

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2019.12.004

## 超声磁粒研磨 Al 6061 管内表面光整试验研究

刘冬冬, 韩冰\*, 陈燕, 李逵, 朱子俊

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

**摘要:** 以提高铝合金管内表面光洁度和加工效率为指标。在传统磁粒研磨的基础上添加辅助磁极和超声波复合的磁粒研磨装置, 研究辅助磁极开槽与未开槽磁极及不同振子频率下的光整加工对管内表面的影响。在超声复合开槽磁极的装置中, 选取 17 kHz、20 kHz 和 23 kHz 三种不同的振子频率进行实验研究, 在振子频率为 17 kHz、23 kHz 时, 研磨 60 min, 铝合金管内表面粗糙度值由原来 0.60  $\mu\text{m}$  降至 0.17  $\mu\text{m}$ 、0.20  $\mu\text{m}$ , 振子频率为 20 kHz 时, 研磨 60 min, 铝合金管内表面粗糙度值由原来 0.60  $\mu\text{m}$  降至 0.08  $\mu\text{m}$ 。在振子频率为 20 kHz 下, 未开槽辅助磁极研磨光整 60 min 后, 铝合金管内表面的粗糙度值由原来 0.60  $\mu\text{m}$  降至 0.13  $\mu\text{m}$ , 开槽辅助磁极研磨光整 60 min, 铝合金管内表面的粗糙度值由原来 0.60  $\mu\text{m}$  降至 0.08  $\mu\text{m}$ 。在振子频率为 20 kHz 和开槽磁极最佳条件下, 超声磁粒研磨铝合金管内表面粗糙度值能达到最低为 0.08  $\mu\text{m}$ , 且开槽磁极的磁场梯度相对未开槽磁极较大且有效研磨区域增大一倍, 这使磨料粒子在研磨过程中更新的较为迅速, 磨料利用率和研磨效率得到提高, 研磨后表面纹理得到全部去除, 表面均匀性达到最好。

**关键词:** 铝合金管; 振子频率; 辅助磁极; 磁场梯度; 表面粗糙度

中图分类号: TG147

文献标识码: A

## Research on Application of Magnetic Abrasive Particle Aided Magnetic Needles Grinding

LIU Dongdong, HAN Bing\*, CHEN Yan, LI Kui, ZHU Zijun

(School of Mechanical Engineering &amp; Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

**Abstract:** In order to improve the surface finish and processing efficiency of aluminium alloy tubes, on the basis of traditional magnetic particle grinding, an auxiliary magnetic pole and ultrasonic composite magnetic particle grinding device were added to study the effect of auxiliary magnetic pole grooving and non-grooved magnetic pole and polishing at different oscillator frequencies on the inner surface of the tube. Three different oscillator frequencies, 17 kHz, 20 kHz and 23 kHz, were selected for experimental study in the ultrasonic composite slotted pole device. When the oscillator frequencies were 17 kHz and 23 kHz, the grinding time was 60 min, the surface roughness of aluminium alloy tube decreased from 0.60  $\mu\text{m}$  to 0.17  $\mu\text{m}$  and 0.20  $\mu\text{m}$ . When the oscillator frequencies were 20 kHz, the grinding time

收稿日期: 2019-03-19

修回日期: 2019-04-18

通信作者: 韩冰, email: hanb75@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51105187)

was 60 min, the surface roughness of aluminium alloy tube decreased from  $0.60\text{ }\mu\text{m}$  to  $0.08\text{ }\mu\text{m}$ . At the oscillator frequency of 20 kHz, the surface roughness of aluminium alloy tube decreased from  $0.60\text{ }\mu\text{m}$  to  $0.13\text{ }\mu\text{m}$  after 60 min polishing with uncut auxiliary magnetic pole, and the surface roughness of aluminium alloy tube decreased from  $0.60\text{ }\mu\text{m}$  to  $0.08\text{ }\mu\text{m}$  after 60 min polishing with slotted auxiliary magnetic pole. Under the optimum conditions of oscillator frequency of 20 kHz and slotted pole, the surface roughness of aluminium alloy tube can reach the lowest value of  $0.08\text{ }\mu\text{m}$ , and the magnetic field gradient of slotted pole was bigger than that of non-slotted pole and the effective grinding area was doubled, which made the abrasive particles renew rapidly in the grinding process, the utilization rate of abrasive and grinding efficiency were improved, and the surface after grinding was improved. The texture was removed completely and the surface uniformity was the best.

