doi: 10. 11933 / j. issn. 1007-9289. 20210929001

细长管内表面镀 Cu 过程中的空心阴极辉光电

高凯晨 刘仕远 巩春志 田修波

(哈尔滨工业大学大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150001)

摘要:为了在细长管内壁获得质地均匀的 Cu 膜层,采用射频耦合直流空心阴极放电的方法,研究在长度 200 mm、内径 6~12 mm 的细长管内沉积 Cu 薄膜时的放电情况。通过探究改变耦合直流电压、射频电压、中频电压以及管内径和测量管内轴向不同位置带来的放电影响情况,获得最佳的放电参数。研究发现,耦合直流电压越高、射频功率越高,则放电过程中的Ar*、Ar⁺、Cu⁺活性粒子数量越多;增大中频电压,Ar*和 Cu⁺光谱峰值强度呈现 "V"字形,即先降低后升高,Ar⁺光谱峰值强度在 0~40 V 时处于稳定的状态,在 40 V 开始上升,并且在 60 V 之后快速上升;管内径 10 mm 时放电效果最佳,在内径为 6 mm 到 10 mm 的管内 Ar*、Ar⁺、Cu⁺粒子数目增多,当内径到达 12 mm,三种活性粒子迅速减少。通过对 200 mm 长、10 mm 内径管内不同轴向位置的测量,发现细长管中部(100 mm)放电强度高于管口(10 mm)和管尾(190 mm)。 关键词:细长管空心阴极、耦合直流电压、射频电压、中频电压、管内径

Glow Discharge of Hollow Cathode During Cu Plating on Thin Tube Surface

GAO Kaichen LIU Shiyuan GONG Chunzhi TIAN Xiubo (College of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to obtain uniform Cu film in the inner wall of a slender tube, the discharge of Cu film deposited in a 200 mm long tube with an inner diameter of $6 \sim 12$ mm is studied by using Radio Frequency (RF) coupled Direct Current(DC) hollow cathode discharge. The best discharge parameters are obtained by exploring the influence of changing coupling DC voltage, RF voltage, Intermediate frequency (IF) voltage, tube diameter and measuring tube axial position. According to the experiment, the higher the coupling DC voltage and rf power, the more Ar*, Ar⁺, Cu⁺ active particles in the discharge process. With the increase of intermediate frequency voltage, the peak intensity of Ar* and Cu⁺ spectra shows a "V" shape, that is, it decreases first and then increases. Ar⁺ spectra are in a stable state from 0 to 40 V, and begin to rise at 40 V, and rise rapidly after 60 V. When the inner diameter of the tube is 10 mm, the discharge effect is the best, the number of Ar*, Ar⁺, Cu⁺ particles increases in the tube from 6 mm to 10 mm, and the three active particles decrease rapidly when the inner diameter reaches 12 mm. It is found that the discharge intensity in the middle of the slender tube (100 mm) is higher than that at the mouth (10 mm) and the tail (190 mm).

Keywords: hollow cathode of slender tube; coupled direct current voltage; radio frequency voltage; intermediate frequency voltage; tube diameter

0 前言

管状件工件被广泛应用于石油化工、军械枪炮、 发动机轴承、建筑医疗器械、测试设备、能源、电

20210929 收到初稿, 20221015 收到修改稿

力等多个领域^[1-3]。相较于外表面,管件内表面往往 承担传输介质的功能,在使用过程中会由于腐蚀、 烧灼、氧化、摩擦磨损等原因产生失效,造成严重 损失^[4-6]。仅仅依靠基体材质进行强化处理不能满足 实际应用性能,如何通过表面处理工艺对细长管内 表面材质进行处理,改善其硬度、强度、抗摩擦磨 损性、抗烧蚀性、抗氧化性、耐腐蚀性、抗摩擦磨 损性等对于实际应用意义重大[7]。

