

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2020.01.006

电解复合磁力研磨GH4169管内表面的光整研究

谭悦¹, 陈燕^{2*}

(1. 贵州航天天马机电科技有限公司, 贵州 遵义 563000;
2. 辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 为解决GH4169合金管内表面质量问题,降低其表面粗糙度,本文采用电解复合磁力研磨光整加工方法进行了试验,研究了在电解复合磁力研磨条件下,磁粒粒径、电解液温度、电解电压对管内壁表面质量的影响,寻求了最优的工艺参数组合。结果表明,在磁粒粒径为185 μm ,电解液温度为35 $^{\circ}\text{C}$,电解电压为9 V的条件下,采用电解复合磁力研磨法对GH4169合金管内表面加工25 min,管内表面粗糙度Ra可由原始的1.8 μm 降至0.11 μm 。表面缺陷得到有效去除,表面质量得到了明显的改善。管内表面残余应力由+92 MPa转变为-68 MPa,获得了更好的应力状态,提高了表面抗疲劳强度。

关键词: 镍基合金;电解复合磁力研磨;表面粗糙度;残余应力;钝化

中图分类号: TG688

文献标识码: A

Surface Finishing of GH4169 Tube by Electrolytic Composite Magnetic Grinding

TAN Yue¹, CHEN Yan^{2*}

(1. Guizhou Aerospace Tianma Mechanical and Electrical Technology Co. Ltd., Zunyi 563000, China;
2. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: In this paper, in order to improve the surface quality and reduce the surface roughness of GH4169 alloy tube, the electrolytic composite magnetic abrasive finishing method was carried out in the experiment. The effects of magnetic particle size, electrolyte temperature and electrolyte voltage on the inner surface quality of tube under electrolytic composite magnetic abrasion were studied and the optimum combination of process parameters was sought. The results show that the surface roughness of GH4169 alloy tube is reduced from 1.8 μm to 0.11 μm after electrolytic composite magnetic grinding for 25 min under the following conditions: magnetic particle size of 185 μm , electrolyte temperature of 35 $^{\circ}\text{C}$ and electrolytic voltage of 9 V. The surface defects were effectively removed and the surface quality was obviously improved. The residual stress on the inner surface of the tube is changed from +92 MPa to -68 MPa, a better stress state is obtained and the surface fatigue strength is increased.

Keywords: nickel-based alloy; electrolytic composite magnetic grinding; surface roughness; residual

收稿日期: 2019-06-09

修回日期: 2019-07-06

通信作者: 陈燕, email: 1336852522@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775258)

stress; passivation

镍基合金在高温下不仅具有良好的高温氧化性、抗腐蚀能力等优异的性能,而且还具有高温强度、蠕变强度和持久强度^[1]。基于其优异的性能,镍基合金管广泛被各个重要领域用于运输具有高温或腐蚀效应的气体或液体,如航空发动机的空间弯管、核工业中的封严环等^[2]。根据对以往镍基合金管零部件的寿命受损分析,发现多数该类零件受损源均来自于零部件表面,其主要原因是因为零件表面存在着突刺或者尖点,导致液体流过管路时在尖点或突刺处产生积炭效应^[3],形成腐蚀凹坑;使得液体或气体流过时因压力和流速不均匀产生喘振现象^[4]。因此科研工作人员针对如何改善镍基合金管内表面质量这一难题做出了大量研究,黄新春等采用砂轮对镍基合金表面进行加工,但这种方法受砂轮硬度局限性大,加工时合金表面易出现微裂纹、灼伤等缺陷^[5]。韩冰等^[6]人提出在管内部增添辅助磁极,提高研磨压力从而增大对合金表面尖点、突刺的刻划力度,但这种方式研磨轨迹比较单一,易产生较深划痕;白阿香等^[7]人采用对合金表面采取钝化和涂覆膜的形式增强表面抗腐蚀性能,但表面质量仍未得到改善^[7]。