**Keywords:** aluminum alloy tube; oscillator frequency; auxiliary magnetic pole; magnetic field gradient; surface roughness

由于铝合金具有低密度、高强度、热导性好及耐腐蚀性强等优点,因此被广泛地应用于汽车、船舶和钻井平台等领域<sup>[1-2]</sup>。质量轻、操控性好的特点对汽车行业的轻量化材料设计和结构设计提供了理论基础<sup>[3-4]</sup>。铝制材料的强氧化性使其自身产生一层致密的氧化铝保护膜,在低温等恶劣环境下铝合金管的强度与塑性均有着随着温度的降低而均衡上升的现象,但不宜出现变形,因此一些船舶的零部件都使用了铝合金管<sup>[5-6]</sup>。铝合金钻探管的回收性提高了企业的经济效益,使其在国内市场上具有很强的竞争力,同时低密度的特点给钻机减少了负荷,大大提高了钻井的效率<sup>[7-8]</sup>。这些地方都要求管道内表面具有较高的光洁度,防止因疲劳裂纹而直接影响管道运输的可靠性和稳定性<sup>[9-10]</sup>。因此提高管的表面质量显得极其重要。

然而机械加工过后,表面会有明显的刀微纹和沟槽,当前胡拥军等<sup>[11]</sup>采用电化学抛光铝合金,虽然表面质量得到很大提高,但加工后会因电流密度不均而产生灼伤和暗斑,李凤仙等<sup>[12]</sup>采用碱性化学抛光液对铝合金表面光整,光亮度得以提高,但抛光液的寿命短且对环境有污染性,本实验利用非传统磁力研磨加工工艺对管内表面光整,采用内加开槽形辅助磁极和超声波装置复合对管内表面研磨加工,利用磁场吸附磨粒形成磁力刷来实现对铝合金管内表面的滑擦、挤压、切削等相对运动<sup>[13-15]</sup>。研磨后内表面得到很大改善,表面纹理基本全部去除。

## 1 磁粒研磨机理及试验装置条件

### 1.1 超声波辅助研磨机理

磁力研磨是磨料粒子在封闭磁场力的作用下使磁性磨料与工件接触,在抛光非导磁性管件时,借助磁场的无限穿透力,使磁感线穿透每一个研磨粒子,在磁力、摩擦力、离心力及轴向力的复合作用下,磁性粒子不停地刻蚀、切削工件表面,从而达到光整加工的效果。研磨中添加水性研磨液,使粒子之间有一定的黏着力,磁性磨料犹如包络面一样包裹着整个柱形磁极头,在外部磁极的作用下实现同步往复运动<sup>[16-17]</sup>。为了提高表面光整效率,实验在单纯研磨的工序中增加了超声波装置,超声波辅助光整加工铝合金管是积聚了高频声波能量与磁性切削粒子的双重优点对内表面研磨加工,工作原理如图1所示,超声波发射器将电信号转变成高频电脉冲,送至换能器转化为高频率小振幅的机械振动,使辅助磁极头沿轴线方向连续的产生振幅波动,粒子更新翻滚的速度较传统研磨更加剧烈,同时给粒子一个轴向冲击,从而不断的有新的切削刃来充当刀具光刻表面,机加工后表面的沟壑、凸起能够得到全面去除,表面的光洁度效果更好<sup>[18-20]</sup>。

### 1.2 试验条件

表1为试验条件,还有磨料选用有磁性的铁粉和具有切削能力的铝粉质量比3:1高温烧结后筛分得到的研磨粒子,外部磁极选用轴向圆台形钕铁硼(Nd-Fe-B),研磨液为大连生产的劳力恩SR-9911,超声波清洗机对研磨后工件进行清洗,实验

