

# 镍及其合金超精密抛光技术研究进展

韩嘉茹<sup>a,b</sup>, 蒋淼锦<sup>b,c</sup>, 陈倚<sup>a,b</sup>, 魏雅晓<sup>a,b</sup>, 乔冬升<sup>b,c</sup>,  
徐姿仪<sup>a,b</sup>, 弓爱君<sup>a,b\*</sup>

(北京科技大学 a.化学与生物工程学院 b.功能分子与晶态材料科学与应用北京市重点实验室  
c.材料科学与工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 镍及其合金作为高新技术领域的重要基础材料, 对其表面质量的要求日益提升。然而, 由于其韧性高、硬度高、导热系数小, 可加工性较差, 传统表面加工方法存在加工硬化、表面划痕、加工效率低等问题, 因此对镍及其合金进行超精密抛光已成为一个极其重要的研究方向。聚焦于高效率、高质量、低损伤抛光, 综述了应用于镍及其合金加工的电化学抛光 (ECP)、化学机械抛光 (CMP)、磁流变抛光 (MRF) 与激光抛光 (LP) 技术的原理、特点以及国内外研究现状。从表面质量、抛光效率、形状限制、环境污染以及加工成本这几个方面对各超精密抛光技术进行了对比, 并概述了不同抛光技术的优缺点, 分析了不同种类镍合金所适用的抛光方法。归纳总结发现, ECP 与 CMP 成本较低, 是目前加工镍及其合金的主流方式, 但其抛光液存在污染。MRF 与 LP 对环境友好, 可用于复杂形状表面的抛光, 但操作过程复杂、成本较高。最后基于目前镍及其合金超精密抛光所存在的问题与现有的技术, 对超精密抛光技术的发展趋势进行了展望, 以期为进一步研究镍及其合金的超精密抛光提供理论指导。

**关键词:** 镍合金; 抛光; 材料去除机理; 抛光效率; 表面质量; 超精密

**中图分类号:** TG356.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2025)01-0097-13

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.01.009

## Research Progress in Ultra-precision Polishing Techniques of Nickel and Its Alloys

HAN Jiaru<sup>a,b</sup>, JIANG Miaojin<sup>b,c</sup>, CHEN Yi<sup>a,b</sup>, WEI Yaxiao<sup>a,b</sup>, QIAO Dongsheng<sup>b,c</sup>,  
XU Ziyi<sup>a,b</sup>, GONG Aijun<sup>a,b\*</sup>

(a. School of Chemistry and Biological Engineering, b. Beijing Key Laboratory for Science and Application of Functional Molecular and Crystalline Materials, c. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, china)

**ABSTRACT:** Nickel and its alloys are indispensable basic materials in the high-tech field, and there is an increasing demand for the surface quality of nickel and its alloys. However, due to their high toughness, high hardness and low thermal conductivity,

收稿日期: 2024-03-26; 修订日期: 2024-06-04

Received: 2024-03-26; Revised: 2024-06-04

基金项目: 北京科技大学教育教学重大教改项目 (JG2021ZD01); 北京科技大学校级规划教材项目 (JC2021YB040); 大学生创新创业项目

**Fund:** University of Science and Technology Beijing Education and Teaching Major Teaching Reform Project (JG2021ZD01); University of Science and Technology Beijing School-level Planning Textbook Project (JC2021YB040); University Student Innovation and Entrepreneurship Project

引文格式: 韩嘉茹, 蒋淼锦, 陈倚, 等. 镍及其合金超精密抛光技术研究进展[J]. 表面技术, 2025, 54(1): 97-109.

HAN Jiaru, JIANG Miaojin, CHEN Yi, et al. Research Progress in Ultra-precision Polishing Techniques of Nickel and Its Alloys[J]. Surface Technology, 2025, 54(1): 97-109.

\*通信作者 (Corresponding author)

the machinability of nickel and its alloys is poor. The traditional surface processing methods are prone to cause work hardening and surface scratches, as well as low processing efficiency. Therefore, the ultra-precision polishing of nickel and its alloys has become an extremely significant research direction. Focusing on high efficiency, high surface quality and low surface damage polishing, this paper reviews the principles, characteristics and research status of the electrochemical polishing (ECP), chemical mechanical polishing (CMP), magneto-rheological finishing (MRF) and laser polishing (LP) for nickel and its alloys. The different ultra-precision polishing techniques are compared in terms of surface roughness, surface damage, processing efficiency, shape limitation, environmental pollution, and processing cost. Furthermore, this paper summarizes the advantages and disadvantages of each polishing technique. ECP and CMP are the two most widely used polishing methods in processing of nickel and its alloys. ECP has a series of processing characteristics such as no restrictions on workpiece geometry and size, no residual stress, no surface damage, high processing efficiency and high surface quality. CMP can achieve global planarization of materials through the dual coupling effect of chemical corrosion and mechanical removal, ensuring high material removal rate while achieving low surface roughness. However, the above two methods involve chemical reagents in their polishing slurries that can react with the workpiece, resulting in surface contamination on nickel and its alloys. Additionally, these techniques typically use strong acid, strong alkali and highly corrosive chemicals which can cause certain harm to the experimental operators and the environment. As a flexible polishing method, MRF can be used for ultra-precision polishing of complex surfaces. It has higher efficiency, high surface quality and low surface damage. However, the preparation process of magnetorheological fluid is complicated, resulting in high cost of this technique and limited applications in industrial production. LP is a non-contact polishing method that applies no pressure to the workpiece, which makes it suitable for processing complex geometric parts and free of surface damage. It has the advantages of high precision and efficiency in polishing, without material waste and environmental pollution. However, as a new technology, LP is also characterized by drawbacks such as high initial cost of laser polishing system, cumbersome operation process and high power required when metals are characterized by high reflectivity. What's more, it is pointed out that the properties of nickel and its different alloys are quite distinct, so it is necessary to select appropriate polishing methods according to different properties of alloys and processing requirements in this paper. Finally, based on existing problems and current techniques in ultra-precision polishing of nickel and its alloys, the development trend of ultra-precision polishing techniques are outlined from four aspects: improving the theoretical framework and system, revealing the mechanism of ultra-precision polishing techniques; exploring the collaborative processing of various energy fields and the coupling use of multiple polishing techniques; taking into account the complex structures of nickel and its alloys in practical applications; achieving the low-cost and environmentally friendly polishing process.

**KEY WORDS:** nickel alloy; polishing; material removal mechanism; polishing efficiency; surface quality; ultra-precision

镍由于熔点高(1453℃)、延展性好、耐腐蚀、抗氧化、强度高等优良特性<sup>[1-2]</sup>,被用于不锈钢的生产以及电池材料的制备,是工业发展过程中不可或缺金属材料<sup>[3]</sup>。以镍为基体,添加适宜的元素,其力学和化学性能将进一步得到改善。例如,添加少量Al、Cr元素,镍合金表面会形成一层致密的氧化膜,使其具有良好的耐腐蚀和抗氧化能力<sup>[4-5]</sup>。加入少量的Mo、W、Re等难熔元素,可以显著改善镍合金的抗蠕变性<sup>[6]</sup>。因此,镍合金具有优异的抗氧化能力、良好的抗热疲劳和抗蠕变性能以及独特的抗高温耐腐蚀性能<sup>[1,7-9]</sup>,被广泛应用于多个现代工业领域<sup>[1,10-11]</sup>。在航空航天领域,镍合金主要用于制造航空发动机的涡轮叶片、燃烧室等关键热端部件,提高了部件的抗热、耐腐蚀性能与疲劳寿命<sup>[12]</sup>。在生物医学领域,镍合金因其持久的抗疲劳特性、独特的超弹性、形状记忆效应与生物相容性等优点,被用于制作心血管支

架、腔静脉滤器<sup>[13-14]</sup>。在集成电路领域,镍合金由于优良的耐磨性、耐蚀性和硬度高等特点,被用作计算机硬盘的镀层<sup>[15]</sup>。在核能工业领域,镍合金由于具有非常优异的抗氧化、耐应力腐蚀等性能,主要用于制造反应堆蒸汽发生器<sup>[16]</sup>。

随着镍及其合金在高新技术领域的广泛应用和机器零件服役环境的日益复杂化,镍及其合金的表面质量愈加重要。不良的表面完整性将导致航空发动机零部件出现表面缺陷、残余应力集中,大大降低零部件的疲劳寿命<sup>[17-18]</sup>,并且有研究表明未加工涡轮叶片( $Ra=11.8\mu\text{m}$ )的压力损失比较光滑的叶片( $Ra=0.38\mu\text{m}$ )高40%,会严重影响涡轮叶片的气动性能<sup>[19]</sup>。心血管支架的表面粗糙度较高会给植入处的血液流动带来阻力,易造成血栓,并且会严重影响镍合金的生物相容性<sup>[20-21]</sup>。计算机硬盘表面存在凸起、凹坑等缺陷时,磁头会与磁盘表面发生碰撞,发生“磁头压碎”,导