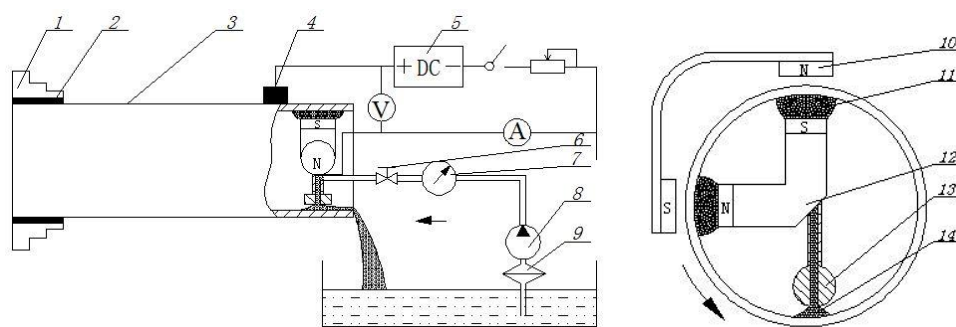
本文针对如何在不影响镍基合金表面成份的基础上,去除表面缺陷,改善表面质量,增强表面抗疲劳强度这一研究难题,提出了一种针对镍基合金管内表面的电解复合磁力加工方法。通过对磁粒

粒径、电解液温度、电解电压三个影响因素对镍基合金表面加工影响的研究,得出了镍基合金管的最优工艺参数,从而使得在较短时间内获得更优的表面质量。这种加工方法先通过电解溶解作用将工件表面的毛刺、尖点溶解并在工件表面生成一层较软的钝化膜,然后磁粒在磁极的带动下对钝化膜进行去除。整个加工流程为电化学溶解→钝化膜生成→磁力研磨的循环作用,从而实现镍基合金内表面光整加工^[4]。

1 电解-磁力加工机理

1.1 研磨装置

图1为研磨装置示意图,图2为研磨装置实物图。镍基合金管与电源正极相连作为电解阳极,铜棒与电源负极相连作为电解阴极,电源、镍基合金管、电解液、铜棒形成电解回路。在镍基合金管内放置V型辅助磁极,与外部磁极形成磁回路,增大磁感应强度;将电解液抽到铜棒与镍基合金管之间,通电后镍基合金管内表面发生电解反应,产生一层致密的钝化膜。将磁粒吸附到V型磁极两极沿着磁力线方向排列形成磁力刷,压附在管内表面。通过车床带动镍基合金管高速旋转以及外部磁极与辅助磁极同时往复进给,磁力刷对钝化膜进行刻划去除,从而实现对镍基合金管内表面进行光整。



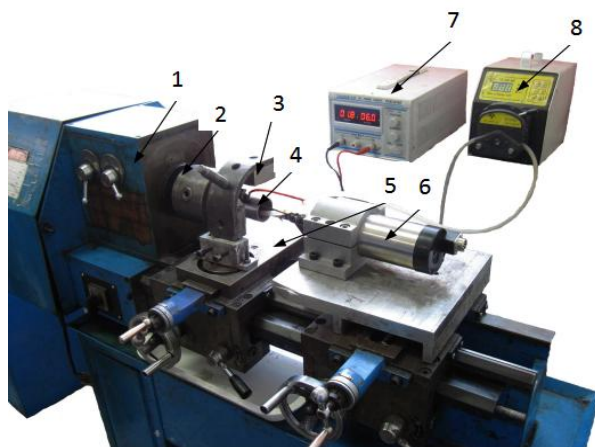
1-卡盘; 2-绝缘片; 3-镍基合金管; 4-碳刷; 5-电源; 6-控制阀; 7-流量计; 8-泵;
9-过滤装置; 10-外部磁极; 11-磁粒; 12-内部磁极; 13-铜棒; 14-电解液

