

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2019.09.004

# 石英玻璃管磁粒研磨机理与光整试验研究

刘冬冬, 朱子俊, 李 逵, 韩 冰\*

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

**摘要:** 为了提高激光陀螺光学腔体内壁的光整度, 采用混合磨料法对石英玻璃管内表面进行粗磨光整试验, 研究了径向辅助磁极与球形辅助磁极链及不同质量比条件下的铁粒子和金刚石粒子对玻璃管内表面研磨效果的影响。结果表明: 在球形磁极链作为辅助磁极, 铁粒子与金刚石粒子质量比为 1:1 混合时, 研磨加工 60 min, 石英玻璃管研磨前后的表面粗糙度值  $R_a$  由原始  $5.83 \mu\text{m}$  下降至  $0.51 \mu\text{m}$ 。试件表面的纹理得到去除, 峰谷差值得到有效的降低, 研磨后管内表面的均匀性达到最好。

**关键词:** 混合磨料; 石英玻璃管; 辅助磁极; 质量比; 表面粗糙度

**中图分类号:** TG147

**文献标识码:** A

## Research on Magnetite Grinding Mechanism and Finishing Test of Quartz Glass Tube

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

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

**Abstract:** In order to improve the smoothness of the inner wall of the optical cavity of laser gyroscope, the rough polishing experiment of the inner surface of quartz glass tube was carried out by using mixed abrasive method. Influence of the radial auxiliary magnetic pole, spherical auxiliary magnetic pole chain and mass ratios of the iron and diamond particles on the grinding effect of the inner surface of the glass tube was studied. The results show that after grinding, the surface roughness  $R_a$  of quartz glass tube decreases from  $5.83 \mu\text{m}$  to  $0.51 \mu\text{m}$  when the mass ratio of iron particles to diamond particles is 1:1 and the spherical magnetic pole chain acts as the auxiliary magnetic pole. The surface texture of the specimen is removed, and the difference between peak and valley is effectively reduced. The uniformity of the inner surface of the tube is the best after grinding.

**Keywords:** mixed abrasive; quartz glass tube; auxiliary magnetic pole; mass ratio; surface roughness

先进技术材料中的石英玻璃、硅晶片因具有硬度高、脆性大等特点<sup>[1-2]</sup>, 使得它们在工业和科学

术上的应用和研究领域相对广泛<sup>[3]</sup>。又因其具有稳定性好、耐腐蚀和耐磨损的特点, 在光源外罩、半

收稿日期: 2019-04-22

修回日期: 2019-05-13

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)

导体管及航空领域的应用也较为突出<sup>[46]</sup>。然而这些应用场合都要求管内表面有较好的光洁度和透光效果,同时石英玻璃表面质量对其自身的寿命和使用价值也有直接的影响。石英玻璃在传统的加工过程中易产生崩碎、断裂纹等现象,因此寻找一种好的光整加工效果显得尤为重要。

陈金身等<sup>[7]</sup>研究了一种玻璃抛光的新型抛光盘,以不饱和树脂作结合剂,用氧化铈的化学分解来达到对玻璃表面的机械化学去除,加工后表面质量有一定提高,但氧化铈对人体有危害性。仇中军等<sup>[8]</sup>应用磁流变液(MR fluids)作为研磨工具对玻璃进行了精密抛光加工,抛光后的光洁度较好,但磁流变液配置的成本相对较高,不适宜石英玻璃的批量抛光。尹韶辉等<sup>[9]</sup>利用ELID磨削和磁流变光整加工相结合的方法来减小玻璃表面粗糙度值和形状公差,最终达到镜面效果,但研磨过程中需要两个工序。车翠莲<sup>[10]</sup>博士研究了硬脆性材料表面的水射流抛光技术,利用磨料自身的惯性,磨粒与水射流在沿着曲面运动时而发生分离,使粒子不断刻画材料,加工时间久。为了探究一种有效的研磨抛光石英玻璃管的方法,本实验提出了混合磨料研磨工艺进行光整加工,从而找到最优的加工方案,因为混合粒子研磨加工工艺较简单,成本低、研磨加工效率高,无污染,是未来硬脆性材料加工的一种较理想加工工艺。