在普通车床磁力研磨装置上增加了JH1000W-20超声波发生器,使用JB-8E触针式粗糙度测量仪对铝合金管研磨前后对表面粗糙度值进行测定,使用VHX-500F超景深3D电子显微镜对表面微观形貌进行观测。

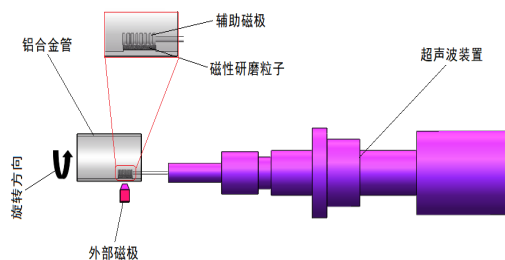


图1 超声波辅助加工原理图

表1 试验条件

实验参数	规格
试件	铝合金 $\phi 30\text{ mm} \times 150\text{ mm}$
永磁极	Nd-Fe-B
磁性粒子直径/ $\mu\text{m}$	150
研磨液	水基研磨液
旋转速度/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	460
进给速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	2
振动频率/kHz	17、20、23
辅助磁极	$\phi 5\text{ mm} \times 15\text{ mm}$

### 1.3 试验装置

如图2为超声波辅助磁力研磨装置,普通车床和超声波复合光整加工试验,外磁极和超声波固定于溜板箱上,在丝杠的带动下实现往复运动,铝合金管随主轴做旋转运动,振子产生的高频信号经换能器转化成振动,由变幅杆经铝管传至磁极头,外部磁极和辅助磁极组成闭合磁场区域,从而实现对接管内表面的精密加工。

## 2 模拟与仿真分析

### 2.1 磁场理论模拟

ANSYS Maxwell是有限元磁场仿真分析软件,主要是对磁场中磁感应强度的大小和磁感线的密集度进行分析,从而得出最佳的磁场加工区域。利用ANSYS Maxwell 16.0磁场模拟软件对外部聚磁形磁极和内部圆柱形辅助径向未开槽、开槽磁极进行仿真模拟,结果如图3(a)所示,未开槽磁极在管壁处的磁感应强度为0.5 T,且有效磁场研磨长度为

5 mm,磁场强度相对较均匀,在工件与磁极之间的粒子受力较均衡,研磨中粒子更新的速度缓慢,从3(b)云图中可以看出柱形磁极两端磁场强度较研磨区较大,会使端部聚集大量磨料粒子。然而在柱形磁极上开环形槽,如图3(c),从磁感线变化曲线中显示磁场强度会小于未开槽时,但波峰、波谷变化明显,研磨有效距离较未开槽增加1倍,从3(d)云图中可以看出开环形槽磁极磁场梯度较突出,以至于粒子不会挤压到磁极两端,研磨中受到变化的磁场会使研磨粒子更新较剧烈,使研磨效率得到提高。