图1 电解磁力复合研磨镍基合金管内表面的加工示意图

1.2 试验条件

镍基合金的材质为GH4169,其外径46 mm,内

径38 mm,长85 mm。工艺条件:铜棒与内表面间隙为1 mm,进给速率2.5 mm/s,主轴转速1200 r/min,



1-车床; 2-卡盘; 3-外部磁极; 4-镍基合金; 5-台体; 6-驱动电机; 7-电源; 8-泵

图2 电解磁力复合研磨镍基合金管内表面试验装置实物图

磁极为永磁极, V型磁极加工间隙为2 mm, 电解液为浓度16%的 NaNO_3 溶液, 电解液流速2 L/min。磁粒是铁粉与氧化铝烧结后破碎、筛分而得, 磁粒中起吸附作用的为Fe, 起研磨作用的为氧化铝; 本文选取磁粒粒径为150 μm 、185 μm 和250 μm 。研磨液为劳力恩SR-9912水溶性研磨液^[8]。

2 试验因素影响分析

2.1 磁粒粒径对表面粗糙度的影响

采用1.2节的工艺条件, 设定电解电压为9 V, 电解液温度为35 $^{\circ}\text{C}$, 用粒径为150 μm 、185 μm 和250 μm 的磁粒对GH4169管内表面进行加工, 结果如图3所示。由图3可知, 随着加工时间的延长, 表面粗糙度越来越低, 表面质量越来越好; 在加工的前15 min内, 采用粒径为185 μm 的磁粒研磨后表面粗糙度最低, 粒径为150 μm 的磁粒研磨好表面粗糙度最大; 这是因为采用150 μm 粒径的磁粒时, 磁力减弱, 研磨压力减小, 单个粒子的吃刀量减少^[4], 采用185 μm 粒径的磁粒时, 磁力增强, 研磨压力增大, 单个粒子的吃刀量增加, 表面粗糙度降低; 当粒径增大到250 μm 时, 粒径内Fe粉含量的再次增大导致磁粒的导磁力越来越大, 单位时间内磁粒与镍基合金管内表面的接触压力越来越大, 磁粒对镍基合金管内表面的划痕也加深, 表面粗糙度不降反升, 同时也会加快磁粒的磨损, 影响工作效率; 当加工到15 min后, 采用250 μm 研磨的表面粗糙度数值甚至超过150 μm 研磨的表面粗糙度数值。综

合考虑, 选用粒径为185 μm 的磁粒。

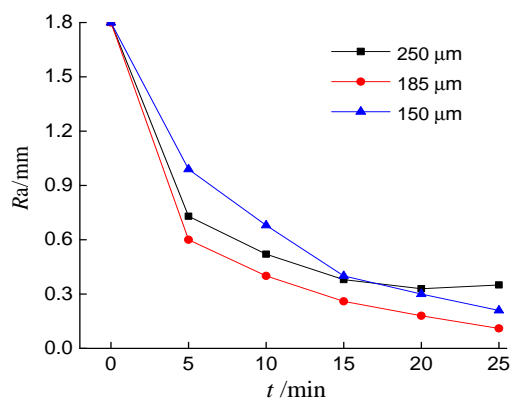


图3 不同粒径对表面粗糙度的影响

2.2 电解电压对表面粗糙度的影响

采用1.2节的工艺条件, 设定磁粒粒径为185 μm , 电解液温度为35 $^{\circ}\text{C}$, 探究电解电压在6 V、9 V和12 V的情况下对GH4169管内表面加工的影响, 结果如图4所示。由图4可知, GH4169管内表面表面粗糙度随着电解电压的升高而逐渐降低, 表面质量得到了明显改善。且前5 min的表面粗糙度下降速率快, 研磨效率高。当电解电压达到9 V时, 表面粗糙度 R_a 由1.8 μm 降至0.11 μm 。当继续增大电解电压至12 V时, 表面粗糙度并没有明显的变化, 这是因为电解电压继续增大, 在获得较好的表面质量的同时, 由于电解电压过高而引起火花放电导致粗糙度恶化, 使得表面粗糙度相较于9 V时没有较大变化, 且对表面去除造成了材料浪费, 因此, 选取9 V为适宜的电解电压。