## 1 磁粒研磨机理及磁场分析

### 1.1 混合磨料研磨机理

图1为混合磨料法对石英玻璃管内表面光整加工机理示意图,玻璃外部放置矩形钕铁硼永磁极与内部辅助磁极形成闭合的磁场回路<sup>[11-13]</sup>。凭借磁感线对玻璃管的无限穿透力,铁粒子在封闭的磁场区域中被磁化,被磁化的铁粒子在磁场力、轴向力、摩擦力和离心力的复合作用下挤压金刚石粒子,在一定量具有黏度的水基研磨液的牵制作用下,使复合粒子之间具有较强的黏着力,在外部磁极轴向往复移动的作用下带动磨料粒子实现同步往复运动,辅助磁极不停的旋转带动具有切削刃的金刚石研磨粒子翻滚、刻蚀、切削工件表面,在更锐的过程中,不断的会有新的切削刃对石英玻璃表面挤压、切削等作用,从而达到光整加工的效果。使成型后

的玻璃管内表面的峰谷差值得到降低,表面光整度得到很大提高。

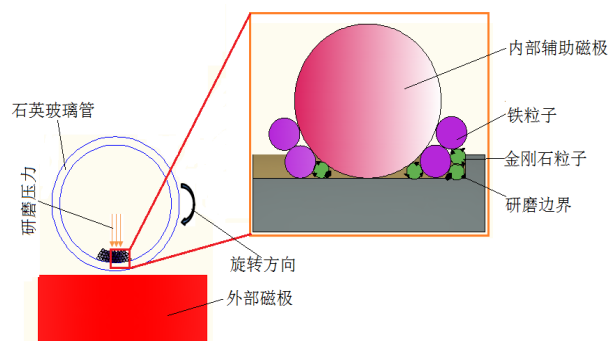


图1 混合磨料加工石英玻璃管原理图

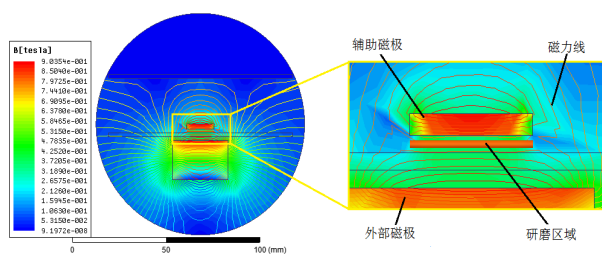
### 1.2 磁场理论模拟

通过ANSYS Maxwell 16.0对尺寸长度相同的圆柱形径向辅助磁极和球形辅助磁极链仿真模拟分析,结果如图2所示,所得磁感线分布云图和磁感线变化曲线图均关于中轴线对称分布,靠近磁极部位的磁感线更加稠密,取辅助磁极与管件之间区域的10 mm来研究磁感应强度的变化,结果如曲线图2(c)所示,柱形磁极最高点处的磁感应强度为0.4 T,有效研磨区域处的磁场强度仅有0.35 T,从图2(a)和(b)局部放大图可以看到柱形磁极相对于球形磁极链在有效研磨区域处的磁感线较稀疏,且有效研磨区域处的磁场较均匀,粒子受到研磨区域的正压力均衡而且数值小,粒子更新翻滚的速度较慢,而内置球形磁极链,会使磁极的形状而改变磁感线的分布,在最高点处的磁场强度为0.55 T,研磨过程中的磁场强度平均值达到了0.45 T,在图2(c)中对比两种磁感应强度变化曲线可发现,球形磁极链强度非均匀性变化,以至于粒子不会挤压到磁极两端,会使得在光整加工过程中粒子在有效研磨区域中受到变化的磁场力而翻滚剧烈,且磁场强度较柱形磁极提高了29%,使研磨效率得到提高。

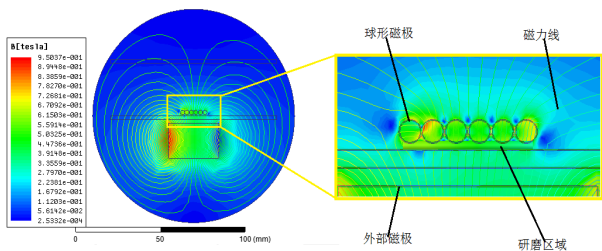
## 2 磁粒研磨理论和模拟分析

### 2.1 理论分析

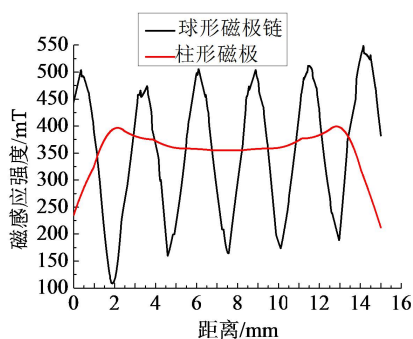
式(1)为磁粒研磨压应力计算公式,从该式中可以看出,研磨压力与磁感应强度的二次方成正比,在光整加工过程中,研磨区域的磁感应强度越大,管内壁所受的研磨正压力也越大,研磨效率越高,表面光洁度越好。



