

文章编号: 1002-2082 (2021) 02-0346-06

大长径比皮料玻璃管加工工艺研究及应用

苏德坦¹, 孙建宁¹, 陈晓倩¹, 毛汉祺¹, 韩晓明¹, 杨 光², 肖 杰², 张正君¹, 赵慧民¹

(1. 北方夜视技术股份有限公司 南京分公司, 江苏 南京 211100; 2. 江苏贵研电子有限公司, 江苏 盐城 224000)

摘 要: 为满足高增益、低噪声微通道板要求的大长径比皮料玻璃管, 采用精密机械整形冷加工工艺提高皮料管的几何均匀性, 实现微通道板的性能提升。通过改善机床加工误差、对刀误差以及设计合适的机动夹紧机构可有效控制皮料管内圆精磨加工精度。对磨头转速、背吃刀量、轴向进刀速度及金刚砂磨头粒度4个水平因子开展L16正交试验, 得出背吃刀量是影响皮料管内圆精磨加工表面质量的主要因素。选择合适的抛光工艺及工装夹具, 最终将皮料管的尺寸变化量控制在1%以内, 表面粗糙度 Ra 值有效控制在 $0.02\ \mu\text{m}$ 。通过 $\Phi 25/6$ 型微通道板制板试验, 结果表明: 减小皮料管的几何尺寸偏差在一定程度上提高了微通道板阵列一致性、开口面积比一致性, 以及增益均匀性, 对制造高性能微通道板有较好的借鉴作用。

关键词: 皮料玻璃管; 冷加工; 大长径比; 微通道板

中图分类号: TN205

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0205003

Research and application of processing technology of cladding-tube with large aspect ratio

SU Detan¹, SUN Jian'ning¹, CHEN Xiaoqian¹, MAO Hanqi¹, HAN Xiaoming¹,
YANG Guang², XIAO Jie², ZHANG Zhengjun¹, ZHAO Huimin¹

(1. Nanjing Branch, North Night Vision Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

2. Jiangsu Guiyan Electronic Co., Ltd., Yancheng 224000, China)

Abstract: In order to meet the requirements of high gain and low noise micro-channel plate, the large aspect ratio cladding-tube was proposed. The geometric uniformity of cladding-tube could be improved by using precision mechanical shaping cold working process, so as to improve the performance of micro-channel plate. By improving the machining error, tool setting error of machine tool and designing the appropriate mechanical clamping mechanism, the precision of inner circle finishing of cladding-tube could be effectively controlled. The L16 orthogonal test was carried out on the four horizontal factors of grinding head speed, back cutting amount, axial feed speed and emery grinding head particle size. It was concluded that the back cutting rate was the main factor affecting the surface quality of cladding-tube inner circle finish grinding. By selecting the appropriate polishing process and fixture, the size change of cladding-tube was controlled within 1%, and the surface roughness Ra value was effectively controlled within $0.02\ \mu\text{m}$. The experimental results of manufacturing $\Phi 25/6$ micro-channel plate show that the uniformity of micro-channel array, the uniformity of opening area ratio and gain uniformity are improved to a certain extent by reducing the geometric dimension deviation of cladding-tube, which has a good reference for the researchers engaged in manufacturing high-performance micro-channel plates.

Key words: cladding-tube; cold working; large aspect ratio; micro-channel plate

收稿日期: 2020-06-12; 修回日期: 2020-09-30

作者简介: 苏德坦 (1963-), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要从事微光像增强器方面的研究。E-mail: km@nvt.com.cn

通信作者: 陈晓倩 (1991-), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事微通道板方面的研究。E-mail: apaster188@163.com

引言

微通道板(microchannel plate, MCP)^[1-4]是一种大面阵的真空电子倍增器件, 为数百万个细微的空心玻璃管集合在一起的平行阵列薄片结构, 每一空心管通道的作用犹如一个连续的打拿级倍增器。这种器件可以探测带核粒子、电子、离子和加速的中性粒子、紫外光子和 X 射线, 被广泛应用在各类探测器中。