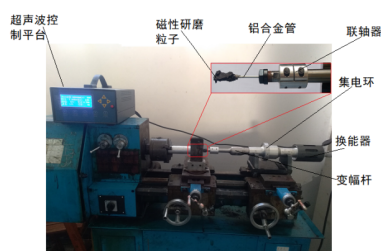


图2 超声波辅助磁力研磨装置

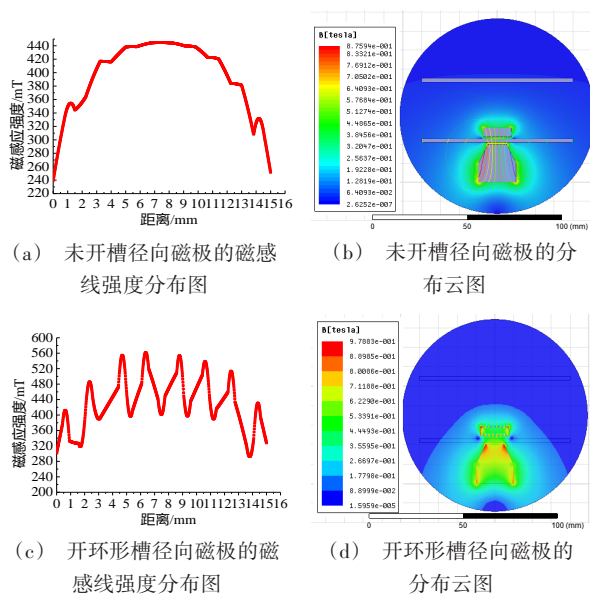


图3 径向磁极模拟云图及磁感应强度分布曲线

### 2.2 超声波振子的模态分析

ANSYS Workbench是复杂机械系统协同仿真软件,本文运用其中的模态分析和谐响应分析模块,通过ANSYS Workbench19.0对超声波振子装置进行模态分析,也就是将线性定常系统振动方程组

坐标转化成模态坐标,便于求出该系统的模态参数,对结构无外部载荷的作用下得到六种不同的模态分析频率,从图4可以得出,前两阶模态频率为6.2 kHz,第三阶频率为9.4 kHz,第四阶频率为19.2 kHz,第五阶、六阶频率为23.0 kHz,通过模拟分析可以使超声波振子在研磨过程中避免发生共振,进而计算结构振动特性的幅值波动,为更好的优化超声波不同频率下的研磨效果提供了理论基础。

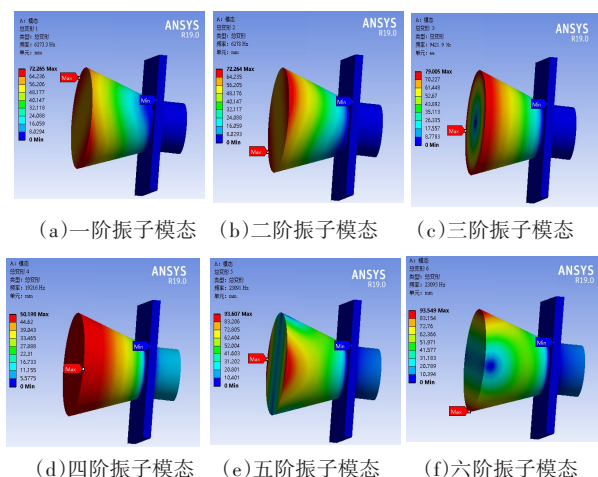


图4 超声波振子的模态分析图

## 2.3 谐响应分析

谐响应分析是分析在不同频率的简谐载荷作用下对系统结构产生持续的周期响应,从图5(a)中振子频率响应图中可以看到随着频率的不断增大,超声波振子产生的幅值是先增大后减小,当频率为19.2 kHz时,对应图5(b)中相位角为105度时,结构在已知频率的正弦载荷下振动幅值达到最大,理论上在该频率响应下研磨效果为最佳,但由于四阶振子模态分析值为19.2 kHz,试验设置了17 kHz、20 kHz、23 kHz三种频率进行振动研磨,从而得到最佳幅值和频率。

## 3 结果及分析

### 3.1 振动频率对表面粗糙度的影响

在超声辅助开槽磁极研磨装置下和试验1.2的条件下,通过调节超声波振子的三种不同频率进行实验,每10 min记录一次研磨后的表面粗糙变化值,如图6折线图所示,在振子频率为17 kHz时,研磨60 min表面粗糙度值由原来的0.60  $\mu\text{m}$ 下降至

0.17  $\mu\text{m}$ ,在振子频率为23 kHz时,研磨60 min表面粗糙度值由原来的0.60  $\mu\text{m}$ 下降至0.20  $\mu\text{m}$ ,在振子频率为20 kHz时,相对于前两种振子频率,表面粗糙度下降的较快,研磨效果能达到最好,粗糙度值降至最低0.08  $\mu\text{m}$ ,这主要是因为振子幅值随振子频率的增大是先增大后减小,从而使经变幅杆放大后的机械振动波动先增大后减小,辅助磁极轴向振动小,进而使磨料粒子在振子频率为17 kHz、23 kHz时更新翻滚受阻,在频率为20 kHz时,辅助磁极轴向振动相对较大,进而研磨粒子更新、翻滚较好,表面光洁度较好。