(a) 柱形辅助磁极磁感线分布云图及磁感应强度分布



(b) 球形辅助磁极磁感线分布云图及磁感应强度分布



(c) 辅助磁极磁感线分布曲线图

图2 磁场模拟云图和磁感线曲线分布图

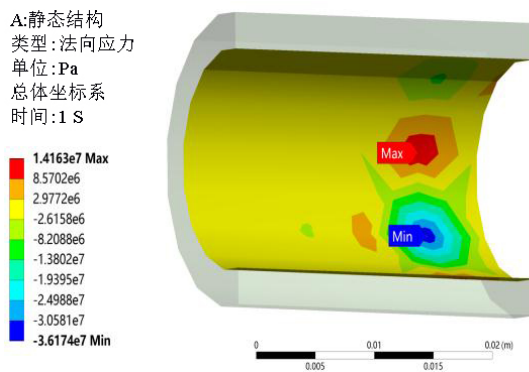
$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} \left( 1 - \frac{1}{\mu_m} \right) \quad (1)$$

式中: $B$ 为玻璃管内表面作用处的磁感应强度; $\mu_m$ 为研磨粒子的相对磁导率; $\mu_0$ 为空气磁导率,其值取 $4\pi \times 10^{-7}$  H/m。

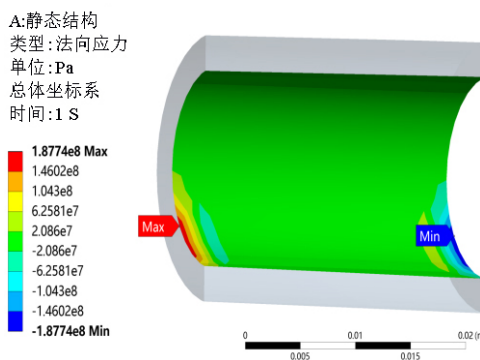
## 2.2 模拟分析

利用有限元分析软件 ANSYS Workbench 对石英玻璃管内壁所受压应力进行模拟分析,结果如图3云图所示,为作用在玻璃管内壁的法向压应力值。从图3(a)柱形磁极挤压研磨粒子作用于玻璃管内壁上,由于柱形辅助磁极作用在玻璃管内壁的作用面积较小其法向应力值为14.16 MPa。图3(b)为球形磁极链所受磁场力挤压磨料粒子作用于管内表面,其玻璃管内壁所受的法向压应力值提升到了187 MPa,与柱形辅助磁极相比,作用的法向压应力

值相比有明显提高。这主要是因为球形磁极链在有效研磨区域内的磁感应强度值较柱形磁极研磨区域的磁感应强度大,因此受到的法向压应力值较大。



(a) 柱形辅助磁极对管内壁的压应力云图



(b) 球形辅助磁极链对管内壁的压应力云图

图3 石英玻璃管内表面压应力模拟结果对比图

## 3 试验装置及试验条件

### 3.1 试验装置

图4是JGS2石英玻璃管磁粒研磨加工装置实物图,外部磁极固定于溜板箱上,将吸附磨料的磁极放置于石英玻璃管直径体积的2/3,磨料不易填充过多,防止研磨过程中粒子出现阻塞现象,丝杠带动溜板箱往复运动,在外加限位开关的两个端点,使外部磁极带动内部辅助磁极同步往复运动,混合磨料粒子在受到磁场力、轴向力和切向力的复合作用下,不停的光刻玻璃管内壁,从而实现对管内表面的精密加工。

### 3.2 试验条件

表1为试验条件,磨料选用铁粒子和金刚石粒

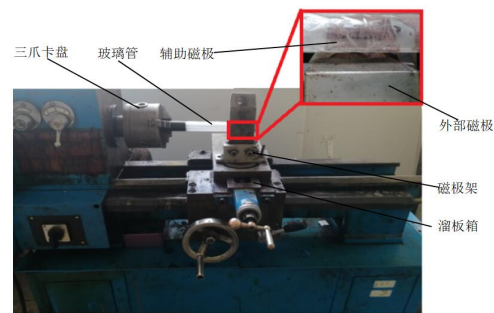


图 4 石英玻璃管磁粒研磨装置

子,将具有磁性的铁粉和切削能力的金刚石粒子按质量比 1:1、2:1 和 1:2 进行实验,外部磁极选用长方形钕铁硼(Nd-Fe-B)永磁极,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,使用 JB-8E 触针式粗糙度测量仪对石英玻璃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。