致数据的读取与保存发生错误<sup>[22-23]</sup>; 蒸汽发生器表面粗糙度较大时, 其凹痕处面积大, 易积聚大量的放射性微粒, 会对工作人员的健康造成极大影响, 而通过精密表面加工可使积聚物减少 50%~67% 甚至更多<sup>[24]</sup>。然而, 镍及其合金作为一种典型的低导热系数、高硬度、高韧性难加工材料<sup>[25-26]</sup>, 传统表面加工方法(磨削、切削等)难以实现对其高质量表面加工。其中, 磨削通过众多磨粒划擦、耕犁和成屑的过程, 将材料从工件基体材料上去除<sup>[27]</sup>, 具有加工效率高、表面粗糙度低等优点<sup>[27-28]</sup>, 但是磨削加工所需的力与温度较高, 使得磨削过程中加工硬化现象严重, 加工工件表面出现烧伤、裂纹、再结晶等缺陷, 工件表面完整性变差<sup>[29]</sup>; 切削通过刀具与工件相互作用使材料发生变形与断裂, 形成切屑, 从而实现表面加工<sup>[30]</sup>, 具有加工成本低、加工精度高、热变形小等优点<sup>[31]</sup>, 但是在镍及其合金的切削加工过程中, 切削热积聚, 存在刀具磨损严重、工件表面质量差等问题<sup>[2,32]</sup>。虽然国内外研究人员针对上述加工技术进行了一系列改进, 但由于其纯机械去除原理的限制, 加工精度与工件表面质量难以进一步提高<sup>[33]</sup>。作为材料表面加工处理的最终步骤, 超精密抛光能够有效地消除工件表面上的划痕、裂纹和点蚀等各种缺陷, 获得低表面损伤、纳米级表面粗糙度的超光滑表面。

本文详细介绍了几种应用于镍及其合金的超精密抛光技术的原理、优缺点, 综述了应用于镍及其合金的电化学抛光、化学机械抛光、磁流变抛光以及激光抛光的研究现状, 从表面粗糙度、表面损伤、抛光效率、形状限制、环境污染以及加工成本这几个方面, 对比了各个抛光方法间的差异, 并基于目前镍及其合金超精密抛光所存在的问题与现有的抛光技术, 对超精密抛光技术的发展趋势进行了展望。

## 1 电化学抛光

电化学抛光(Electrochemical Polishing, ECP)又称电解抛光, 通过阳极溶解现象消除材料表面的不规则性。ECP 过程中, 以待抛工件为阳极, 不溶性金属为阴极, 当外部电源提供电压时, 电流通过电解液, 阳极金属从表面去除并变成阳离子溶解在电解液中<sup>[34]</sup>。由于凸出部位的电流密度大, 腐蚀速度快, 阳极表面的凹凸差距减小, 其表面随之均匀、光滑平整<sup>[20,35]</sup>。

目前, 镍及其合金的电化学抛光以酸性抛光液为主。王毅等<sup>[37]</sup>以磷酸-硫酸-柠檬酸为电解液, 探究了不同外加电压对哈氏合金 ECP 过程的影响, 并根据电流密度与材料表面平整性的变化, 将 ECP 过程分为活化、钝化、超钝化 3 个阶段。在钝化阶段, 当电压为 3.5 V 左右时, 合金处于抛光段, 阳极表面选择性溶解, 部分金属原子发生氧化反应生成低价氧化物, 并溶解在电解液中生成金属离子, 合金表面逐渐平滑。其电化学反应可用式(1)~(3)表示。

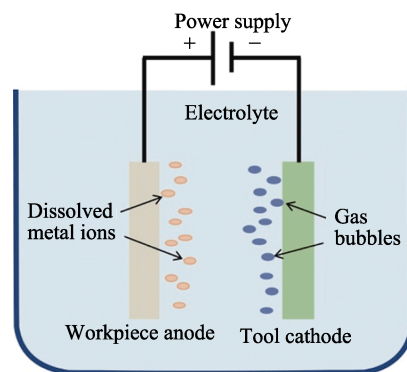
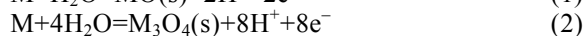
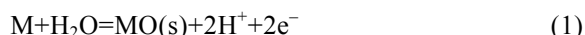


图 1 电化学抛光工艺示意图<sup>[36]</sup>

Fig.1 Schematic of electrochemical polishing process<sup>[36]</sup>



结果表明, 电化学抛光 90 s 时, 合金表面粗糙度可降低至 5 nm 以下。黄朝霞等<sup>[38]</sup>选用醋酸-高氯酸电解液对镍钛合金进行 ECP, 与未经 ECP 的镍钛合金相比, 其  $R_a$  值大幅度降低, 最低可至 51.1 nm; 将其浸泡于 Hank's 模拟体液时, 表面会生成以  $TiO_2$  为主的钝化膜, 使其耐腐蚀性与生物相容性均大幅提升。Wang 等<sup>[39]</sup>在醋酸-高氯酸电解液中加入甲醇与葡萄糖, 对镍钛合金进行电化学抛光, 发现甲醇有效抑制了电解液的凝固倾向并延缓了合金表面的腐蚀, 葡萄糖可以有效改善合金的表面微形貌。当甲醇浓度为 70 mL/L、葡萄糖质量浓度为 6 g/L 时, 镍钛合金抛光效果最佳, 表面粗糙度  $R_a$  由 1.37  $\mu m$  降至 40.7 nm。Sana 等<sup>[40]</sup>对比了从强酸至弱酸 3 种不同电解质溶液对镍模具成型与抛光效果的影响, 发现在  $H_3PO_4$  电解液中, 可以实现镍模具的成型和有效抛光, 使得模具表面粗糙度下降 20%, 而在  $H_2NSO_3$  和  $Ni(SO_3NH_2)_2$  电解液中, 也可以实现模具的塑型, 但均使其表面粗糙度增大, 首次证明了 ECP 可以用于镍模具的成型与抛光。

2004 年, Abbott 开发了一种无害环保的深共晶溶剂<sup>[41]</sup>, 具有良好的金属盐溶解性、电化学稳定性和高电流效率等特性<sup>[42]</sup>。因此, 国内外学者对用离子液体代替传统有害酸混合物对镍及其合金进行 ECP 展开了大量研究。Goddard 等<sup>[43]</sup>对比了深共晶溶剂与传统酸性混合液作为电解质对 RR1000 镍基高温合金的 ECP 效果, 发现利用深共晶溶剂进行 ECP 后, 表面粗糙度较差, 但其抛光效率更高, 表面光洁度更好。Loftis 等<sup>[44]</sup>使用氯化胆碱-乙二醇离子液体对高纯镍进行 ECP, 揭示了离子液体作为电解液进行 ECP 的机理——阳极镍表面选择性溶解, 并与  $Cl^-$  反应生成蓝色氧化物  $NiCl_2$ , 阴极胆碱通过接受电子形成瞬态胆碱自由基后, 分解为三甲胺和乙醇自由基。当外加电压为 3.75 V、精密抛光 900 s 时, 镍的表面光洁度提高了 6 个数量级,  $R_a$  值从 112.58 nm 降低至 18.64 nm, 如图 2 所示。Liu 等<sup>[45]</sup>以深共晶溶剂润湿的树脂颗粒

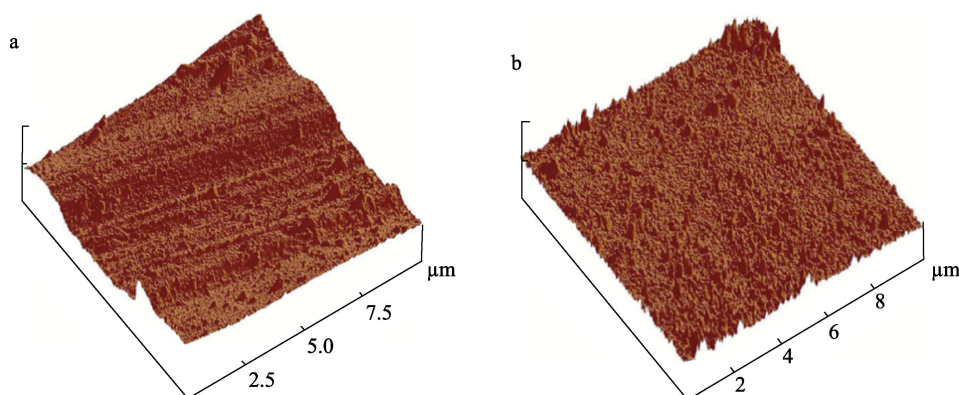


图 2 电解抛光处理前 (a) 和抛光处理后 (b) 镍样品三维的 AFM 表面粗糙度分析<sup>[44]</sup>  
Fig.2 AFM surface roughness analysis of nickel samples in 3D, before electrolytic polishing (a) and after electrolytic polishing treatments (b)<sup>[44]</sup>

作为抛光介质对镍进行了电解抛光,在 30 V 外加电压下抛光 1 h 后, $R_a$  值从  $0.612\ \mu\text{m}$  降低至  $0.0913\ \mu\text{m}$ ,腐蚀电流密度从  $27.30\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$  降低至  $12.15\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,表面均匀程度与耐腐蚀性均得到了显著改善。

ECP 技术通过电解作用对工件表面材料的溶解实现超精密抛光,具有对工件几何形状和大小没有限制、不会引起的残余应力、不存在表面损伤、高加工效率和高表面质量等一系列加工特性<sup>[24,36]</sup>,被广泛应用于医疗、核能等工业领域。但该抛光技术对抛光前工件表面质量的要求较高<sup>[46]</sup>,多使用高氯酸、硫酸等具有强腐蚀性的有害化学试剂<sup>[37,39,47-48]</sup>,使用深共晶溶剂进行抛光时所需工艺与装置要求高,难以实现应用<sup>[49]</sup>。