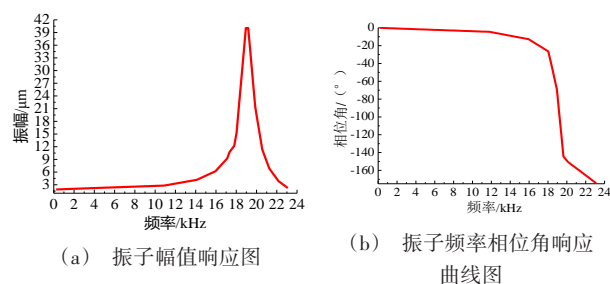


图5 振子响应分析的幅值和相位角曲线图

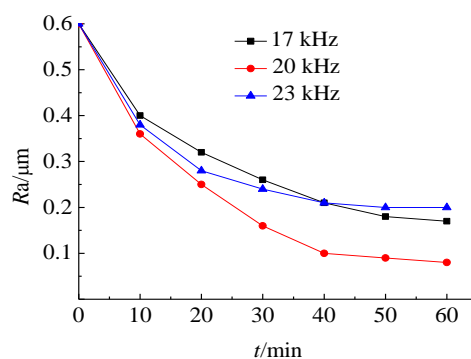


图6 不同振子频率对管内表面粗糙度的影响

### 3.2 磁极形状对表面粗糙度的影响

在超声波频率为20 kHz和试验1.2的条件下,对圆柱形磁极开环形槽和未开槽进行实验如图7折线图所示,实验研磨前30 min,未开槽磁极表面粗糙度值下降速度相对于开槽磁极表面粗糙度值下降速度较缓慢,且30 min后未开槽磁极研磨效果较缓慢,继续研磨30 min后,管内表面的粗糙度值达到0.13  $\mu\text{m}$ ,而开槽磁极研磨过程中粗糙度值下降的相对均衡,研磨效果优于未开槽磁极,这主要是因为未开槽磁极磁场强度均衡,研磨压力相对恒



定,而开槽磁极产生了磁场梯度,使研磨粒子受到非均匀的磁场力,即粒子刻画工件表面更加剧烈,研磨效果好。

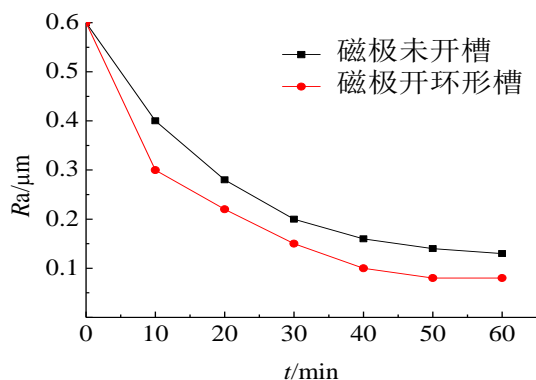


图7 磁极形状对管内表面粗糙度的影响

### 3.3 表面微观形貌分析

为验证超声磁粒研磨对Al 6061管内表面研磨具有明显的效果,在磁极开环形槽和试验1.2的条件下,设置了17 kHz、20 kHz和23 kHz三种不同振子频率进行研究,利用3D超景深电子显微镜对管表面加工前后表面形貌进行观测,如图8(a)所示,在显微镜放大200倍后,可以看出机械加工后原始表面波峰和波谷之间高度差较大,且有凹槽、微裂纹等缺陷,如图8(b)在振子频率为17 kHz进行研磨加工时,表面纹理较原始形貌有很大改善,但不够彻底,表面粗糙度为0.17 μm,当频率为20 kHz进行研磨抛光时,如图8(d)表面缺陷、纹理能够得到完全去除,且光洁度较好,表面粗糙度为0.08 μm,