常规的还原铅硅玻璃微通道板(reduced lead silicate glass microchannel plate, RLSG—MCP)^[5-6]制造工艺主要依赖于玻璃多纤维拉制技术, 将熔炼制备的皮料玻璃管以及与之配套的芯料棒一起高温拉制成单纤维丝, 再经过拉复丝、排屏、压屏、切片、抛光、腐蚀、氢还原、镀膜等一系列工艺, 直至完成 MCP 的制作。芯料棒在整个制造工艺中相当于模具起支撑作用, 压屏完成阵列熔合后, 就会把它去掉, 形成所需的空芯列阵。而皮料玻璃是功能性玻璃材料, 最终由它经过高温氢还原提供所需的电子导电电阻和二次电子发射功能。因此, 按照上述 RLSG—MCP 制造工艺, 皮料玻璃管的质量及几何误差将影响 MCP 通道直径尺寸误差, 从而影响 MCP 增益的均匀性, 在像增强器的应用中就会形成输出像的固定图案噪声。目前皮料玻璃管为人工吹管, 由于人工操作拉制受力不均匀等各种原因, 皮料玻璃管几何尺寸控制精度较差, 其内径、壁厚、直线度、圆度等几何尺寸变化量只能控制在 5%~8%, 是提高 MCP 增益均匀性的瓶颈之一。同时为满足大开口面积比 MCP 提出的薄皮皮料管, 在后续制造工艺中由于皮料壁厚太薄且尺寸一致性较差使局部通道容易出现破损, 因此在一定程度上存在发射点和顶角黑点的风险。国内南京理工大学常本康教授团队在不改变皮料壁厚的条件下曾采取了多种“扩口”技术^[7-10], 将 MCP 输入端的通道口制作成为喇叭状, 使得 MCP 的开口面积比提高到 80% 以上, 但由于这些“扩口”技术均未能实现产业化, 因此如何提高皮料管的几何均匀性是值得研究的课题。

玻璃管的精密加工技术主要采用精密机械整形工艺和高温精密拉制工艺。精密机械整形属于冷加工工艺, 制作的玻璃管精度是在后续机械整形过程中形成, 而高温精密拉制属于热加工工艺, 制作的玻璃管精度是在拉制过程中形成。就加工产品几何精度而言, 两者在内外径、圆度指标上相

差不大。精密机械整形工艺对于长度较长的玻璃管加工难度大, 而高温精密拉制工艺很容易生产 1 m 以上的超长精密玻璃管。目前国内外精密玻璃管生产企业采用高温精密拉制工艺生产的高硼硅玻璃管相对成熟, 但采用该工艺能够生产高铅硅玻璃管的企业鲜见报道。由于高铅硅玻璃材料的特殊性, 采用高温精密拉制工艺制作成本极高。

因此, 综合各项因素, 本文提出了采用人工吹制皮料毛坯玻璃管, 通过玻璃管机械整形方法将皮料毛坯玻璃管精密整形, 控制皮料管的几何精度, 为提高 MCP 增益均匀性打下坚实基础。

1 加工工艺研究

大长径比皮料玻璃管的加工难点在于管内径精度控制以及管内壁的抛光, 通过粗磨、精磨磨头逐步扩口磨削的方式进行内孔的扩大, 直至玻璃表面的毛面状态变得细腻, 再通过抛光磨头对玻璃内表面加压的方式进行表面平整度的修整, 使毛面玻璃表面变得光滑、透明。本文以加工毛坯管尺寸: 长 510 mm、 $24\text{ mm} \leq \text{内径} \leq 27\text{ mm}$ 、 $\text{外径} \geq 39\text{ mm}$ 的毛坯管为例, 重点叙述皮料管内圆精磨和抛光冷加工工艺设计。