## 2 化学机械抛光

化学机械抛光 (Chemical Mechanical Polishing, CMP) 技术将抛光垫和抛光液中磨料的机械研磨作用与化学试剂的腐蚀作用有机地结合起来,能实现原子层级超光滑表面的制备<sup>[50-51]</sup>。如图 3 所示,在 CMP 过程中,抛光液中的化学组分和材料表面发生反应,在被抛材料表面形成一层很薄、结合力较弱的“软化层”;磨料与抛光垫在压力和摩擦作用下对工件表面进行微量去除,最终形成超光滑表面<sup>[52-53]</sup>。磨料的机械作用是镍及其合金在 CMP 中材料去除的主要因素,直接影响工件的表面粗糙度与材料去除率,因此选择合适的磨料对抛光效果起着至关重要的作用<sup>[52]</sup>。

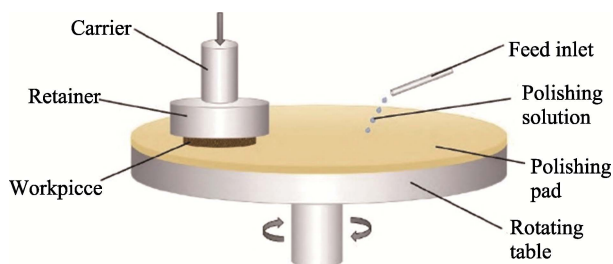


图 3 化学机械抛光工艺示意图<sup>[52]</sup>  
Fig.3 Schematic of chemical mechanical polishing process<sup>[52]</sup>

$\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  是目前镍及其合金化学机械抛光液磨料最常见的选择。韦岚清等<sup>[54]</sup>以  $60\ \text{nm}$  的  $\text{SiO}_2$  作为抛光磨料,对抛光工艺参数进行一系列优化后,获得了  $R_a$  值为  $0.684\ \text{nm}$  的超光滑镍基合金 GH3536 表面。雷红等<sup>[55]</sup>以超细  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子为磨料,在一定的条件下进行抛光后,合金的表面粗糙度  $R_a$  降低至  $1.24\ \text{nm}$ 。Salleh 等<sup>[23]</sup>探究了二氧化硅的形状、粒度分布对镍合金抛光材料去除率的影响,结果表明,非球形  $\text{SiO}_2$  比球形  $\text{SiO}_2$  的材料去除率高出 20%,粒度分布宽的磨料比粒度分布窄的磨料的材料去除率高出 11%。Lei 等<sup>[56]</sup>合成了一种新型  $\text{SiO}_2/\text{CeO}_2$  纳米复合磨料,利用该磨料对镍磷合金进行 CMP 时,能缓解  $\text{SiO}_2$  直接接触合金表面带来的硬冲击,提高材料表面的平整性,最终  $R_a$  值低至  $0.48\ \text{nm}$ 。Huang 等<sup>[57]</sup>制备了一种具有良好分散性的多孔氧化铝-聚苯乙烯磺酸磨料,并将其应用于镍合金的化学机械抛光,结果表明,相较于固体  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,改性  $\text{Al}_2\text{O}_3$  磨料在抛光时显示出更低的表面粗糙度,有效解决了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  磨料在抛光液中容易团聚而划伤工件表面的问题。Lei 等<sup>[58]</sup>采用溶胶-凝胶法合成了介孔  $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  磨料对镍合金进行 CMP,相比于固体  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,镍合金的表面粗糙度更低。 $\text{CuO}$  的掺入可以强烈催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  分解为强氧化剂  $\cdot\text{OH}$  和  $\cdot\text{O}_2^-$ ,加速 CMP 过程中的化学刻蚀,显著提高了镍合金的抛光效率。

抛光液的组分及其配比对提高 CMP 效果起到了关键性的作用,为此国内外学者针对镍及其合金抛光液的组分和抛光机理进行了大量研究。Kim 等<sup>[59]</sup>以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  磨料为抛光液的主要成分,对比了 MSW2000B、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{KIO}_3$  和  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  等 4 种不同氧化剂对镍的抛光效果,结果表明,选用 1%  $\text{H}_2\text{O}_2$  (体积分数) 作为氧化剂时,镍的表面质量最好,可达到最高去除率  $71.0\ \text{nm}/\text{min}$ 。Mu 等<sup>[60]</sup>探究了二氧化硅基抛光液中钝化剂苯并三唑 BTA 与 NiP 合金表面的相互作用,发现在抛光液中加入  $2\ \text{mmol}/\text{L}$  BTA 时可以使合金表面生成一层有效的钝化膜,有助于表面粗糙度的降低。Zhang 等<sup>[61]</sup>采用多步加工工艺制备表面超光滑、低损



伤的镍合金，首先采用机械研磨获得一定的表面质量，然后以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为磨料进行机械抛光，最后用  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、苹果酸和去离子水制备新型绿色抛光液进行 CMP，合金表面质量逐步提高，最终达到了镜面效果， $R_a$  值可达到 0.440 nm，如图 4 所示。CMP 抛光液中的络合剂苹果酸可以溶解镍的氧化物，并与镍离子发生螯合反

应，防止了有害金属离子的释放。Li 等<sup>[62]</sup>以  $\text{SiO}_2/\text{CeO}_2$  为磨料，以  $\text{H}_2\text{O}_2$  为氧化剂，以扁桃酸为 pH 调节剂和络合剂，制备哈氏合金 C22 的绿色 CMP 抛光液，通过调节抛光液的 pH 值与  $\text{H}_2\text{O}_2$  浓度使化学与机械效应逐渐达到平衡，当  $\text{pH}=3.5$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$  质量分数为 12% 时，可获得最低表面粗糙度，为 0.179 nm。

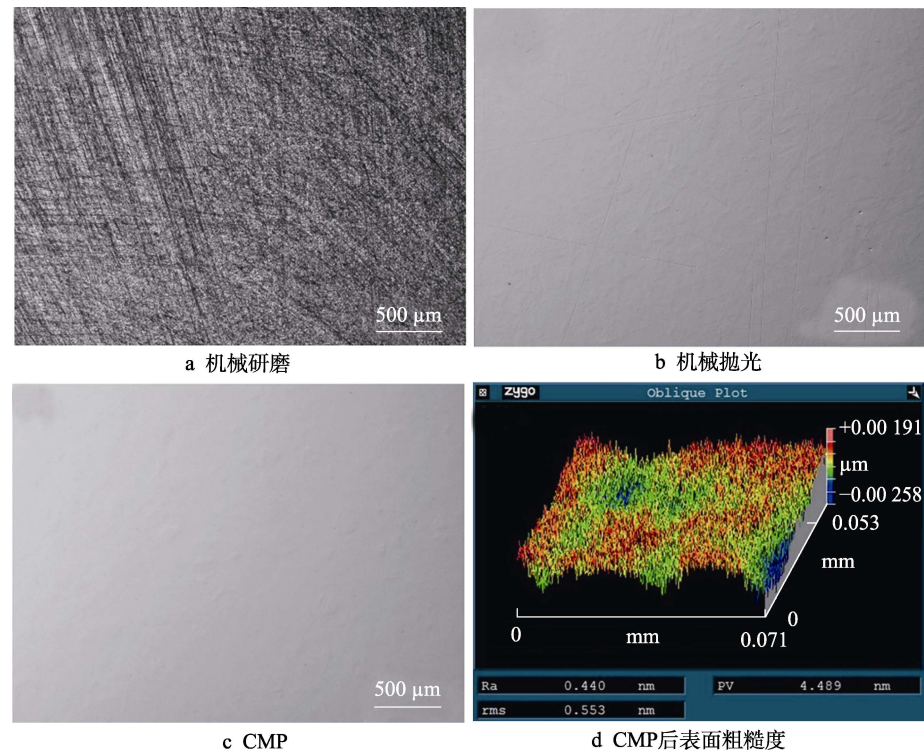


图 4 Ni 合金表面加工后的光学图像<sup>[61]</sup>  
Fig.4 Optical images on machined surfaces of Ni alloy after processing<sup>[61]</sup>: a) mechanical lapping; b) mechanical polishing; c) CMP; d) surface roughness after CMP

CMP 技术借助于化学腐蚀和机械去除的双重耦合作用实现材料的全局平坦化，既克服了化学抛光表面质量差、材料去除率低的缺陷，又避免了机械抛光表面光亮度差、容易造成亚表面损伤、微划痕的问题，可以在实现低表面粗糙度的同时，保证较高的材料去除率，被广泛应用于先进制造领域中高精密功能材料的加工。然而，目前为止，CMP 仍存在一些共性问题亟需解决，例如多数化学机械抛光液中存在有毒、有害、强腐蚀性的物质，与当前所倡导的绿色发展理念相违背；复合磨料虽然抛光效果好，但制作成本高，难以普及<sup>[52,63]</sup>。

### 3 磁流变抛光

磁流变抛光 (Magneto-Rheological Finishing, MRF) 是一种用于制造超光滑表面的柔性抛光技术。MRF 技术的核心是由基液、磁性碳基铁颗粒 (Carbonyl Iron Particle, CIP)、磨料颗粒 (Abrasive Particle, AP) 和添加剂组成的磁性复合流体 (Magnetic Compound Fluid, MCF)，它的流变特