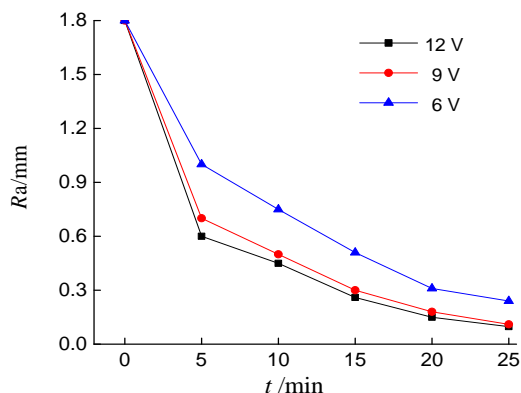


图4 不同电解电压对表面粗糙度的影响

2.3 电解液温度对表面粗糙度的影响

采用1.2节的工艺条件,设定磁粒粒径为185 μm ,电解电压为9 V,探究电解液温度在30 $^{\circ}\text{C}$ 、35 $^{\circ}\text{C}$ 和40 $^{\circ}\text{C}$ 情况下对GH4169管内表面加工的影响,结果如图5所示。采用电解液温度为30 $^{\circ}\text{C}$ 进行加工,表面粗糙度 R_a 只从1.8 μm 降至0.31 μm ,原因是电解液温度太低,电解液活化性能差,工件表面钝化严重,在工件表面形成了一层磁粒研磨难以去除的致密黑膜^[9];当电解液温度为35 $^{\circ}\text{C}$ 时,表面粗糙度 R_a 由1.8 μm 降至0.11 μm 。当电解液温度为40 $^{\circ}\text{C}$ 时,表面粗糙度不降反升,原因是过高的温度导致电解阳极过度腐蚀造成表面缺陷,还会因不能产生钝化膜,磁粒研磨磨削剧烈,导致表面灼伤。因此,选择35 $^{\circ}\text{C}$ 为电解液的最佳温度。

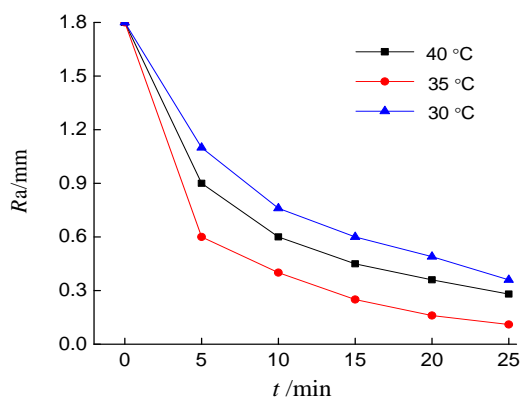


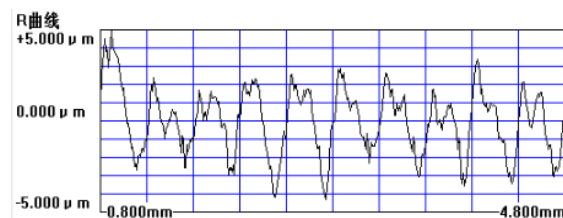
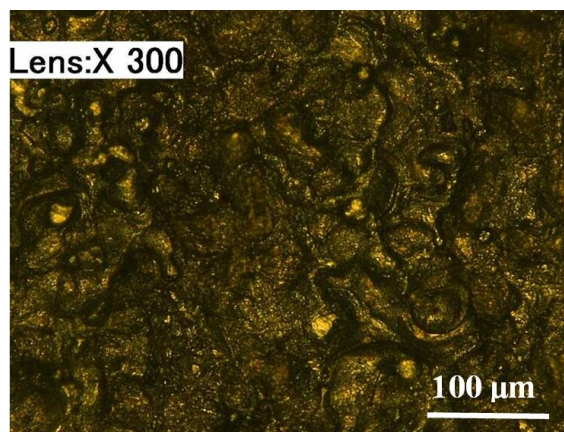
图5 不同电解液温度对表面粗糙度的影响