目前针对于细长管内表面的改性处理研究较 少,且集中在 10 mm 以上,对于内径小于 10 mm 的细长管内表面改性研究的不成体系。现有的技术 不能很好地满足改性需求,电镀会产生大量的污染 废液^[8-10];激光强化设备昂贵不便量产^[11-13]。针对 上述问题,采用应用广泛的等离子体表面改性^[14]方 法将改性介质均匀地传输到工件内表面。具体试验 采用空心阴极放电,具有低电压、大电流、离化率 高、粒子能量大等优点,此方法由德国试验物理学 家帕邢 (PASCHEN)^[15-16]在 1916 年报道和使用。 Cu 薄膜为光泽亮丽的紫红色,当 Cu 沉积于管内壁 能直观地观察所得膜层均匀性,同时 Cu 薄膜导热 性导电性良好、抗电迁移能力高等优良性能^[17]使其 在建筑装饰等领域应用广泛,结合试验需求最终确 定为镀膜层金属。

为了在内径为 6~12 mm 的管内镀 Cu 膜,试验 研究在空心阴极放电时改变耦合直流电压、射频电 压、中频电压以及管内径和管内轴向不同位置对于 放电的影响情况,以期获得最优的工艺参数指导在 管内壁获得性能良好的 Cu 膜。

1 试验方法

1.1 仪器设备

试验的主要设备由三台电源以及真空炉体组 成。射频电源型号为 JG-1K-C,由长春市星达电子 仪器厂生产,电压范围为0~3000V可以调节, 负责离化气体粒子;直流电源负责与射频电源耦合, 使得耦合后的电压降低为负偏压,电压为0~250V; 第三台为中频电源,负责用来连接被处理管,以吸 引金属正离子附着在内表面上,40kHz固定频率, 电压范围为0~950V可以调节,占空比调整范围 10%~80%。电源正极均由炉内导线连接到接地端, 负极负责连接设备以提供辉光放电所需的电压,由 于所有的电压值都为负,下文用绝对值形式表示以 方便理解。其余装置由送气系统、并联抽气系统、 水冷系统、控制系统和计时系统组成。真空炉是高 600 mm,内径 800 mm,外径1000 mm的圆柱体, 炉内有多个电极用于连接电源,整体连地。

放电辉光光谱测量使用荷兰 Avantes 公司生产的 AvaSpec-2048 型号光谱仪光缆。其波长分辨率为 0.1 nm,捕捉波长 300~800 nm,杂散光小于 0.1%,采集光谱时探头放置于观察窗处,消除环境光后正 对放电区域进行光谱采集。使用 PLASUS SpecLine

软件在电脑端导出光谱数据进行绘图分析。

1.2 试验装置

细长管内壁镀膜的主要难点在于改性介质很难 均匀输运到细长管内部,气体放电过程中放电受限 于帕邢定律^[1],公式如式(1)所示

$$U_{b} = \frac{Bpd}{\ln\left\{\frac{Apd}{\ln\left(1+\frac{1}{r}\right)}\right\}}$$
(1)

式中, *U_b*为击穿电压 (kV); *d*为电极距离 (cm); *p* 为气压。

在两平行电极间想要击穿气体介质进行放电,管 长越长管径越细,所需击穿电压U_b数值越高越^[18]。

对比传统的等离子体管内表面改性如三极溅 射,放电区域仅为靶材和被处理管间径向的圆环形 区域,针对此难题,试验采用将径向放电改为轴向 放电来解决,将溅射靶材通过射频管道固定进行导 气和通电,射频管前端正对阳极杆,两者形成空心 阴极放电,在被处理管内形成辉光放电从而实现镀 膜改性。试验装置如图1所示。射频管为不锈钢材 质外径4mm,与射频耦合直流电源相连接,管口放 入一段外径3mm、内径1.5mm的Cu管作为阴极 靶材与阳极杆间进行放电。惰性气体从管口吹入射 频管内提供Ar⁺。