性会随外加磁场的强弱发生变化<sup>[64]</sup>。如图 5 所示，MCF 浆料进入高梯度磁场后，会由牛顿流体转变为 Bingham 介质并形成类似于固体的柔性“小磨头”。在抛光工具的带动下，它与工件之间产生快速的相对运动，使工件表面受到很大的剪切力，从而实现工件表面材料的去除<sup>[65]</sup>。

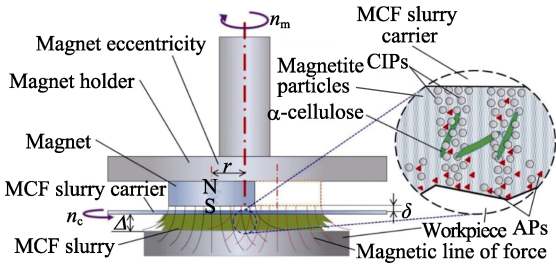


图 5 磁流变加工示意图<sup>[66]</sup>  
Fig.5 Schematic diagram of MRF<sup>[66]</sup>

磨料颗粒与磁性颗粒作为 MCF 的重要组成部分，直接影响镍及其合金的抛光效率与表面质量。Xu 等<sup>[59]</sup>建立了包含磁偶极子和非磁性磨粒的双相粗

粒分子动力学模型,探究了磁场梯度、磁场强度、磨粒浓度对抛光效果的影响,结果表明,磁场梯度和强度的增加均会使活性磨料颗粒的比例提高,材料去除率增大,而磨粒浓度的增加则会使活性磨料颗粒的比例降低,材料去除率减小。Guo 等<sup>[67]</sup>制备了一种由  $\text{ZrO}_2$  磨粒涂层铁粉和水组成的新型 MCF,并将其抛光效果与由 CIP、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和水组成的传统 MCF 进行对比,经传统 MCF 抛光后,镍磷电镀层表面存在划痕和颗粒嵌入,而新型 MCF 抛光后,合金表面没有划痕或颗粒嵌入,初步证明了 MRF 可以应用于磁性材料的超精密加工。然而,  $\text{ZrO}_2$  磨粒涂层铁粉仍处于开发阶段,价格昂贵,因此,近年来研究人员对使用裸露 CIP 抛光磁性材料进行了大量研究。Wang 等<sup>[66]</sup>探究了 MRF 过程中磁力与重力对 CIP 和 AP 行为与分布情况的影响,对于磁性工件 Ni,合力将 CIP 吸引

到工件表面,而 AP 则被推离工件表面,因此易产生划痕与颗粒嵌入。而当 CIP 的直径较大、AP 的直径较小时, CIP 与工件之间的空间能容纳的 AP 数量增多,参与 MRF 的 AP 数量增多,抛光效果显著提高。同时他们对化学镀镍磷 STAVAX 钢进行了 MRF 实验,当 CIP 和 AP 的直径分别为  $7\text{ }\mu\text{m}$  和  $1\text{ }\mu\text{m}$  时,  $R_a$  值可达  $3.6\text{ nm}$ ,且不存在划痕与颗粒嵌入。Nguyen 等<sup>[68]</sup>使用 2 个电磁铁制作成磁轭,由于磁泄漏,2 个磁体之间的气隙处会形成磁场。通过改变感应铜磁线圈中电流大小来改变磁场大小,使得 AP 靠近工件表面,而 CIP 远离工件表面,克服了原先 AP 朝远离工件表面方向运动的问题,利用该方法对 NiP 合金进行 MRF 时,合金表面质量逐渐改善,如图 6 所示,经过 90 min 的抛光后,  $R_a$  值可达  $0.561\text{ nm}$ ,且合金表面没有划痕和颗粒嵌入。

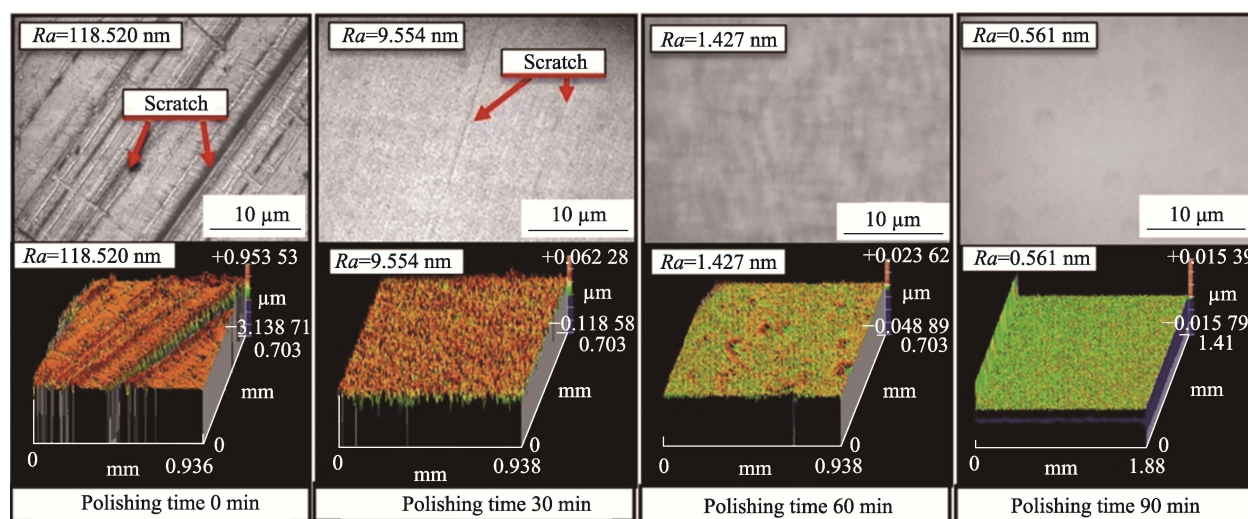


图 6 不同抛光时间下 Ni-P 涂层 SKD11 材料的 SEM 和表面粗糙度图像<sup>[68]</sup>

Fig.6 SEM and surface roughness image obtained when polishing Ni-P coated SKD11 material<sup>[68]</sup>

艾博等<sup>[69]</sup>应用 MRF 技术去除了镍磷合金 SPDT 加工引起的车削刀痕,获得了  $2.62\text{ nm}$  的优异表面粗糙度,但 MRF 技术易产生规则性的中频误差,会引起反射式光学元件的小角度散射,从而降低光学性能。Hu 等<sup>[70]</sup>开发了一种金属反射镜改性层超精密加工的组合加工技术,将 SPDT 车削、MRF 与 CCOS 平滑技术相结合,使合金的  $R_a$  值降低至  $0.39\text{ nm}$ ,并有效去除了中频误差。Kang 等<sup>[71]</sup>探究了热处理对化学镀镍磷模具的 MRF 的影响,发现在一定温度下进行热处理可以使 NiP 镀层结晶,提高表面硬度及其均匀性,在增大加工效率的同时提高了 MRF 加工后的光学性能。

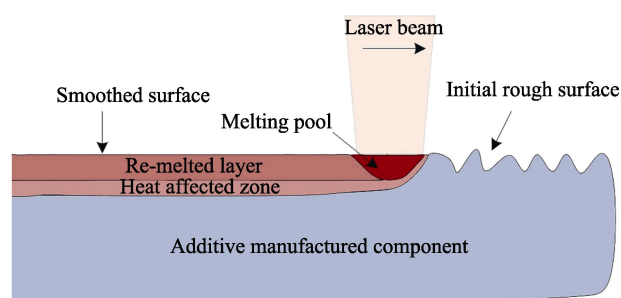
MRF 技术是一种柔性抛光方法,介于接触式抛光与非接触式抛光之间,具有加工表面质量高、加工碎屑实时去除、加工效率高且不引入亚表面损伤等优点<sup>[65,72]</sup>,并且可以用于复杂曲面的加工,可实现表面粗糙度为亚纳米级的超光滑表面的制备,被广泛应用于光学仪器的表面加工,但是 MCF 性质不稳定,在

使用过程中导磁粒子因相互摩擦存在磨损,导致其制备过程繁琐、成本高昂<sup>[28,72]</sup>。

## 4 激光抛光

激光抛光 (Laser Polishing, LP) 是一种利用激光与材料表面相互作用进行加工的非接触式抛光方法。当高强度激光束撞击被加工金属的表面时,金属表面发生熔化,形成熔池。由于表面张力和重力的作用,熔融金属流动,实现凸峰填补凹谷。当激光束离开时,它会迅速固化,从而获得光滑的表面和精细的微观结构<sup>[73-74]</sup>。目前, LP 工艺主要有 2 种形式:连续激光抛光和脉冲激光抛光<sup>[75]</sup>。连续激光抛光利用连续激光束进行加工,具有较强的热效应,重熔深度可达毫米级别,主要用于宏观表面加工;而脉冲激光抛光利用离散的激光束进行加工,热效应较低,可以实现纳米级的表面粗糙度,主要用于微抛光处理<sup>[74,76]</sup>。激光抛光工艺示意图见图 7。