综上所述,选择185 μm 粒径的磁粒,9 V电解电压,35 $^{\circ}\text{C}$ 电解液温度,进给速率2.5 mm/s,主轴转速1200 r/min,电解液流速2 L/min为最优参数对镍基合金管内表面进行加工。

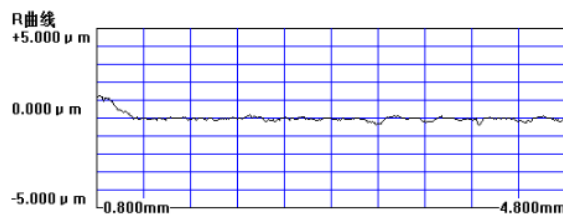
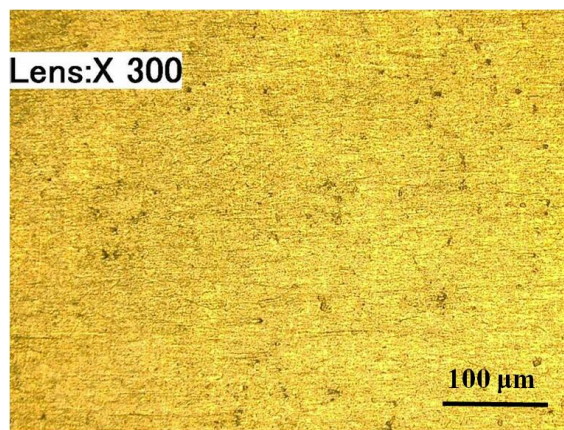
3 结果分析

3.1 电解复合磁力研磨前后的表面形貌

图6为加工前后镍基合金管内表面微观形貌和表面粗糙度对比图。



(a) 加工前



(b) 加工后

图6 电解复合磁力研磨前后工件表面金相微观形貌和表面粗糙度

从图6(a)中可以看出,原始管内表面残留有大量的凸起和凹坑,表面质量差^[10-11]。通过表面粗糙度测量仪测量得粗糙度 R_a 为 $1.8\text{ }\mu\text{m}$ 。采用电解复合磁力研磨对镍基合金管内表面进行加工后,管内表面变得平整、光滑,如图6(b)所示;通过表面粗糙度测量仪测量得粗糙度 R_a 为 $0.11\text{ }\mu\text{m}$,表面质量得到明显改善。

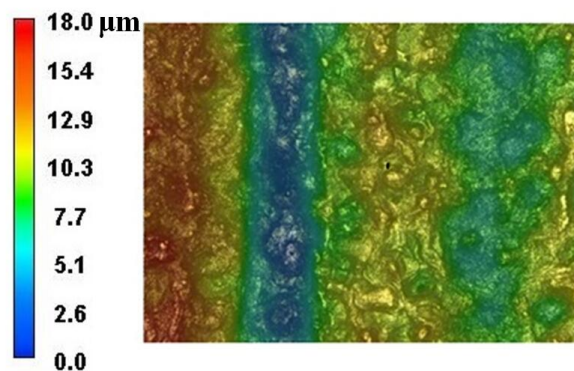
用电子显微镜对其加工前后三维形貌进行观测,结果如图7所示。从图7(a)的观测结果颜色条及表面可以了解到,加工前,工件表面存在大量凹坑、凸起以及两大长条状沟壑,最大落差差为 $18\text{ }\mu\text{m}$,说明原始表面质量差,存在严重缺陷。从图7(b)可知,经过电解磁力加工后,表面缺陷被去除,表面变得光滑、平整,最大落差差仅为 $2.6\text{ }\mu\text{m}$,说明电解磁力加工效果好,表面质量极佳。

