, et al. Plasma transferred arc repair welding of the nickel-base superalloy IN-738LC[J]. Journal of materials engineering & performance, 1997, 6(5): 619-627.
- [97] BRAY M, COCKBURN A, O'NEILL W. The laser-assisted cold spray process[J]. The laser user, 2008, 53: 30-31.
- [98] BRAY M, COCKKBURN A, O'NEIL W. The laser-assisted cold spray process and deposit characterization[J]. Surface and coatings technology, 2009, 203(19): 2851-2857.
- [99] YUAN Lin-jiang, LUO Fang, YAO Jian-hua. Research progress on supersonic laser deposition[J]. Applied laser, 2012, 32(4): 331-335.
- [100] YAO J H, YANG L J, LI B. Beneficial effects of laser irradiation on the deposition process of diamond/Ni60 composite coating with cold spray[J]. Applied surface science, 2015, 330: 300-308.
- [101] YANG Shuo, DU Dong, CHANG Bao-hua. Studies of the influence of beam profile and cooling conditions on the laser deposition of a directionally-solidified superalloy[J]. Materials, 2018, 11(2): 1-13.
- [102] 卞宏友, 翟泉星, 王维, 等. 激光沉积修复 GH738 高温合金的组织与拉伸性能[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 3-8.  
BIAN Hong-you, ZHAI Quan-xing, WANG Wei, et al. Microstructure and tensile properties of laser deposition repair GH738 superalloy[J]. Chinese journal of lasers, 2017, 44(10): 3-8.
- [103] RUIZ J, CORTINA M, ARRIZUBIETA J, et al. Study of the influence of shielding gases on laser metal deposition of Inconel 718 superalloy[J]. Materials, 2018, 11(8): 1388-1397.
- [104] BAMBACH M, SIZOVA I, SILZE F, et al. Hot workability and microstructure evolution of the nickel-based superalloy Inconel 718 produced by laser metal deposition[J]. Journal of alloys & compounds, 2018, 740: 278-287.
- [105] 程洪茂. 电磁辅助激光修复 GH4169 合金的组织 and 力学性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.  
CHEN Hong-mao. Microstructure and mechanical properties of laser repaired GH4169 superalloy assisted by electromagnetic stirring[D]. Nanchang: Nanchang Aeronautical University, 2018.
- [106] 程洪茂, 刘奋成, 杨光, 等. 电磁辅助激光修复 Inconel718 高温合金的组织及拉伸性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(10): 2949-2956.  
CHENG Hong-mao, LIU Fen-cheng, YANG Guang, et al. The microstructure and tensile properties of Inconel718 superalloy were repaired by electromagnetic assisted laser[J]. Rare metal materials and engineering, 2018, 47(10): 2949-2956.
- [107] 余小斌, 刘奋成, 林鑫. 电磁搅拌激光立体成形 GH4169 合金的组织 and 硬度分析[J]. 应用激光, 2014, 34(6): 513-517.  
YU Xiao-bin, LIU Fen-cheng, LIN Xin. Microstructure and mechanical properties of GH4169 superalloy fabricated by electromagnetic stirring assisted laser solid forming[J]. Applied laser, 2014, 34(6): 513-517.
- [108] 林英华, 姚建华, 张群莉, 等. 电磁复合场对 Ni60 激光熔覆层表面裂纹与组织结构的影响[J]. 电加工与模具, 2018(1): 37-40.  
LIN Ying-hua, YAO Jian-hua, ZHANG Qun-li, et al. Influence of electric-magnetic compound field on crack and microstructure of Ni60 alloy laser cladding coating[J]. Electromachining & mould, 2018(1): 37-40.
- [109] 张颖, 梁绘昕, 田宗军, 等. 超声冲击激光熔覆层的应力场数值模拟[J]. 应用激光, 2015, 35(3): 288-294.  
ZHANG Ying, LIANG Hui-xin, TIAN Zong-jun, et al. The numerical simulation analysis of laser cladding layer stress field with UIT[J]. Applied laser, 2015, 35(3): 288-294.
- [110] 戚永爱. 基于超声冲击的激光快速成形镍基高温合金强化技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.  
QI Yong-ai. Research on enhancing technology of laser rapid forming nickel-based superalloy by ultrasonic impact treatment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [111] 戚永爱, 赵剑峰, 谢德巧. 超声冲击细化 FGH95 镍基高温合金激光熔覆层组织[J]. 焊接学报, 2015, 36(3): 59-62.  
QI Yong-ai, ZHAO Jian-feng, XIE De-qiao. The microstructure of FGH95 nickel base superalloy laser cladding layer is refined by ultrasonic impact[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(3): 59-62.