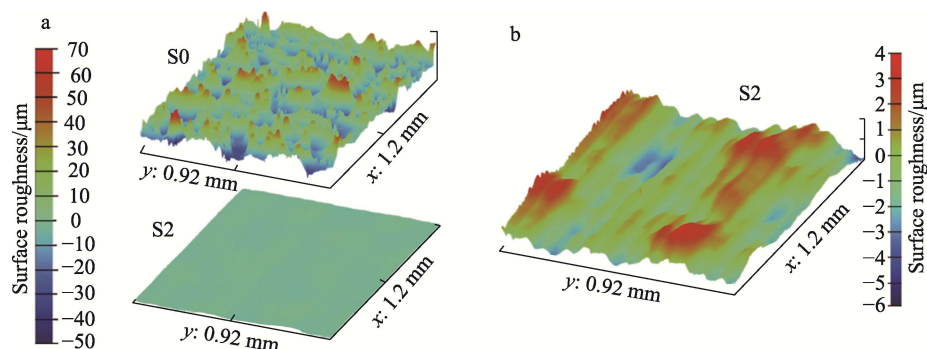
图 7 激光抛光工艺示意图<sup>[77]</sup>Fig.7 Schematic diagram of laser polishing process<sup>[77]</sup>

近年来,许多学者致力于使用数值模拟探究 LP 的机理并预测加工参数,对提升镍及其合金表面质量有着重要意义。Zhao 等<sup>[78]</sup>采用数值模拟与实验相结合的方法证明了激光功率对材料表面质量的重要性,激光功率过小,会导致熔池寿命很短,不足以使表面凸起消失;激光功率过大,轨道表面会产生新的凸起和凹陷,影响表面质量。同时,他们揭示了 LP 改善镍合金表面质量的机理——在毛细管力和热毛细管力驱动作用下,熔池发生流动,凸起的曲率减小,材料表面质量提高;揭示了合金表面形成新凹陷和凸起的机理——LP 过程中,如果热毛细力引起的传质不能及时填充凹陷,则会导致合金表面形成新凹陷缺陷;由表面张力梯度引起的激光轨道中心和两侧之间的材料交换会导致合金表面形成凸起。Jang 等<sup>[79]</sup>利用线性有限元法建立了紫外脉冲激光微抛光工艺动态模型,对纯镍进行了数值模拟分析,预测了不同脉冲宽度下适合抛光的激光能量密度范围,发现脉冲宽度越大,与表面熔体相对应的激光能量密度范围越大,使熔融区向本体扩散的热量增加,导致大部分能量耗散。

激光抛光工艺参数直接影响材料的表面质量与微观结构。Kumstel 等<sup>[80]</sup>用不同的工艺参数组合对车削或铣削的平面 Inconel 718 试样进行连续激光抛光,发现当光束直径为 800  $\mu\text{m}$ 、扫描速率为 250 mm/s、激光功率为 250 W 时,表面质量最佳, $R_a$  值由 1.0  $\mu\text{m}$  降低至 0.11  $\mu\text{m}$ 。Chernyshikhin 等<sup>[81]</sup>探究了增材制造

镍钛合金的激光抛光技术,当激光功率为 540 W、扫描速度为 25 mm/s、光斑直径为 500  $\mu\text{m}$  时,重熔深度与孔隙层深度相当,抛光后表面无孔隙型缺陷,耐腐蚀性得到了显著改善,且  $R_a$  值降低了 94%,如图 8 所示。Liu 等<sup>[82]</sup>对比了脉冲激光抛光技术与脉冲激光和连续波激光的混合激光抛光技术,对 LDED Inconel 718 样品表面质量与摩擦性能的影响,发现利用脉冲激光抛光技术抛光后, $R_a$  值为 6.47  $\mu\text{m}$ ,而利用混合激光抛光技术抛光后, $R_a$  值可达 0.58  $\mu\text{m}$ ,并有效地防止了疲劳裂纹的扩展,显著提高了样品的耐磨性。Cwikla 等<sup>[83]</sup>对比了氩气环境与空气环境中对 Inconel 718 抛光结果的影响,发现在氩气环境与空气环境下进行抛光后,合金的表面粗糙度分别降低了 82.8%和 87.9%,两者相近,证明了在无保护气氛下通过 LP 实现表面质量的改善的可能性。Arrizubiet 等<sup>[84]</sup>提出了一种结合激光金属沉积、激光束加工和 LP 工艺制造复杂零件的创新技术,简化了制造过程中产生的残留物的管理,实现了更清洁、更环保的制造,并发现该过程中 LP 工艺会使 Inconel 718 表面生成厚度为 22  $\mu\text{m}$  的重铸层,可能会影响零件的机械性能。相较于传统的高斯光束,利用调制光束进行 LP 可显著提高加工效率,且不会出现传统方法所观察到的熔体伪影<sup>[85]</sup>。Campanelli 等<sup>[86]</sup>利用集成矩形激光光斑对镍基合金进行 LP,发现在保持激光功率恒定的同时,加工效率基本上随速度线性增加,重熔表面的显微硬度增加了约 14%,表面力学性能略有改善。Yi 等<sup>[87]</sup>利用脉冲线光斑对镍基高温合金 DZ411 进行 LP,发现当  $v=110$  mm/s 时, $R_a$  值降低了 44.3%,抛光效率可达 26.209  $\text{cm}^2/\text{min}$ ,证明了调制光束在激光抛光领域有着巨大的潜力。

LP 技术通过激光束与材料表面的相互作用实现超光滑表面的制备,是一种非接触式抛光方法,工件不会受到压力,不存在表面损伤,重熔可以减少孔隙率等缺陷,并且其抛光精度高、抛光效率高、无材料损失<sup>[88-90]</sup>,可用于复杂几何形状的零件加工,因此被广泛应用于增材制造领域工件的加工,但其也存在一定的缺点,例如其所使用的仪器成本高、操作过程复杂以及金属具有高反射率时需要较高的功率<sup>[74,88]</sup>。

图 8 样品和激光抛光后样品 S2 (a) 以及较高倍率下激光抛光后样品 (b) 的表面轮廓<sup>[81]</sup>Fig.8 Surface profile for as-built and laser polished sample S2 (a), and laser polished sample with higher magnification (b)<sup>[81]</sup>

5 镍及其合金超精密抛光方法的对比

从表面质量、抛光效率、形状限制、环境污染以

及加工成本等方面,将上述几种超精密抛光技术进行比较,归纳如表 1 所示,这对镍及其合金高效率、高质量、低损伤新型超精密抛光技术的研发具有重要的指导意义。

表 1 几种典型的镍及其合金超精密抛光方法的对比  
Tab.1 Comparison of several typical ultra-precision polishing methods for nickel and its alloys

Polishing technique	Surface roughness $Ra/nm$	Polishing efficiency	Surface damage	Shape limit	Pollution	Processing cost
ECP	$<5^{[37]}$	High	No	No	Yes	Medium
CMP	$0.179^{[62]}$	High	Yes	Flat	Yes	Low
MRP	$0.3^{[91]}$	Higher	Yes	No	No	High
LP	$15^{[92]}$	Higher	No	No	No	High

电化学抛光和化学机械抛光是目前镍及其合金加工过程中应用最广泛的 2 种抛光方式。电化学抛光利用电解时工件表面凹陷与凸起处的材料腐蚀速率的不同对工件进行抛光,耗材少,加工效率高,可以得到高质量、无损伤的表面,能够用于各种复杂结构零件的超精密抛光。化学机械抛光通过机械磨削和化学腐蚀的双重耦合作用对工件表面进行去除,会产生轻微的亚表面损伤,成本低廉,加工效率高。但这 2 种抛光方法均存在化学作用,会与工件发生化学反应,使得镍及其合金表面存在一定的污染,并且这 2 种方法多使用强酸、强碱、强腐蚀性的有害化学试剂,会对环境造成极大的污染。

磁流变抛光是一种柔性抛光方法,它利用磁性混合流体与材料表面之间的相对运动来进行抛光,兼顾高效与高质量,表面损伤小,对环境友好,并且可用于复杂曲面的超精密抛光。但是,稳定磁性混合流体的制备较为困难,导致该技术成本较高,难以大规模利用。

激光抛光是一种非接触式抛光,它通过激光束与工件表面的热作用实现表面平坦化,因此,该方法不需要与工件表面相接触、不需要抛光液,能在不造成表面损伤、材料损失以及环境污染的同时,实现工件的纳米级超精密加工。但激光抛光作为一项新技术存在着设备仪器昂贵、工艺过程繁琐、操作精度要求高等问题。

镍及其不同合金之间的性能存在显著差异,因此,所适用的超精密抛光方法也有所区别。例如,镍磷合金应用于制作计算机硬盘时,通常用 CMP 获得超光滑表面<sup>[58,60]</sup>。而当其作为光学仪器的表面镀层时,由于其表面形状,传统的 CMP 方法受限,通常用 MRF 进行抛光<sup>[67-69]</sup>。镍铬钼合金与镍铬铁合金常作为航空航天发动机部件以及核电蒸汽发生器的制备材料,航空航天发动机部件由于其曲面特性,通常用 ECP、LP 进行抛光<sup>[93-94]</sup>。而核电蒸汽发生器是一种大型仪器,利用 CMP、MRF、LP 加工均难以实现对其有效抛光,通常用 ECP 降低其表面粗糙度<sup>[48]</sup>。镍钛合金作为血管支架、腔静脉滤器等医疗植入物,