Fig. 1 Schematic diagram of rf hollow cathode

discharge device

细长管内射频空心阴极放电机理如图2所示。 空心阴极放电时,Ar原子被空心阴极区高速振荡 的电子撞击进而离化,形成高密度Ar⁺;在射频电 压的作用下Ar⁺撞击到Cu靶材表面,溅射形成Cu 原子和Cu⁺;Cu⁺在提供负偏压的中频电源的吸引 下沉积到被处理管内表面;Cu原子一部分在惯性 和重力的作用下直接沉积在细长管内表面,另一 部分被高密度的等离子体再次离化,吸引到被处 理管上。





Fig. 2 Schematic diagram of RF hollow cathode discharge mechanism

1.3 试验方法

由于管内放电电流数值变化较快,不易测量, 故使用光谱仪对管内辉光放电等离子体进行测量。 等离子体数量和光谱峰值强度的公式见式(2)^[19]

$$I = KA_{mn}hvN_{o}e^{\frac{-Em}{kT}}$$
(2)

式中,*T*为等离子体温度(K);*k*为玻尔兹曼常数; *hv*为光子能量(eV);*N*₀为粒子的数目;*A*_{mn}为跃 迁几率(s⁻¹);*K*为统计系数。

由式(2)可知粒子数量和光谱峰值强度成正比,试验中使用光谱仪测量等离子体密度,定量监测管内离化及 Cu 靶的溅射放电情况。

测量位置如图 3 所示,通过移动阳极杆和射频 管使得在管内不同位置形成空心阴极放电,光谱探 头透过观察窗获得测量数据。试验主要分为两步: Ar 离子清洗和 Cu 薄膜沉积时光谱的测量。







Ar 离子清洗:使用夹板固定不锈钢片(基片), 竖直放立在放电区域的侧面,同时使得基片平行于 阳极杆和射频管。经过初抽、深抽使得炉内气压达 到 6 mPa,通过射频管到将 Ar 气通入炉体内使得放 电区域气压保持在 3.0~5.0 Pa。首先接通射频电源, 铜管与阳极杆间形成空心阴极放电区域,激发出大 量等离子体。将射频电源电压调节为 1 500 V,输出 功率 100 W,体系中大部分带电粒子为 Ar⁺,被镀 金属含量较少。此时开启中频电源,占空比从0升 至70%,电压调节到950 V。由于被处理管内表面 存在氧化膜,Ar⁺在中频电源提供的负偏压的吸引下 轰击在氧化膜上,进行清洗。Cu 元素熔点较低,如 采用高电压高占空比进行清洗会造成 Cu 管在几分 钟内融化,使得试验失败,最终选用电压 200 V, 占空比 30%进行清洗、具体参数如表1所示。

表1 细长管内表面 Ar 离子清洗的工艺参数

 Table 1
 Process parameters of Ar ion cleaning on slender

 tube surface

RF power / W	IF votage / V	Duty ratio / %	Ar air pressure / Pa	Time / min
80	200	30	3	15

2 结果与讨论

试验时保持真空炉体内气压为 3 Pa, 通入 Ar 气作为放电介质,试验中通过改变耦合直流电压数 值、管内径和管内轴向位置、射频输出功率、中频 电压、通过测量放电光谱,分析不同参数下管内等 离子体放电。

2.1 耦合直流电压的影响与射频功率的影响

图 4a 所示为炉体气压为 3 Pa 的纯 Ar 氛围下, 调节射频功率到120W,中频电压为80V,占空比 为10%,在内径为10mm的细长管内进行辉光等离 子体放电, 直流电压值分别为 100 V、150 V、200 V 和 250 V。图 4b 所示为 120 W、130 W、140 W 和 150 W 射频功率下内径 10 mm 的细长管内空心阴极 放电区域辉光光谱图。如果采用高于 120 W 的功率 进行试验,因铜的熔点较低,试验放电温度过高导 致 Cu 管融化,因此采集光谱后需要立即关闭射频 电源,待到管温度降低后再次测量下一组光谱。从 两组对比图中可以看出,耦合直流和射频功率对于 管内等离子的影响基本相同。即随着耦合直流电压 和射频功率的升高 Ar*、Ar⁺和 Cu⁺的光谱峰强度均 升高,但在耦合直流中Ar*的增长速度明显高于Ar⁺ 和 Cu^+ 。Ar*在 200 V 之后上升速度有所减缓,Ar⁺ 在 150 V 到 200 V 之间上升速度较为缓慢, Cu^+ 上升 速度基本保持不变。改变射频电源的输出功率使得 三种活性粒子都有一定程度的上升,对比耦合直流 电压不是十分明显, Cu⁺ 在功率由 130 W 变化到 140 W 时增长最为明显, Ar⁺变化也很大, 峰值强度 数值由3150上升到了3300。耦合直流电压以及射 频功率的提升使得 Ar 原子被激发的概率增加,更多 的Ar原子被激发,同时Ar⁺获得的初始动能也增加,