表 1 试验条件

名称	试验条件
试件	石英玻璃管 $\Phi 20 \times 100$ mm
永磁极	Nd-Fe-B (50 mm $\times$ 30 mm $\times$ 15 mm)
铁粒子粒径	150 $\mu$ m
金刚石粒径	W2.5 $\mu$ m
研磨液	水基研磨液
旋转速度	460 r/min
进给速度	2 mm/s
加工时间	60 min
辅助磁极	球形磁极链 $\Phi 2.5 \times 15$ mm 柱形磁极 $\Phi 2.5 \times 15$ mm

4 结果及分析

4.1 磁极形状对玻璃管内表面粗糙度的影响

在表 1 所示的试验参数下,对研磨区域等长度的柱形磁极和球形磁极链两种辅助磁极进行研磨试验,试验中每 10 min 记录一次研磨后的表面粗糙度变化值,结果如图 5 所示,前 40 min,两种辅助磁极磁粒研磨石英玻璃管内表面时表面粗糙度值下降的较快,后 20 min 里管内表面的粗糙度值下降的较慢,球形磁极链研磨 60 min 后的表面粗糙度值由原始的 5.83  $\mu$ m 下降至 0.5  $\mu$ m,而柱形磁极研磨 60 min 后玻璃管内表面的粗糙度下降至 0.9  $\mu$ m,从

表面粗糙度变化可以得出辅助磁极为球形磁极链时研磨效果要优于柱形磁极,结合磁场模拟结果和研磨压应力公式可知,等长度的球形磁极链较柱形磁极磁场梯度较大,平均磁感应强度稍高于柱形磁极,使得玻璃管在添加球形磁极链时混合磨料更新翻滚的更加剧烈,且铁粒子受到的磁场力也大,会使金刚石粒子与管内表面的作用力较大,研磨过程中粗糙度值下降的较快。

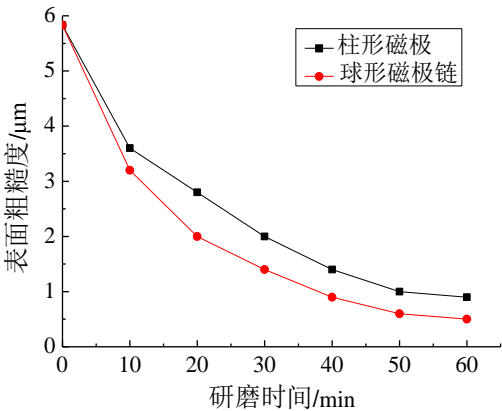


图 5 辅助磁极对管内表面粗糙度的影响

4.2 磨料质量比对玻璃管内表面粗糙度的影响

采用球形辅助磁极链在表 1 所示的试验参数下,分别以金刚石粒子与铁粒子的质量比为 2:1、1:1 和 1:2 进行试验,结果如图 6 所示。可以看出,在质量比为 2:1 时,研磨前 10 min 后表面粗糙度值下降的最快,继续研磨 30 min,管内表面的粗糙度值较质量比为 1:1 的混合磨料研磨后的粗糙度值下降的相对较慢,在后 20 min 时,管表面粗糙度值下降的最慢,这主要是最初金刚石粒子的量多于铁粒子,在研磨液的牵制作用参与有效研磨的金刚石粒子多,表面粗糙度值下降的快,研磨时间长会使得牵制作用下降,部分研磨粒子失效且被甩飞,使得研磨后的粗糙度下降减慢。质量比为 1:2 时,研磨前 50 min 表面粗糙度下降的较快,在研磨后 10 min 表面粗糙度趋于稳定,这是因为铁粒子的量多于金刚石粒子,研磨过程中管内壁受到的研磨压力大,使得金刚石粒子不停的挤压、刻画玻璃管表面,但有效研磨金刚石粒子的量少且有失效现象,使得研磨后的粗糙度值较质量比为 1:1 的混合磨料研磨后的粗糙度值下降的较慢,而质量比为 1:1 的混合磨料研磨 60 min,有效研磨粒子和研磨压应力相对