结构精细,且要求兼顾高表面质量与表面无菌性,ECP 不限制材料的形状,且抛光后表面易于清洁,是目前镍钛合金加工最主要的方法<sup>[38]</sup>;LP 适用于复杂结构的抛光,且不会污染工件表面,未来有望应用于镍钛合金的生产加工<sup>[81]</sup>。

6 镍及其合金超精密抛光技术发展趋势

目前,国内外学者在镍及其合金超精密抛光技术的研究方面已经取得了一定的进展,但仍然存在一系列的问题未能得到解决。镍及其合金由于其优异的性能,不断应用于各种不同的高新技术领域,因此,进一步探究镍及其合金的高效精密加工对国防事业和民生经济的发展尤为重要。为了实现镍及其合金更加高效率、高质量、低损伤的超精密抛光,应从以下几个方面进行深入研究:

1) 完善理论框架与体系,揭示超精密抛光技术的机理。现阶段,镍及其合金超精密抛光方法的机理仍存在较大争议,对抛光去除过程中颗粒分子与镍及其合金表面分子的迁移行为和规律尚未完全明确。针对该问题,应当将计算机模拟与实验分析等多种手段相结合,以材料表面粗糙度  $Ra$ 、材料去除率、力学性能、耐腐蚀性等重要参数为评价指标,探析各因素及其交互作用对镍及其合金抛光效果的影响;深化对材料微观去除机理的理解,剖析工件表面物质与微观结构差异的本征来源,从而揭示不同抛光方法的机理,为进一步优化抛光效果奠定坚实的理论基础。

2) 探索多种能场的协同加工,探究多种抛光技术的耦合使用。针对单一抛光方法通常无法实现高效率、高质量与优异性能的多目标处理,应当探索力、热、电、磁、光和声五大物理能场与化学、机械作用的协同加工,开展镍及其合金的 ECP、CMP、MRF、LP 等超精密抛光技术相结合的创新性研究,发挥不同类型超精密抛光技术的优势并克服自身的局限性,诸如在 ECP 中引入磁场或超声波等进一步改善镍钛



合金的生物相容性与耐腐蚀性、通过复合抛光的形式降低或消除 MRF 产生的中频误差等,助力于实现镍及其合金超精密抛光高效率、高质量与优异性能并存的目标。

3) 考虑镍及其合金实际应用时的复杂结构。血管支架、腔静脉滤器、航天航空发动机等应用场景中,零部件的结构通常具有高度复杂性,而现有的研究通常使用镍及其合金试样进行实验,与实际工艺存在一定的差距,未来应着重考虑镍及其合金在复杂结构情况下的超精密抛光,切实推动镍及其合金产业的发展。

4) 实现抛光过程的低成本与绿色化。目前,虽然 CMP、ECP、MRF、LP 均可以实现纳米级超光滑表面的制备,但是 CMP 与 ECP 抛光液多含强酸、强碱等强腐蚀性化学试剂,会对环境造成极大的负担,而 MRF 与 LP 设备复杂昂贵,因此,在保证高质量、高效率的同时,提高抛光液的循环利用次数,探索制备低成本、环境友好的绿色抛光方法是当务之急。

#### 参考文献:

- [1] 韩栋,张永强,雷文光,等.镍基合金板带加工技术及应用发展现状[J].材料导报,2015,29(5):83-87.  
HAN D, ZHANG Y Q, LEI W G, et al. Development of Manufacturing Technology and Application for Nickel Alloys Sheets and Strips[J]. Materials Review, 2015, 29(5): 83-87.
- [2] WU D B, LIU S B, WANG H. High Surface Integrity Machining of Typical Aviation Difficult-to-Machine Material Blade[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129(7): 2861-2873.
- [3] 冯智.红土镍矿还原焙烧过程中镍铁颗粒聚集长大机制研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.  
FENG Z. Study on Aggregation and Growth Mechanism of Nickel-Iron Particles during Reduction Roasting of Laterite-Nickel Ore[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023.
- [4] 蔡明,朱涛,高兴军,等.镍基高温合金磨削加工技术研究现状[J].辽宁石油化工大学学报,2023,43(3):60-68.  
CAI M, ZHU T, GAO X J, et al. Research Status of Grinding Technology of Nickel-Based Superalloy[J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2023, 43(3): 60-68.
- [5] THAKUR A, GANGOPADHYAY S. State-of-the-Art in Surface Integrity in Machining of Nickel-Based Super Alloys[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 100: 25-54.
- [6] RODENKIRCHEN C, APPLETON M, RYAN M P, et al. A Review on Atom Probe and Correlative Microscopy Studies of Corrosion in Nickel-Based Superalloys[J]. MRS Bulletin, 2022, 47(7): 706-717.
- [7] 唐中杰,郭铁明,付迎,等.镍基高温合金的研究现状与发展前景[J].金属世界,2014(1):36-40.  
TANG Z J, GUO T M, FU Y, et al. Research Present Situation and the Development Prospect of Nickel-Based Superalloy[J]. Metal World, 2014(1): 36-40.
- [8] 祝国梁,孔德成,周文哲,等.选区激光熔化 $\gamma'$ 相强化镍基高温合金裂纹形成机理与抗裂纹设计研究进展[J].金属学报,2023,59(1):16-30.  
ZHU G L, KONG D C, ZHOU W Z, et al. Research Progress on the Crack Formation Mechanism and Cracking-Free Design of  $\gamma'$  Phase Strengthened Nickel-Based Superalloys Fabricated by Selective Laser Melting[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(1): 16-30.
- [9] POLLOCK T M, TIN S. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 361-374.
- [10] 杨瑞成,王晖,郑丽平,等.高性能镍基耐蚀合金的特性与研究动向[J].材料导报,2001,15(11):21-23.  
YANG R C, WANG H, ZHENG L P, et al. Characteristics and Research Trends of High Performance Ni-Base Corrosion Resistant Alloys[J]. Materials Review, 2001, 15(11): 21-23.
- [11] THELLAPUTTA G R, BOSE P S C, RAO C S P. Machinability of Nickel Based Superalloys: A Review[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Materials Processing and Characterization (ICMPC). Amsterdam: Elsevier Science BV, 2017: 3712-3721.
- [12] 王君.镍基高温合金在航空发动机中的应用[J].中国新通信,2019,21(1):221-222.  
WANG J. Application of Nickel-Based Superalloys in Aeroengines[J]. China New Telecommunications, 2019, 21(1): 221-222.
- [13] 尹玉霞,王鲁宁,郝树斌,等.医用镍钛记忆合金在微创介入领域的应用[J].中国医疗设备,2019,34(6):153-156.  
YIN Y X, WANG L N, HAO S B, et al. Biomedical Application of Ni-Ti Alloy in Minimally Invasive Intervention[J]. China Medical Devices, 2019, 34(6): 153-156.
- [14] SAFAVI M S, KHALIL-ALLAFI J, AHADZADEH I, et al. Improved Corrosion Protection of a NiTi Implant by an Electrodeposited HAp-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Composite Layer[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 470: 129822.
- [15] 罗守福,胡文彬.铝合金化学镀镍镀层的性质和工业应用[J].材料保护,1996(9):9-11.  
LUO S F, HU W B. Properties and Industrial Applications of Electroless Nickel Plating on Aluminum Alloy[J].