1.1 管内圆精磨加工工艺设计

内圆精磨是介于滚圆与抛光之间的重要冷加工工序, 其目的是保证加工管件达到抛光前所需要形状、尺寸精度和表面粗糙度^[11-13]。因此, 精磨后管件的质量对后续抛光的影响是非常重要的。大长径比皮料玻璃管, 内孔深度大, 壁厚薄, 管内圆加工面临炸裂、表面擦伤、表面微裂纹深等一系列难题。由于加工效率在很大程度上会引起加工质量变差, 在提高加工效率的同时保证良好的加工质量尤为困难, 因此如何提高加工质量和加工效率成为亟待解决的问题。

管内圆精磨加工主要通过改善机床加工误差、对刀误差以及设计合适的机动夹紧机构来控制加工精度。通过选用高精度的滚动轴承, 增加轴承刚度以及提高轴承间相配合表面的加工精度, 有效减小主轴径向圆跳动对机床加工误差的影响。使用机内对刀仪并结合数控系统来构建待加工管件坐标系, 从而实现了对刀操作, 大幅度提高了对刀精度。管件装夹采用液压夹紧装置取代手动夹紧, 有效避免了人为操作夹紧力过大易造成管件炸裂, 过小加工时管件易松动等影响加工精

度的问题。

本文采用单因素变量实验方案,在其他工艺参数不变的情况下,选择磨料粒度为400目的氧化铝磨头和金刚砂磨头进行管内圆的加工,每组180 min,每隔30 min对管内表面进行表面质量检测,表面质量随加工时间增加的变化关系如图1所示。通过在同等磨削参数下使用氧化铝和金刚砂磨头的比较,发现金刚砂磨头磨削加工性能更好,这与磨粒材料的导热系数、比热容有关。由于氧化铝的磨削温度高于金刚砂的磨削温度,在玻璃表层下,温度难以及时散热,这会产生残余应力,甚至导致亚表面损伤,影响表面质量。同时也可以看到加工初期,随着加工时间的增加,玻璃表面粗糙度 R_a 值不断减小,但随着时间不断增加,玻璃表面粗糙度 R_a 值基本保持不变。

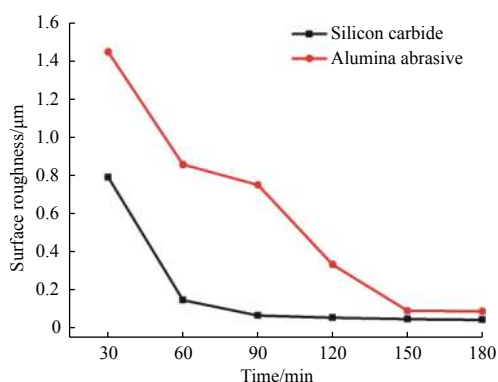


图1 表面粗糙度随加工时间变化关系

Fig.1 Relationship between surface roughness and machining time

通过正交试验设计,选取磨头转速、背吃刀量、轴向进刀速度及金刚砂磨头粒度4个水平因子,对皮料管内圆精磨工艺参数进行数学分析,得出在保证加工质量的前提下,加工效率最高的加工工艺参数。表1为按照正交试验规划方法设计的L16正交试验水平表,其中 S 为磨头转速(r/min), A 为背吃刀量(mm), F 为轴向进刀速度(mm/min), D 为磨头粒度(目)。为了保证加工质量的同时减少加工时间,本文采用L16正交表,将16个试验结果按4组分别对应各因子的水平,然后将每组的4个试验结果分别相加,所得之和用 I_j 、 II_j 、 III_j 、 IV_j 表示,其中, $j=1, 2, 3, 4$ 。 R_j 为 I_j 、 II_j 、 III_j 、 IV_j 4个数据的极差值。

从图2正交试验结果极差值 R_j 可看出,背吃刀量(A)对皮料管内圆精磨加工时间的影响最大,其次是磨头转速(S),再次是磨头粒度(D),影响最

表1 正交试验水平表

Table 1 Orthogonal test level

因子	水平1	水平2	水平3	水平4
$S/r \cdot min^{-1}$	600	800	1000	1200
A/mm	0.03	0.04	0.05	0.06
$F/mm \cdot min^{-1}$	400	450	500	550
$D/目$	80	200	400	600