适中,研磨效果较其它两种效果最好。

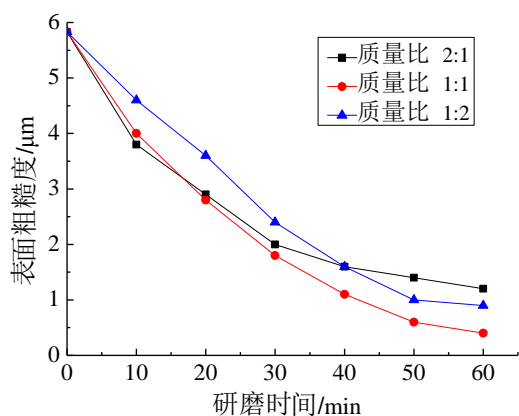


图6 金刚石粒子和铁粒子的质量比对表面粗糙度的影响

#### 4.3 表面微观形貌分析

实验分别用3D超景深电子显微镜基恩士VHX-500F对石英玻璃管内表面研磨前后表面形貌进行观测,结果如图7所示。

由于石英玻璃管是在高温熔融状态下得到的,因此其原始表面晶粒较大,如图7(a),从图中颜色可以看出,峰谷差值相对较大,其原始原始表面峰谷差值为213.8 μm,采用柱形辅助磁极研磨玻璃管内表面后,其峰谷值得到很大改善,研磨60 min后表面的峰谷值达到了43.2 μm,而采用球形辅助磁极链研磨玻璃60 min后,其表面的峰谷值达到了

24.7 μm,研磨后的晶粒得到了细化,表面质量得到很大提高。

图8为采用球形辅助磁极链在表1所示的试验参数下用质量比不同的混合磨料研磨玻璃内表面所得的形貌图。可以看出,当混合磨料粒子质量比为2:1时,研磨后的峰谷值降至55.8 μm,而当混合磨料粒子质量比为1:2时,研磨后的峰谷值降至86.4 μm,当混合磨料粒子质量比为1:1时,研磨玻璃管后的表面峰谷值达到最低为24.7 μm,工件表面的凸起、凹坑被有效去除,工件表面变得更加均匀、光整。