- Materials Protection, 1996(9): 9-11.
- [16] 王新宇. 核电 690TT 合金划伤表面的腐蚀和应力腐蚀研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.  
WANG X Y. Study on Corrosion and Stress Corrosion of Scratched Surface of Nuclear Power 690TT Alloy[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [17] WANG J J, WEN Z X, ZHANG X H, et al. Effect Mechanism and Equivalent Model of Surface Roughness on Fatigue Behavior of Nickel-Based Single Crystal Superalloy[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 125: 101-111.
- [18] 赵春蓉. 航空发动机制造表面完整性技术在机械加工中的应用研究[J]. 中国机械, 2023(31): 7-11.  
ZHAO C R. Research on the Application of Aeroengine Manufacturing Surface Integrity Technology in Machining[J]. Machine China, 2023(31): 7-11.
- [19] HUMMEL F, LOTZGERICH M, CARDAMONE P, et al. Surface Roughness Effects on Turbine Blade Aerodynamics[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(3): 453.
- [20] 刘汉卿. 镍钛合金心血管支架电化学抛光工艺及表面性能研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2021.  
LIU H Q. Study on Electrochemical Polishing Process and Surface Properties of Nickel-Titanium Alloy Cardiovascular Stent[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2021.
- [21] 邓曰明, 赵玉刚, 刘广新, 等. 基于响应面法的镍钛合金心血管支架管内壁磁粒研磨工艺参数研究[J]. 表面技术, 2021, 50(10): 384-393.  
DENG Y M, ZHAO Y G, LIU G X, et al. Study on Process Parameters of Magnetic Abrasive Finishing of the Inner Wall of Ni-Ti Alloy Cardiovascular Stents Based on Response Surface Methodology[J]. Surface Technology, 2021, 50(10): 384-393.
- [22] TAN B, NIU X, BIAN N, et al. Influence of Abrasive on CMP Quality for NiP Substrate of Computer Hard-Disk[C]// Proceedings of the 9th China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC). Shanghai: ECS Transactions, 2010: 563-568.
- [23] SALLEH S, SUDIN I, AWANG A. Effects of Non-Spherical Colloidal Silica Slurry on Al-NiP Hard Disk Substrate CMP Application[J]. Applied Surface Science, 2016, 360: 59-68.
- [24] 余纪成, 刘威, 鲁佳, 等. 核电设备电解抛光表面处理技术综述[J]. 科技视界, 2019(27): 1-5.  
YU J C, LIU W, LU J, et al. Summary of Electropolishing Surface Treatment Technology for Nuclear Power Equipment[J]. Science & Technology Vision, 2019(27): 1-5.
- [25] ÖSTERLE W, LI P X. Mechanical and Thermal Response of a Nickel-Base Superalloy Upon Grinding with High Removal Rates[J]. Materials Science and Engineering: A, 1997, 238(2): 357-366.
- [26] YAO C F, JIN Q C, HUANG X C, et al. Research on Surface Integrity of Grinding Inconel718[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(5): 1019-1030.
- [27] 丁文锋, 李敏, 李本凯, 等. 难加工金属材料磨削加工表面完整性研究进展[J]. 航空材料学报, 2021, 41(4): 36-56.  
DING W F, LI M, LI B K, et al. Recent Progress on Surface Integrity of Grinding Difficult-to-Cut Metal Materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(4): 36-56.
- [28] 许良, 王林, 陈泓谕, 等. 钨及其合金超精密抛光研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 24-36.  
XU L, WANG L, CHEN H Y, et al. Research Progress in Ultra-Precision Polishing of Tungsten and Its Alloys[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 24-36.
- [29] ZHANG G F, DENG X, LIU D, et al. A Nano-MQL Grinding of Single-Crystal Nickel-Base Superalloy Using a Textured Grinding Wheel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(3): 2787-2801.
- [30] 程钢. 镍基高温合金 GH4169 切削加工机理及相关技术研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2023.  
CHENG G. Study on Cutting Mechanism and Related Technology of Nickel-Based Superalloy GH4169[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2023.
- [31] 沈宇峰, 许爱军. 高速切削技术的研究与发展[J]. 新技术新工艺, 2022(2): 5-9.  
SHEN Y F, XU A J. Research and Development of High Speed Cutting Technology[J]. New Technology & New Process, 2022(2): 5-9.
- [32] SELEZNEV A, PINARGOTE N W S, SMIRNOV A. Ceramic Cutting Materials and Tools Suitable for Machining High-Temperature Nickel-Based Alloys: A Review[J]. Metals, 2021, 11(9): 1385.
- [33] 江亮, 郑佳昕, 彭武茂, 等. 空间基础零部件超精密抛光技术研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(12): 1-19.  
JIANG L, ZHENG J X, PENG W M, et al. Research Progress of Ultra-Precision Polishing Technologies for Basic Components of Spacecraft[J]. Surface Technology, 2022, 51(12): 1-19.
- [34] YANG G, WANG B, TAWFIQ K, et al. Electropolishing of Surfaces: Theory and Applications[J]. Surface Engineering, 2017, 33(2): 149-166.
- [35] BOBAN J, AHMED A, JITHINRAJ E K, et al. Polishing of Additive Manufactured Metallic Components: Retrospect on Existing Methods and Future Prospects[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022,

- 121(1): 83-125.
- [36] HAN W, FANG F Z. Fundamental Aspects and Recent Developments in Electropolishing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 139: 1-23.
- [37] 王毅, 王盼, 索红莉, 等. 哈氏合金电化学抛光工艺的研究[J]. 材料导报, 2017, 31(2): 37-40.  
WANG Y, WANG P, SUO H L, et al. Study on Electropolishing of Hastelloy C-276 Alloy[J]. Materials Review, 2017, 31(2): 37-40.
- [38] 黄朝霞, 柴明霞, 李志永, 等. 电解抛光对镍钛合金生物兼容性的影响[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(9): 549-553.  
HUANG (C /Z)X, CHAI M X, LI Z Y, et al. Effect of Electrolytic Polishing on Biocompatibility of Nickel-Titanium Alloy[J]. Electroplating & Finishing, 2020, 39(9): 549-553.
- [39] WANG Y Q, WEI X T, LI Z Y, et al. Surface Performance and Optimization of Nickel Titanium Alloy Electropolishing Parameters[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2021, 16(7): 210745.
- [40] ZAKI S, GUAN T Y, ZHANG N, et al. Precision Shaping of Nickel Micro-Mould Features *via* Electropolishing: Characterisation of Electrolytes from Strong to Weak Acids[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 113: 261-274.
- [41] ABBOTT A P, BOOTHBY D, CAPPER G, et al. Deep Eutectic Solvents Formed between Choline Chloride and Carboxylic Acids: Versatile Alternatives to Ionic Liquids[J]. Journal of the American Chemical Society, 2004, 126(29): 9142-9147.
- [42] LEBEDEVA O, KULTIN D, ZAKHAROV A, et al. Advantages of Electrochemical Polishing of Metals and Alloys in Ionic Liquids[J]. Metals, 2021, 11(6): 959.
- [43] GODDARD A J, HARRIS R C, SALEEM S, et al. Electropolishing and Electrolytic Etching of Ni-Based HIP Consolidated Aerospace Forms: A Comparison between Deep Eutectic Solvents and Aqueous Electrolytes[J]. Transactions of the IMF, 2017, 95(3): 137-146.
- [44] LOFTIS J D, ABDEL-FATTAH T M. Nanoscale Electropolishing of High-Purity Nickel with an Ionic Liquid[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2019, 26(5): 649-656.
- [45] LIU Y F, WANG L S, LV Z G, et al. Studies on Corrosion Behavior of Polished Nickel Surface with Resin Wetted by Deep Eutectic Solvent[J]. Surface Review and Letters, 2023, 30(5): 2350032.
- [46] WANG G J, LIU Z Q, NIU J T, et al. Effect of Electrochemical Polishing on Surface Quality of Nickel-Titanium Shape Memory Alloy after Milling[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(1): 253-262.
- [47] 彭静, 徐小宁, 刘立斌. 钛镍合金丝材电解抛光工艺的研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(6): 179-183.
- PENG J, XU X N, LIU L B. Research on Electrolytic Polishing Technology of Titanium Nickel Alloy Wire[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(6): 179-183.
- [48] 王楠, 曾宪钧. 核电设备用镍基合金材料电解抛光工艺研究[J]. 科技风, 2017(11): 177.  
WANG N, ZENG X J. Study on Electrolytic Polishing Process of Nickel-Based Alloy Materials for Nuclear Power Equipment[J]. Technology Wind, 2017(11): 177.
- [49] 张森, 何代华, 刘新宽, 等. 医用镍钛合金的电解抛光进展[J]. 有色金属材料与工程, 2017, 38(5): 302-308.  
ZHANG M, HE D H, LIU X K, et al. The Progress of NiTi Alloys for Electro-Polishing[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2017, 38(5): 302-308.
- [50] 郜培丽, 张振宇, 王冬, 等. 绿色环保化学机械抛光液的研究进展[J]. 物理学报, 2021, 70(6): 59-73.  
GAO P L, ZHANG Z Y, WANG D, et al. Research Progress of Green Chemical Mechanical Polishing Slurry[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(6): 59-73.
- [51] LI W, MA T D, TAN B M, et al. The Effect of Structural Properties of Benzo Derivative on the Inhibition Performance for Copper Corrosion in Alkaline Medium: Experimental and Theoretical Investigations[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 649: 129531.
- [52] 陈倚, 张偲森, 屈蔚然, 等. 新型钢抛光液中磨料的种类及其性能研究进展[J]. 表面技术, 2024, 53(3): 88-100.  
CHEN Y, ZHANG S M, QU W R, et al. Advances in Research into Abrasive Materials and Their Properties in the New Steel Polishing Solution[J]. Surface Technology, 2024, 53(3): 88-100.
- [53] WANG W L, XU Q F, LIU W L, et al. Effect of Particle Size Distribution, pH, and  $\text{Na}^+$  Concentration on the Chemical Mechanical Polishing of Sapphire and 4H-SiC (0001)[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2022, 11(4): 044004.
- [54] 韦岚清. 3D 打印镍基合金 GH3536 化学机械抛光工艺及机理研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2022.  
WEI L Q. Research on Chemical Mechanical Polishing Process and Mechanism of Additive Manufacturing Nickel-Based Alloy GH3536[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2022.
- [55] 雷红, 褚于良, 屠锡富, 等. 超细氧化铝抛光液的制备及其抛光特性研究[J]. 功能材料, 2005, 36(9): 1425-1428.  
LEI H, CHU Y L, TU X F, et al. Preparation of Ultra-Fined  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Slurry and Its Polishing Properties on Disk CMP[J]. Journal of Functional Materials, 2005, 36(9): 1425-1428.