3.2 电解复合磁力研磨对表面残余应力的影响

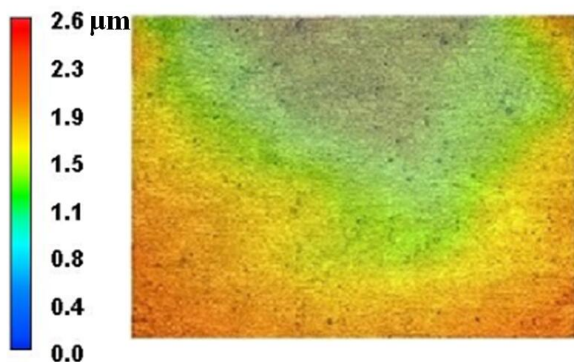
通过X射线残余应力分析仪对GH4169管内表面残余应力进行检测,原始表面残余应力检测拟合曲线如图8(a)所示,原始表面残余应力为拉应力;残余应力计算结果如图8(b)所示,镍基合金管内表面原始残余应力为 $+92\text{ MPa}$,通过电解复合磁力研磨后,表面残余应力得到了明显改善,残余应力为 -68 MPa ,有效提高了镍基合金管内表面的抗疲劳强度^[12]。

3.3 电解复合磁力研磨对表面成份的影响

通过X-MAX50能谱分析仪对GH4169管内表面成份进行检测分析,分析结果如图9所示。相较于原始表面来说,复合加工后的表面成份几乎没有



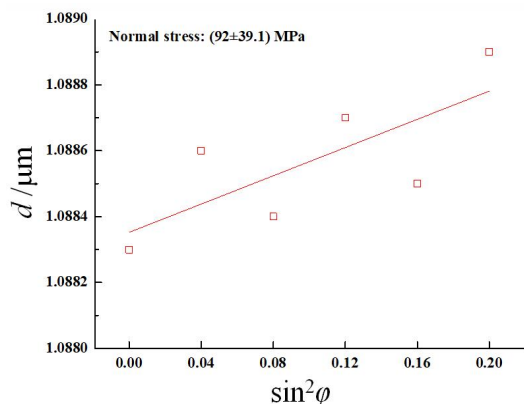
(a) 加工前



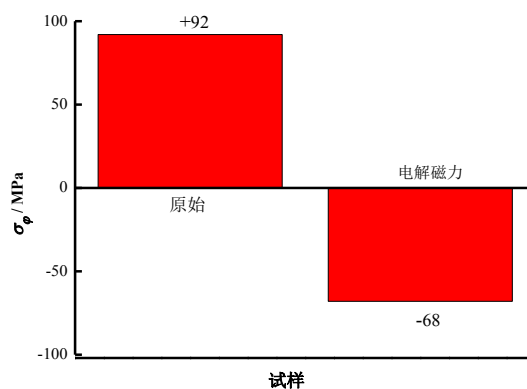
(b) 加工后

图7 电解复合磁力研磨前后工件表面三维形貌

发生改变。这主要是由于电解钝化形成的钝化膜在经过磁粒的刻划、研磨后被完全的去除,加工后检测的表面为裸露的CH4169光滑表面,由此可见,复合加工对于GH4169表面成份没有太大影响。