Ar⁺携带更高的初始动能轰击到 Cu 靶材,使体系中的 Cu⁺也增多。



图 4 细长管内不同耦合直流电压和不同射频功率下的 辉光光谱



2.2 中频电压的影响

采用 0、20 V、40 V、60 V 和 80 V 中频电压在 管内径 10 mm 的细长管内空进行放电。光谱图如图 5 所示。



Fig. 5 Glow spectra of a slender tube at different if voltages

图 6 所示为 Ar*、Ar⁺和 Cu⁺的光谱峰强度随 中频电压的变化趋势。中频电压由 20~80 V 调节 过程中, 三种粒子的光谱峰值强度呈现不同的趋 势。Ar*和 Cu⁺的光谱峰强度先降低再升高,Ar* 在0到60V时光谱峰下降,在60V之后上升, Cu⁺在中频电压为0时峰值强度最大,Cu⁺的光谱 峰强度在 0~40 V 时下降,在 40 V 之后上升,这 两种粒子的光谱峰强度都呈现"v"字形。Ar⁺光 谱则在 0~40 V 时都处于稳定的状态,在 40 V 开 始上升,在60V之后快速上升,三种粒子的光谱 峰强度呈图 6 所示变化趋势。这是由于等离子体 密度被中频电压所影响也是两方面的,一方面, 当中频电压较低时,中频电压所处的径向电场对 轴向的空心阴极放电具有一定的阻碍作用,这会 造成空心阴极放电减弱,活性粒子光谱峰强度降 低,管内整体等离子体密度较低,因此出现 Cu⁺ 和 Ar⁺光谱峰随中频电压的升高而降低的现象; 第二方面,当电压进一步升高至40V或更高时, 细长管与阳极杆间径向电场的增加使得细长管内 电子动能增加, 粒子之间的碰撞几率大幅提升, Cu 原子和 Ar 原子的二次离化增强,活性粒子数 量再次升高。





2.3 管内径的影响

图 7 所示为在真空室腔体为 3 Pa 的 Ar 气环境 下,保持射频功率 120 W,中频电压 80 V,占空比 10%,细长管内径分别选择 6 mm、8 mm、10 mm 和 12 mm 测量放电区域的辉光放电光谱。图 8 所示 为细长管内光谱峰值随管内径的变化趋势。细长管内 径对离化气体的空间约束起到至关重要的作用。一方 面,管径变小减小粒子碰撞区域,使相同数量的离化 粒子的碰撞概率增加。另一方面如式(3)所示

$$E = U / d \tag{3}$$

管内径的变小使径向电场的强度增加^[20]。离化的 Ar⁺ 和 Cu⁺在径向电场中被加速,溅射作用也增加,不仅 能够提高继续撞击其他粒子的概率,同时能增加膜层 质量。在径向电场的约束作用下,轴向区域的空心阴 极放电变的困难,Ar⁺和 Cu⁺的溅射和离化难度也增 加,从而导致等离子体密度降低。可以看到随着管内 径的变化, 三种粒子的强度均随着内径增大先升高后 降低,在 10 mm 都达到了最大值,值得注意的是虽 然三种粒子的光谱都在 12 mm 时下降, 但是不同于 Ar*和 Cu⁺, Ar⁺在 12 mm 处的光谱峰强度低于 6 mm 时的峰值强度。在细长管空心阴极放电过程中,径向 电场的约束作用会随着内径的增大而降低。内径从 6 mm 到 10 mm 时,径向电场约束轴向电场的效果大 于径向电场对于等离子体的离化促进作用。但是随着 管径变大径向电场的约束作用降低,轴向放电过程变 得较为顺畅,三种粒子光谱峰值上升。但当管内径超 过 10 mm 时,径向电场的约束作用迅速下降,放电 类似于平面放电模式,二次离化作用大大降低,光谱