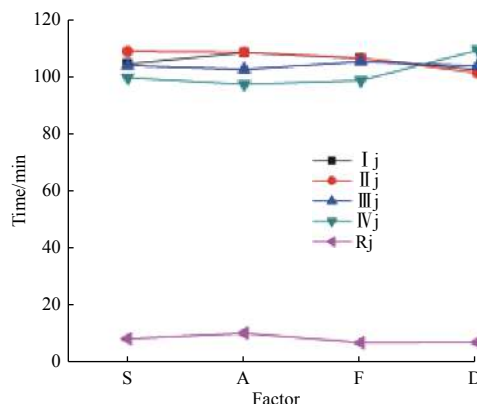


图2 L16正交试验结果

Fig.2 Results of L16 orthogonal test

小的是轴向进刀速度(F),即 $R_A > R_S > R_D > R_F$ 。如果从加工时间取最小的原则,选取磨头转速为1200 r/min ,背吃刀量为0.05 mm ,轴向进刀速度为450 mm/min ,磨头磨粒为200目,实验参数为最佳,为后续内圆抛光打下良好基础。

1.2 内圆抛光加工工艺设计

图3为经磨削加工后玻璃断面示意图。抛光是为了消除玻璃精磨后残存在凹陷层下表面的裂纹层,以获得光滑的透明表面^[14-16]。本文所述皮料玻璃管内表面的抛光实际为机械磨削与化学反应共同作用的过程,玻璃表面在抛光磨头外加压力下,受机械摩擦作用的同时,水对皮料玻璃进行侵蚀生成硅酸凝胶,抛光粉使凝胶和抛光磨头表面互相粘结,当抛光磨头与玻璃内表面作相对运动时,凹陷层顶部的硅胶凝胶最先被抛光去除,然后

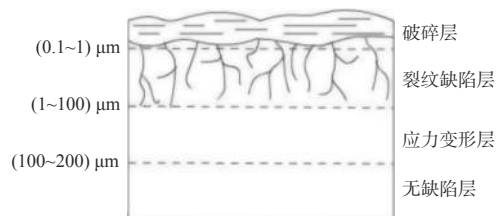


图3 磨削后玻璃断面示意图

Fig.3 Schematic diagram of glass section after grinding

水与新表面再发生水解作用, 凝胶薄膜被去除, 如此反复, 玻璃表面从局部透明逐步扩大到全部透明。大长径皮料玻璃管内圆抛光加工时玻璃表面质量难以控制, 常出现表面麻点、擦伤等问题。

在内圆抛光过程中, 抛光磨头材质、转速、压力、抛光粉规格等各种因素对抛光质量及效率都有影响。本文采用单因素实验方案, 控制其他工艺参数不变, 选择 3 种氧化铈磨料进行管内圆的抛光。每组 300 min, 每隔 50 min 对管内表面进行表面质量检测, 玻璃表面粗糙度随抛光时间增加的变化关系如图 4 所示。随着抛光时间的增加, 玻璃表面粗糙度 Ra 值不断减小, 且抛光磨料粒度越小, 抛光后玻璃表面粗糙度 Ra 值越低, 抛光效果越好。

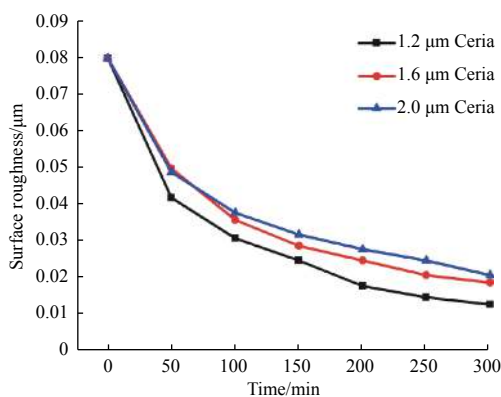


图 4 表面粗糙度随抛光时间变化关系

Fig. 4 Relationship between surface roughness and polishing time

综合上述因素, 针对大长径比皮料管抛光磨头材质选用羊毛毡, 抛光粉采用粒径 $1.2\ \mu\text{m}$ 氧化铈, 具体工艺参数及工装设计如下:

1) 工艺参数。考虑到加工效率, 先使用硬质羊毛毡进行粗抛, 粗抛消耗 $0.04\ \text{mm}$ 的尺寸。使用软质进口羊毛毡配合氧化铈抛光液以转速 $3\ 000\ \text{r/min}$ 高速旋转进行精抛, 精抛消耗 $5\ \mu\text{m}$ 的尺寸, 最终皮料管的尺寸变化量控制在 1% 以内, 表面粗糙度 Ra 值有效控制在 $0.02\ \mu\text{m}$ 以内, 图 5 为抛光后皮料管内表面粗糙度测试图。



图 5 抛光后皮料管内表面粗糙度测试

Fig. 5 Roughness test of inner surface of polished cladding-tube

2) 工装夹具设计。为满足加工管件的光洁度及直线度, 工装夹具采用尼龙配合轴承钢材料内外双层筒夹结构设计, 既保证管件外部装夹的稳定性, 同时内部使用尼龙筒夹直接夹住皮料管, 可有效避免玻璃外表面因工装夹具带来的划痕, 减少玻璃表面微裂纹的产生。

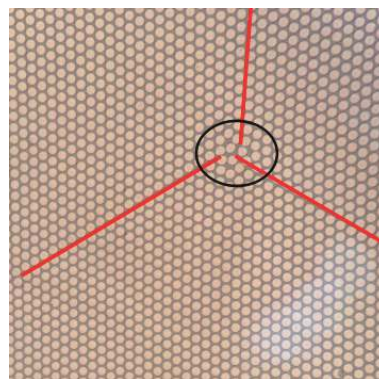
2 MCP 性能提升效果分析

由于 MCP 是由数百万个通道电子倍增器组成的紧凑型二维阵列, 若阵列中部分区域通道直径存在误差, 将直接影响 MCP 增益均匀性, 进而在像增强器的应用中形成了输出像的固定图案噪声。针对研制高增益、低噪声的 MCP, 提高通道直径误差尤为重要。因此, 基于 RLSG-MCP 制造工艺, 提高功能材料皮料管的几何均匀性是整个研制工作的前提也是关键。本文以制造开口面积比为 65% 的 $\Phi 25/6$ 型微通道板为例, 主要从 MCP 通道阵列一致性、开口面积比一致性以及增益均匀性叙述该大长径比皮料管加工工艺在 RLSG-MCP 制造领域的优势。

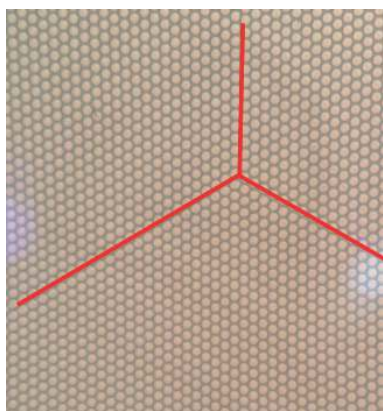
2.1 MCP 阵列一致性

由于目前人工吹制的皮料管外形尺寸精度控制较差, 其几何尺寸变化量只能控制在 $5\%\sim 8\%$, 芯皮料组成的玻璃预制棒在拉丝过程中, 单纤维丝丝径难以控制在 $\pm 1\ \mu\text{m}$, 复丝与复丝之间以及同一复丝内单丝与单丝间丝径一致性较差, 导致在后续压屏热处理过程中造成 MCP 通道阵列结构较差, 相邻复丝之间容易错位造成复丝顶角出现“梅花”现象。

图 6 为人工吹制皮料管和机械加工管试制的 $\Phi 25/6$ 型微通道板光检结构显微图。由于机械加工管较人工吹制的皮料管尺寸精度提高 20 倍, MCP 阵列一致性较好。