当振子频率设为23 kHz进行研磨光整,如图8(c)表面缺陷依然有些许残留,这主要是因为超声波振子产生的轴向振动幅值小,研磨粒子受到的冲击力小,研磨过程中磨料粒子新的切削刃更新慢,使研磨不充分,而振子频率为20 kHz,粒子更新较快,粒子轨迹更加复杂化,研磨效果更好。

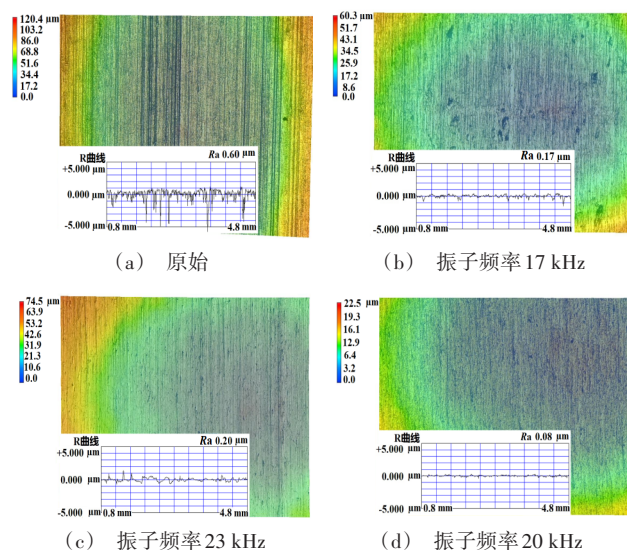


图8 不同振子频率对表面微观形貌的影响

如图9(b)、(c)可以看出,对圆柱形辅助磁极开环形槽表面明显要比未开槽磁极的表面光洁度较好,主要是因为开槽磁极使磨料粒子更新翻滚剧烈,再加上超声波振子的轴向振动,使研磨粒子不停的有新的切削刃光刻管内表面,表面波峰、波谷得到有效去除。

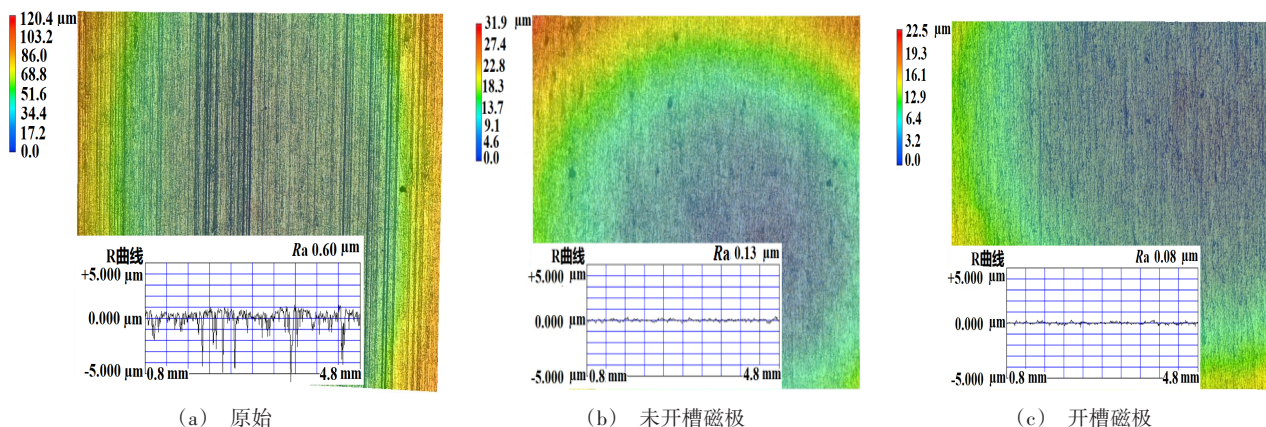


图9 辅助磁极开槽与未开槽对表面微观形貌的影响

## 4 结 论

(1)通过 ANSYS Maxwell 软件模拟分析可知,圆柱形磁极开槽后磁场梯度较明显,有效研磨区域增加一倍,提高了研磨效率。

(2)通过理论和试验对比三种不同振子频率响应值得出,在频率为 20 kHz 时,超声波产生的冲击和振幅较大,磨料粒子表面的光整加工效果好,有利于提高工件表面的研磨效率和均匀性。