峰值强度下降。







2.4 管内轴向位置的影响

图 9 选用内径 10 mm 管通过测量不同管内轴向 位置所得辉光放电的光谱图。分别取管口、中部和管 尾三个区域测量,以靠近真空室观察窗的位置作为基 准,选择距基准分别为 10 mm、100 mm、190 mm 的 距离进行测量。图 10 所示为 Ar*、Ar⁺和 Cu⁺三种活 性粒子在不同管内轴向位置的光谱峰值强度。从图中 可以看出 Cu⁺和 Ar*子在 100 mm 处光谱峰值大于 10 mm 和 190 mm 处, Ar⁺光谱最大值在 10 mm 处。 Ar*和 Ar⁺在 10 mm 处的光谱峰强度大于 190 mm 处, 而 Cu⁺光谱则相反,在 10 mm 处小于 190 mm 处的光 谱峰值。总体上,管中部(100 mm)放电强度高于管 口(10 mm)和管尾(190 mm),但差距并不太大。这 是由于管口和管尾径向的中频电场约束作用较弱,使 等离子体呈现聚拢状态能力较差,不能使大量的等离 子体进行二次离化,整个体系中的活性粒子数目降低。



图 10 细长管内光谱峰值随管轴向位置的变化趋势 Fig. 10 Variation trend of spectral peak value in slender tube with axial position

Distance / mm

3 结论与展望

(1) 耦合直流电压和射频电压越高,输入射频 管的能量增多,Ar*和Ar⁺溅射初始的能量越高,Ar* 数量增多最为明显,粒子间被碰撞的概率增加,体 系中被溅射出的Cu⁺数量也升高。耦合直流电压使 得总体耦合后的射频管电压在一个周期内为负的时 间增多,三种活性粒子密度均上升。

(2) 中频电压低于 40 V时,对于 Ar⁺粒子不起 促进作用,对于 Cu⁺和 Ar*起抑制作用,高于 40 V 之后才促进管内放电和离化。当电压较低时,被处 理管间和阳极杆之间的径向电场对射频空心阴极和 阳极杆之间的轴向放电存在一定的阻碍;当电压进 一步升高到 40 V 以上时,径向电场能够使管内活性 粒子获得额外的动能,碰撞概率增加二次离化粒子 也增多,促进三种活性粒子的生成,提高管内等离 子体密度。

(3) 管内径 10 mm 时放电效果最佳, 6 mm 到 10 mm 时三种粒子光谱强度呈上升状。内径越小则 径向电场对于空心阴极放电产生的轴向等离子体约 束作用越强,当内径到达 12 mm 时,则径向电场约 束作用降低,轴向等离子体减少,且对于 Ar、Cu 原子的二次离化作用因为径向距离变大也会降低, 造成 Ar*、Ar⁺、Cu⁺光谱强度均下降。

(4) 细长管中部(100 mm)放电强度高于管口 (10 mm)和管尾(190 mm),这是因为管口和管尾 的等离子体受径向电场的约束较低,径向电场所形 成的二次离化程度较小,同时中部进气气体在轴向 管内扩散更加均匀。后期可通过加入辅助阳极以及 增加气流初试速度等形式进行改进。

随着社会科技的进步,对于细长管工件内表面 要求日益提升,本研究为射频空心阴极初步验证了 可行性,未来仍需进一步深入探索。

参考文献

- [1] 秦子扬. 基于线结构光的管筒状零件内壁三维形貌重 构技术研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
 QIN Ziyang. Research on three-dimensional topography reconstruction technology of the inner wall of the tube parts based on linear structured light[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018. (in Chinese)
- [2] ZHANG Yishuo, WANG Dewu, LIU Yan, et al. Distribution characteristics of falling film thickness around a horizontal corrugated tube[J]. International

Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 154: 119773.