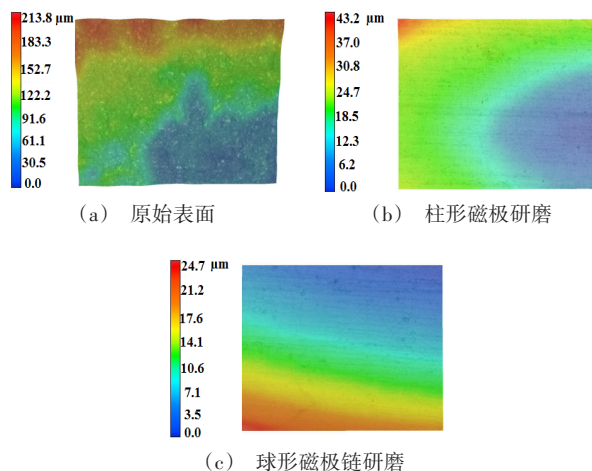


图7 辅助磁极形状对玻璃表面形貌的影响

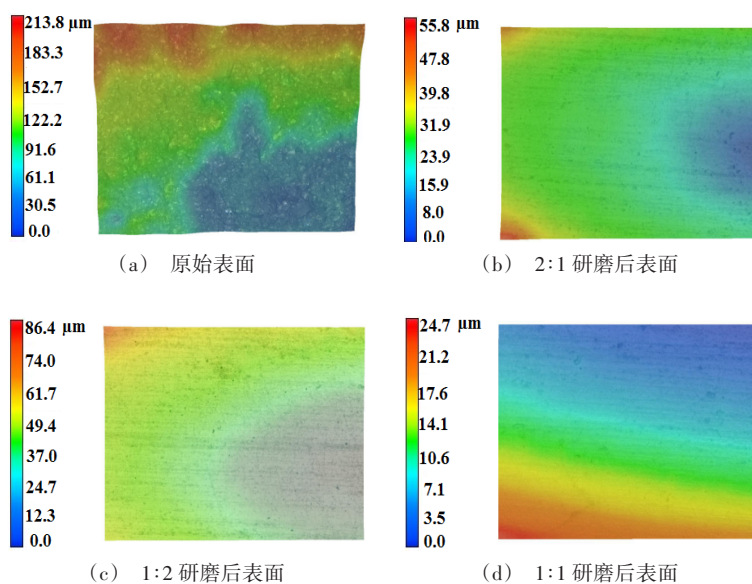


图8 混合磨料质量比对玻璃表面形貌的影响

利用JB-8E触针式表面粗糙度测量仪对研磨前后的粗糙值进行测量,结果如图9所示。

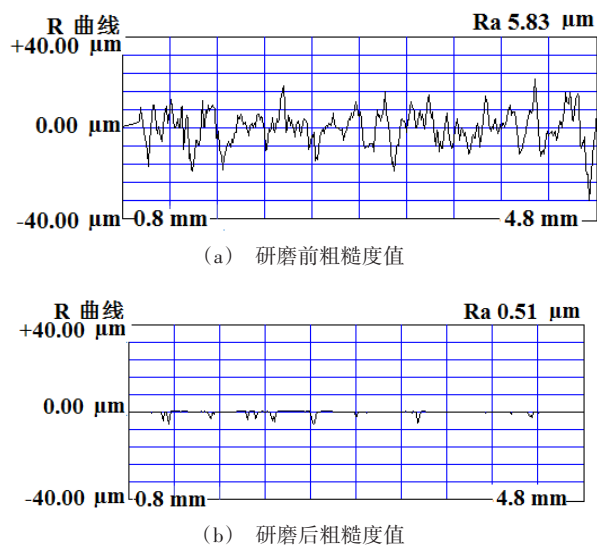


图9 石英玻璃研磨前后的表面粗糙度值

研磨前的石英玻璃管内表面的粗糙度值为  $5.83 \mu\text{m}$ ,而在采用球形磁极链和混合磨料质量比为1:1及其它试验条件同表1的情况下研磨60 min后,玻璃管内表面的粗糙度值降为  $0.51 \mu\text{m}$ ,为后续的精加工奠定了基础。

## 5 结论

(1)通过ANSYS Maxwell软件模拟分析可知,圆柱形磁极在有效研磨区域的磁场强度较均匀,而等长度的球形磁极链在有效研磨区域内的磁感应强度梯度较大,在研磨过程中粒子更新、翻越的更加剧烈,光整加工的效果较好。

(2)在球形磁极链作为内置辅助磁极时,对不同混合磨料粒子质量比分别研磨石英玻璃管,实验得出当金刚石粒子与铁粒子质量比为1:1时,研磨效果最佳,工件表面的粗糙度值由原始的  $5.83 \mu\text{m}$  下降至  $0.51 \mu\text{m}$ 。

(3)在最佳的工艺的条件下,石英玻璃管研磨加工60 min后,原始表面的凸峰、凹坑等缺陷基本得到去除,峰谷差值得到大幅度降低。

## 参考文献

- [1] 赵博.微晶玻璃超精密磨削表面/亚表面损伤研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [2] 陈明君,张飞虎,董申,等.光学玻璃塑性模式超精密磨削加工的研究[J].中国机械工程,2001(4):101-103+125+8-9.
- [3] 王耀祥.光学玻璃的发展及其应用[J].应用光学,2005(5):61-66.
- [4] Kuai J C, Zhang H L, Zhang F H, et al. Research on minimum mechanism of roughness of ELID grinding[J]. Advanced Materials Research, 2010, 135: 441-446.
- [5] 钱志真,宋国伟.电光源用掺铈-钛电熔无臭氧石英玻璃管的研制[J].玻璃与搪瓷,1992(04):31-35+65.
- [6] 刘顺,韩冰,陈燕,等.超声磁粒复合研磨对石英玻璃管内表面的光整研究[J].表面技术,2018,47(6):265-270.
- [7] 陈金身,智红梅.一种玻璃抛光用新型抛光盘的研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2012,32(3):78-81.
- [8] 仇中军,张飞虎,董申.光学玻璃研磨用磁流变液的研究[J].光学技术,2002(6):497-498+501.
- [9] 尹韶辉,陈逢军,张导成,等.结合ELID磨削与磁流变光整加工的单晶硅反射镜超精密制造技术[J].纳米技术与精密工程,2007(3):220-223.
- [10] 车翠莲.硬脆材料曲面的磨料水射流抛光技术研究[D].济南:山东大学,2011.
- [11] 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.
- [12] 韩冰,云昊,陈燕,应骏.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷管内表面高效精密研磨试验研究[J].机械设计与制造,2016(1):154-157.
- [13] Zhou K, Chen Y, Du Z W, et al. Surface integrity of titanium part by ultrasonic magnetic abrasive finishing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(5-8):997-1005.