(a) 原始表面残余应力拟合曲线



(b) 计算结果

图8 加工前后残余应力变化

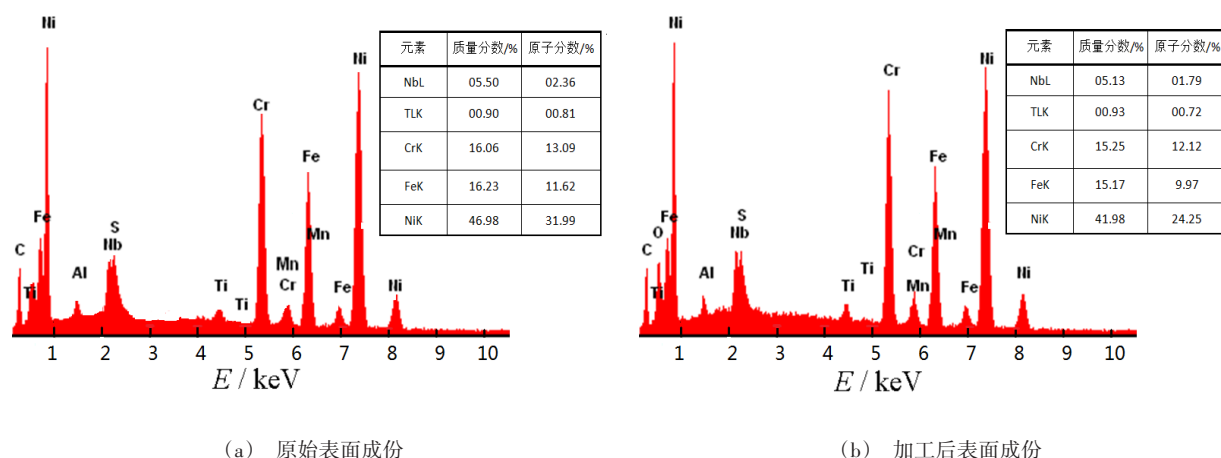


图9 EDS分析结果

4 结论

(1)在磁粒粒径为 $185\ \mu\text{m}$, 电解电压为 $9\ \text{V}$, 电解液温度为 $35\ ^\circ\text{C}$, 进给速率为 $2.5\ \text{mm/s}$, 主轴转速为 $1200\ \text{r/min}$, 电解液流速为 $2\ \text{L/min}$ 的条件下对镍基合金管内表面进行加工, 镍基合金内表面表面粗糙度 R_a 可由 $1.8\ \mu\text{m}$ 降至 $0.11\ \mu\text{m}$ 。表面质量可得到明显改善。

(2)电解复合磁力研磨镍基合金管内表面, 使得内表面应力从 $+92\ \text{MPa}$ 变为 $-68\ \text{MPa}$, 有效提高了镍基合金内表面的抗疲劳强度, 且对表面成份无太大影响。

参考文献

- [1] 陈燕, 曾加恒, 胡玉刚, 等. 超声复合磁力研磨加工镍基合金 GH4169 异形管[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 118-124.
- [2] Liu G, He N, Li L, et al. Cutting forces during the high speed machining of inconel 718[J]. Key Engineering Materials, 2004, 259-260: 824-828.
- [3] 廖明, 韩冰, 陈燕, 等. 钛合金管内表面的电化学磁力研磨复合光整试验[J]. 中国表面工程, 2016, 29(3): 123-131.
- [4] 谭悦, 陈燕, 曾加恒, 等. 电解-磁力复合研磨对 TA18 内表面光整加工[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(5): 248-252.
- [5] 黄新春, 张定华, 姚倡锋, 等. 镍基高温合金 GH4169 削参数对表面完整性影响[J]. 航空动力学报, 2013, 28(3): 621-628.
- [6] 韩冰, 邓超, 陈燕. 球形磁极在弯管内表面磁力研磨中的应用[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(6): 565-570.
- [7] 白阿香, 魏刚, 乔宁. 表面处理对镍基合金加热管腐蚀行为影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2012, 24(3): 228-231.
- [8] 谭悦, 于克强, 陈燕, 等. 电解-磁力复合研磨镍基高温合金实验研究[J]. 电镀与精饰, 2017, 39(12): 1-4.
- [9] 许召宽, 韩冰, 陈燕, 等. 基于电解-磁力复合研磨法的表面光整加工[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(12): 7-10.
- [10] 吴昊, 张桂香, 赵文聪. 磁力研磨对 440C 不锈钢表面形貌的影响[J]. 电镀与精饰, 2015, 37(3): 16-19.
- [11] 孙超, 张国军, 尹佳超. GH4169 镍基高温合金砂带磨削表面完整性分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2016, 36(1): 74-78.
- [12] 罗玉梅, 任凤章, 张伟, 等. X 射线法测量多晶体材料残余应力[J]. 材料导报, 2014, 28(6): 112-114.