(a) 人工吹制管试制板



(b) 机械加工管试制板

图 6 MCP 光检结构显微图

Fig. 6 Photomicrograph of MCP

2.2 MCP 开口面积比一致性

开口面积比为 MCP 工作区的通道开口面积与整个工作区面积之比, 开口面积比决定 MCP 的探测效率, 并在一定程度上影响 MCP 的噪声因子^[2]。MCP 的开口面积比可用下式计算:

$$R_{OA} = 0.907(d_c/P)^2$$

式中: R_{OA} 为开口面积比; d_c 为通道直径; P 为通道中心距, 本文叙述的 $\Phi 25/6$ 型微通道板开口面积比约为 65%。由于人工吹制皮料管试制的 MCP 阵列一致性较差, 单复丝间丝径存在误差以及相邻复丝间错位造成复丝边界受力不均, 导致丝径变形等一系列问题, 直至芯料腐蚀去除后通道直径会存在或多或少的偏差, 从而影响 MCP 开口面积比的一致性。图 7 为采用人工吹制皮料管和机械加工管试制的 $\Phi 25/6$ 型微通道板样品开口面积比实测数据。从图 7 可以看到, 采用机械加工皮料管试制的 MCP 开口面积比有效控制在 $65\% \pm 1\%$ 。

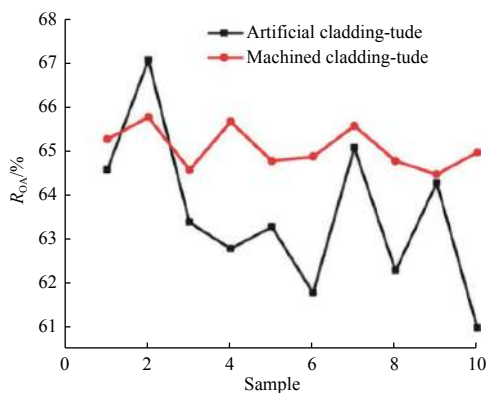
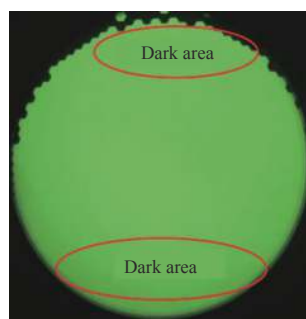


图 7 MCP 开口面积比

Fig. 7 MCP open area ratio

2.3 MCP 增益均匀性

由上述分析可知, 皮料管几何误差影响 MCP 阵列、开口面积比一致性, 因而影响相应通道区域增益均匀性, 造成荧光屏上输出图像的亮度分布失真。图 8 为采用人工吹制和机械加工管试制的 MCP 在 450 V 低电压下的满板均匀性测试图。从图 8 可以看到, 采用人工吹制皮料管试制的 MCP 局部存在明显的亮暗区域, 而采用机械加工皮料管试制的 MCP 满板亮暗程度基本一致, 目视几乎观察不出增益不均匀现象。



(a) 人工吹制管试制板



(b) 机械加工管试制板

图 8 MCP 增益均匀性测试图

Fig. 8 MCP gain uniformity test chart

3 结论

本文采用人工吹制的方法生产微通道皮料毛坯玻璃管, 通过选择合适的冷加工工艺将毛坯玻璃管精密整形, 实现皮料玻璃管的尺寸变化量有效控制在 1% 以内, 表面粗糙度 Ra 值有效控制在 $0.02 \mu\text{m}$ 范围内。通过制造 $\Phi 25/6$ 型微通道板制板试验, 试验结果表明, 减小皮料玻璃管的几何尺寸偏差在一定程度上提高了 MCP 阵列一致性、开口面积比一致性以及增益均匀性, 这对从事制造高增益、低噪声 MCP 的研究具有较好的借鉴作用。

参考文献:

- [1] JIANG Delong, FU Lichen, LI Ye. Advanced technology microchannel board(AT-MCP)[J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Precision Machinery, 1996,19(3): 26-28.
姜德龙, 富丽晨, 李野. 先进技术微通道板[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1996,19(3): 26-28.
- [2] PAN Jingsheng. Microchannel plates and its main characteristics[J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(5): 25-29.
潘京生. 微通道板及其主要特征性能[J]. 应用光学, 2004, 25(5): 25-29.
- [3] SHYMANSKA A. Numerical analysis of electron optical system with microchannel plate[J]. Journal of Computational Electronics, 2011, 10(3): 57-60.
- [4] PAN Jingsheng, SHAO Aifei, SUN Jianning. Analysis of the effect of ion feedback of MCP on performance upgrade of image intensifier and exploration of improvement ways[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(4): 327-332.
潘京生, 邵爱飞, 孙建宁. 微通道板的离子反馈对像增强器性能升级的影响分析及改进途径探究[J]. *红外技术*, 2015, 37(4): 327-332.
- [5] ZHANG Yang, WANG Yun, JIA Jinsheng. Research progress in glass for microchannel plates[J]. Materials Reports, 2017, 31(S1): 301-304.
张洋, 王云, 贾金升. 微通道板用玻璃材料的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(S1): 301-304.
- [6] LIU Shulin, LI Xiang, DENG Guangxu. Development of microchannel plate with low noise and high gain[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(6): 552-557.
刘术林, 李翔, 邓广绪. 低噪声、高增益微通道板的研制[J]. 应用光学, 2006, 27(6): 552-557.
- [7] FU Wenhong. The reseach of theory, experiment and testing technology on enlarging MCP' sport[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
傅文红. MCP 扩口工艺的理论、实验与测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [8] FU Wenhong, CHANG Benkang. Funnel shaped pores of low noise micro-channel plate[J]. Vacuum Science and Technology, 2004(1): 24-26.
傅文红, 常本康. 低噪声MCP的结构研究[J]. 真空科学与技术学报, 2004(1): 24-26.
- [9] FU Wenhong, CHANG Benkang. A research into the effect of funnel MCP on the relationship between current gain and noise figure[J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(5): 22-24.
傅文红, 常本康. 扩口微通道板对电流增益和噪声因子关系的影响[J]. 应用光学, 2004, 25(5): 22-24.
- [10] FU Wenhong, CHANG Benkang, GAO Ping. The research of a funnel shaped micro-channel plate[C]//Proceedings of the 5th International Vacuum Electron Sources Conference. USA: IEEE, 2004.
- [11] LI Dan, ZHU Yufeng, ZHAO Huimin, et al. Research on noise factor characteristic of micro-channel plat[J]. Infrared Technology, 2017, 39(11): 1066-1070.
李丹, 朱宇峰, 赵慧民, 等. MCP 噪声因子特性研究[J]. 红外技术, 2017, 39(11): 1066-1070.
- [12] LI Han, GUO Qilei. Application of diamond in optical high speed cold working[J]. *Superhard Materials Engineering*, 2017, 29(2): 44-51.
李翰, 郭琪磊. 金刚石在光学高速冷加工中的应用[J]. *超硬材料工程*, 2017, 29(2): 44-51.
- [13] LI Ping. Research on mechanism, technology and engineering application of high efficiency, precision and low damage grinding of brittle optical materials[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
李平. 脆性光学材料高效精密低损伤磨削加工机理、工艺及工程应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [14] LU Zhong, CHEN Yang. Research and development of chemical polishing slurry[J]. *Semiconductor Technology*, 2009, 34(12): 1157-1161.
陆中, 陈杨. 化学机械抛光浆液研究进展[J]. *半导体技术*, 2009, 34(12): 1157-1161.
- [15] Northwest Institute of Light Industry. Glass technology[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2006.
西北轻工业学院. 玻璃工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2006.
- [16] WANG Bo. Research on processing technology and detection technology of single crystal silicon super smooth optical element[D]. Changchun: Master's thesis of Changchun University of Technology, 2005.
王波. 单晶硅超光滑光学元件加工工艺及检测技术的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2005.