(3)在条件为圆柱形开槽磁极和超声波频率为 20 kHz 的条件下,研磨光整 60 min,铝合金管内表面粗糙度由原始的  $0.60\ \mu\text{m}$  下降至  $0.08\ \mu\text{m}$ ,表面纹理得到完全去除。

## 参考文献

- [1] 陈峰,闫志巧,蔡一湘.粉末冶金铝合金及复合材料的研究现状与发展趋势[J].材料研究与应用,2014,8(1):1-5.
- [2] 詹志强.铝合金汽车车身板应用现状及需求前景[J].有色金属加工,2012,41(6):1-5+8.
- [3] Sun H T, Wang J, Shen G Z, et al. Application of warm forming aluminum alloy parts for automotive body based on impact[J]. International Journal of Automotive Technology, 2013, 14(4):605-610.
- [4] Wang Y, Lang L, Sherkatghanad E, et al. Rigid-flexible coupling forming process for aluminum alloy automobile body panels[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(9-12): 1-14.
- [5] 齐忠原,巫瑞智,王国军,等.铝合金在船舶和海洋工程中的应用[J].轻合金加工技术,2016,44(1):12-18.
- [6] 赵勇,李敬勇,严铿.铝合金在舰船建造中的应用与发展[J].船舶物资与市场,2005,(2): 28-30.
- [7] 孙飞龙,李晓刚,卢琳,等.5052 和 6061 铝合金在中国南海深海环境下的腐蚀行为研究[J].金属学报,2013,49(10):1219-1226.
- [8] Liang J, Yue W, Gu Y, et al. Improving corrosion resistance and corrosive wear resistance of aluminum alloy drill pipe by surface nanocrystallization and micro-arc oxidation[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2018.
- [9] 丘平,乐敏.石油化工装置中不锈钢钢管的应用[J].石油化工设备技术,2013,34(2): 50-53+7.
- [10] Koduru S D, Nessim M A. Review of quantitative reliability methods for onshore oil and gas pipelines [M]. Risk and Reliability Analysis: Theory and Applications, Springer International Publishing, 2017.
- [11] 胡拥军,龙力平.碱性无污染铝合金电化学抛光[J].中国表面工程,2003,(4):47-48.
- [12] 李凤仙,王晓燕,曾聪,等.6063 铝合金的碱性化学抛光[J].轻合金加工技术,2018,46(5):51-56.
- [13] Sun J, Zhou Y, Deng J, et al. Effect of hybrid texture combining micro-pits and micro-grooves on cutting performance of WC/Co-based tools[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(9-12):1-12.
- [14] 陈燕,张广彬,韩冰,等.磁力研磨法对陶瓷管内表面超精密抛光技术的试验研究[J].摩擦学学报,2015,35(2):131-137.
- [15] 韩冰,云昊,陈燕,等.振动辅助磁力研磨超硬精密  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷管内表面试验研究[J].摩擦学学报,2016,36(2): 169-176.
- [16] Zhou K, Chen Y, Du Z W, et al. Surface integrity of titanium part by ultrasonic magnetic abrasive finishing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(5-8): 997-1005.
- [17] Yun H, Han B, Chen Y, et al. Internal finishing process of alumina ceramic tubes by ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1-4):727-734.
- [18] 焦安源,全洪军,陈燕,等.超声磁力复合研磨钛合金锥孔的试验研究[J].机械工程学报,2017,53(19): 114-119.
- [19] 陈燕,刘昭前,王显康.超声波振动辅助磁力研磨加工研究[J].农业机械学报,2013,44(10):294-298+293.
- [20] 孙岩,兰勇,杨海吉,等.双向复合振动辅助磁力研磨加工的试验研究[J].表面技术,2018,47(7):125-131.