- 1425-1428.
- [56] LEI H, CHU F L, XIAO B Q, et al. Preparation of Silica/Ceria Nano Composite Abrasive and Its CMP Behavior on Hard Disk Substrate[J]. *Microelectronic Engineering*, 2010, 87(9): 1747-1750.
- [57] HUANG L Q, WANG Z J, LEI H, et al. Preparation of Porous Alumina-G-Polystyrene Sulfonic Acid Abrasive and Its Chemical Mechanical Polishing Behavior on Hard Disk Substrate[J]. *Microelectronic Engineering*, 2014, 116: 11-16.
- [58] LEI H, JIANG L, CHEN R L. Preparation of Copper-Incorporated Mesoporous Alumina Abrasive and Its CMP Behavior on Hard Disk Substrate[J]. *Powder Technology*, 2012, 219: 99-104.
- [59] KIM N H, CHOI G W, SEO Y J, et al. Effects of Various Oxidizers on Chemical Mechanical Polishing Performance of Nickel for Microelectromechanical System Applications[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2006, 24(4): 1297-1301.
- [60] MU Y, ZHONG M J, RUSHING K J, et al. Benzotriazole as a Passivating Agent during Chemical Mechanical Planarization of Ni-P Alloy Substrates[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 315: 190-195.
- [61] ZHANG Z Y, LIAO L X, WANG X Z, et al. Development of a Novel Chemical Mechanical Polishing Slurry and Its Polishing Mechanisms on a Nickel Alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 506: 144670.
- [62] LI H D, ZHANG Z Y, SHI C J, et al. Novel Green Chemical Mechanical Polishing by Controlling pH Values and Redox Reaction for Achieving Atomic Surface of a Nickel Alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2024, 657: 159787.
- [63] MENG F N, ZHANG Z Y, GAO P L, et al. Design of Composite Abrasives and Substrate Materials for Chemical Mechanical Polishing Applications[J]. *Applied Nanoscience*, 2020, 10(5): 1379-1393.
- [64] KUM C W, SATO T, WAN S. Surface Roughness as a Function of Work done by Tangential Force in Magnetorheological Finishing[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 565: 249-254.
- [65] 袁巨龙, 吴喆, 吕冰海, 等. 非球面超精密抛光技术研究现状[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(23): 167-177.
- YUAN J L, WU Z, LYU B H, et al. Review on Ultra-Precision Polishing Technology of Aspheric Surface[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(23): 167-177.
- [66] WANG Y L, WU Y B, NOMURA M. Fundamental Investigation on Nano-Precision Surface Finishing of Electroless Ni-P-Plated STAVAX Steel Using Magnetic Compound Fluid Slurry[J]. *Precision Engineering*, 2017, 48: 32-44.
- [67] GUO H R, WU Y B, LU D, et al. Ultrafine Polishing of Electroless Nickel-Phosphorus-Plated Mold with Magnetic Compound Fluid Slurry[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, 29(11/12): 1502-1509.
- [68] NGUYEN D, WU J Z, QUANG N M, et al. Applying Fuzzy Grey Relationship Analysis and Taguchi Method in Polishing Surfaces of Magnetic Materials by Using Magnetorheological Fluid[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112(5): 1675-1689.
- [69] 艾博, 薛常喜, 张斌智, 等. 镍磷合金镀层表面磁流变抛光效率实验[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(5): 78-82.
- AI B, XUE C X, ZHANG B Z, et al. Experiment on Magnetorheological Finishing Efficiency of Ni-P Alloy Coating[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 43(5): 78-82.
- [70] HU H, XU C, LAI T, et al. Sub-Nanometer Accuracy Combination Processing Technology for Nickel-Phosphorus Modified Surfaces Based on Aluminum Reflector Mirror[J]. *Micromachines*, 2022, 13(4): 560.
- [71] KANG J G, JEONG S K, JEON M, et al. Magnetorheological Finishing of Electroless Nickel-Phosphorus-Plated Mold for Ultraprecision Injection Molding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 131(3): 1705-1716.
- [72] 潘飞, 王建彬, 徐慧敏, 等. 氮化铝陶瓷的超精密加工研究现状与发展趋势[J]. *陶瓷学报*, 2023, 44(2): 208-216.
- PAN F, WANG J B, XU H M, et al. Research Status and Development Trend of Ultra Precision Machining of Aluminum Nitride Ceramics[J]. *Journal of Ceramics*, 2023, 44(2): 208-216.
- [73] LI J J, ZUO D W. Laser Polishing of Additive Manufactured Ti6Al4V Alloy: A Review[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(2): 16.
- [74] MANCO E, COZZOLINO E, ASTARITA A. Laser Polishing of Additively Manufactured Metal Parts: A Review[J]. *Surface Engineering*, 2022, 38(3): 217-233.
- [75] 姚建华, 黄锦榜, 王光浩, 等. 线切割高粗糙度表面的脉冲激光抛光机制研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(14): 32-41.
- YAO J H, HUANG J B, WANG G H, et al. Pulsed Laser Polishing Mechanism on High Roughness Surface Cut by Wire Electrical Discharge Machining[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 32-41.
- [76] 刘二举, 徐杰, 陈曦, 等. 激光抛光技术研究进展与发展趋势[J]. *中国激光*, 2023, 50(16): 100-118.
- LIU E J, XU J, CHEN X, et al. Advancements and



- Developments of Laser Polishing Technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(16): 100-118.
- [77] TIAN Y T, GORA W S, CABO A P, et al. Material Interactions in Laser Polishing Powder Bed Additive Manufactured Ti6Al4V Components[J]. Additive Manufacturing, 2018, 20: 11-22.
- [78] ZHAO Y H, DU C B, WANG P F, et al. The Mechanism of In-Situ Laser Polishing and Its Effect on the Surface Quality of Nickel-Based Alloy Fabricated by Selective Laser Melting[J]. Metals, 2022, 12(5): 778.
- [79] JANG P R, KIM C G, KIM J H, et al. Dynamic Simulation Analysis for Laser Micro-Polishing Process of Metallic Surface Using UV Nanosecond Pulse Laser[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021, 43(12): 526.
- [80] KUMSTEL J, KIRSCH B. Polishing Titanium- and Nickel-Based Alloys Using Cw-Laser Radiation[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 362-371.
- [81] CHERNYSHIKHIN S V, PANOVA D V, VAN TUAN T, et al. Laser Polishing of Nickel-Titanium Shape Memory Alloy Produced *via* Laser Powder Bed Fusion[J]. Metals and Materials International, 2023, 29(10): 3024-3038.
- [82] LIU Y F, SUN S Y, WANG J L, et al. Tribological Behaviors of LDED Inconel 718 Samples Polished with a Hybrid Laser Polishing Technique[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 633-646.
- [83] ĆWIKŁA M, DZIEDZIC R, REINER J. Influence of Overlap on Surface Quality in the Laser Polishing of 3D Printed Inconel 718 under the Effect of Air and Argon[J]. Materials, 2021, 14(6): 1479.
- [84] ARRIZUBIETA J I, CORTINA M, RUIZ J E, et al. Combination of Laser Material Deposition and Laser Surface Processes for the Holistic Manufacture of Inconel 718 Components[J]. Materials, 2018, 11(7): 1247.
- [85] MÖHL A, KALDUN S, KUNZ C, et al. Tailored Focal Beam Shaping and Its Application in Laser Material Processing[J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31(4): 042019.
- [86] CAMPANELLI S L, ANGELASTRO A, POSA P, et al. Fiber Laser Surface Remelting of a Nickel-Based Superalloy by an Integrated Rectangular Laser Spot[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 111: 42-49.
- [87] YI C N, CHEN X X, ZHOU Y H, et al. Effects of Scanning Speed and Scanning Times on Surface Quality of Line Spot Laser Polishing of Nickel-Based Superalloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 2179-2190.
- [88] 陈博文, 孙树峰, 王茜, 等. 材料表面激光抛光技术研究进展[J]. 中国表面工程, 2021, 34(6): 74-89.
- CHEN B W, SUN S F, WANG X, et al. Research Progress of Laser Polishing Technology for Material Surface[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(6): 74-89.
- [89] 戴伟, 郑志镇, 李建军, 等. 金属材料表面的激光抛光研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 7-20.
- DAI W, ZHENG Z Z, LI J J, et al. Research Progress of Laser Polishing on the Metal Surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 7-20.
- [90] 胡扬轩, 邓朝晖, 万林林, 等. 用于蓝宝石材料加工的新型超精密抛光技术及复合抛光技术研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(9): 1452-1458.
- HU Y X, DENG Z H, WAN L L, et al. Research Progress of the Novel Ultra-Precision Polishing Techniques and Composite Polishing Techniques for Sapphire Material Processing[J]. Materials Review, 2018, 32(9): 1452-1458.
- [91] ZHONG X Y, HOU X, YANG J S. Super-Smooth Processing X-Ray Telescope Application Research Based on the Magnetorheological Finishing (MRF) Technology[C]// Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XI. San Diego, California, USA: SPIE, 2016: 368.
- [92] PERRY T L, WERSCHMOELLER D, DUFFIE N A, et al. Examination of Selective Pulsed Laser Micropolishing on Microfabricated Nickel Samples Using Spatial Frequency Analysis[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, 131(2): 021002.
- [93] ABBOTT A P, DSOUZA N, WITHEY P, et al. Electrolytic Processing of Superalloy Aerospace Castings Using Choline Chloride-Based Ionic Liquids[J]. Transactions of the IMF, 2012, 90(1): 9-14.
- [94] LIU Y F, OUYANG W T, WU H C, et al. Improving Surface Quality and Superficial Microstructure of LDED Inconel 718 Superalloy Processed by Hybrid Laser Polishing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 300: 117428.