- [3] 韩永超,张世伟,韩进. 管状工件内表面真空镀膜方法的研究进展[J]. 真空, 2012, 49(1): 39-44.
 HAN Yongchao, ZHANG Shiwei, HAN Jin. Research and development of coating methods on the inner surface of tubular workpiece[J]. Vacuum, 2012, 49(1): 39-44. (in Chinese)
- [4] SOPOK S, RICKARD C, DUNN S. Thermal chemical mechanical gun bore erosion of an advanced artillery system part one: theories and mechanisms[J]. Wear. 2005, 258: 659-670.
- [5] CHUNG D Y, SHIN N, OH M, et al. Prediction of erosion from heat transfer measurements of 40 mm gun tubes[J]. Wear, 2007, 263: 246-250.
- [6] 苑大威,周光磊,李晓寅,等. 弹头挤进枪管过程膛线
 应力仿真研究[J]. 兵器装备工程学报,2020,41(8):
 30-35.

YUAN Dawei, ZHOU Guanglei, LI Xiaoyin, et al. Simulation study on rifling stress in the process of bullet engraving into barrel[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(8): 30-35. (in Chinese)

- [7] 赵彦辉, 贾莹, 于宝海, 等. 管状构件内表面真空镀膜 方法研究进展[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 118-125, 149.
 ZHAO Yanhui, JIA Ying, YU Baohai, et al. Progress on the study of vacuum coating methods for the Inner surface of tubular workpiece[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 118-125, 149. (in Chinese)
- [8] 林锐,刘朝辉,王飞,等. 镁合金表面改性技术现状研究[J]. 表面技术,2016,45(4):124-131.
 LIN Rui, LIU Chaohui, WANG Fei, et al. Development of corrosion surface modification technology for magnesium alloys[J]. Surface Technology, 2016, 45(4):124-131. (in Chinese)
- [9] 田超青,樊新民,张越,等. 镀铬衬管钢烧蚀的失效分析[J]. 机械工程材料, 2000, 24(3): 43-46.
 TIAN Chaoqing, FAN Xinmin, ZHANG Yue, et al. The erosion analysis of a chromium-plated alloy of gun barrel[J]. Materials For Mechanical Engineering, 2000, 24(3): 43-46. (in Chinese)
- [10] LIN K M, WANG C M A Study on the deposite uniformity of hard chromium plating on the interior of small-diameter tubes[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 114(2-3): 213-223.
- [11] 姚振强, LAWRENCE Y Y, 王飞, 等. 先进激光制造 技术研究新进展[J]. 机械工程学报, 2003, 39(12): 57-61.

YAO Zhenqiang, LAWRENCE Y Y, WANG Fei, et al. Progress in advanced laser assisted manufacturing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(12): 57-61. (in Chinese)

- [12] 李龙. 小孔构件激光冲击强化研究及其特性分析[D]. 安徽: 安徽工业大学, 2016.
 LI Long. Study on laser shock strengthening of small hole component and its characteristic analysis[D]. Anhui: Anhui University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [13] 王扬,邓宗全,曲存景. 抽油泵整体泵筒激光表面淬火[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(4): 40-42.
 WANG Yang, DENG Zongquan, QU Cunjing. Laser surface hardening for integral barrel tubing pumps[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31(4): 40-42. (in Chinese)
- [14] 邓乔元,李延涛,经佩佩,等.等离子体表面改性用于 提高人工关节、椎间盘耐磨耐蚀性的研究进展[J].中国 表面工程,2019,32(5):1-12.
 DENG Qiaoyuan, LI Yantao, JING Peipei, et al. Research progress on wear and corrosion resistance of artificial joint and disc by plasma surface modification[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(5): 1-12. (in Chinese)
- [15] 张以忱. 第二十讲真空离子镀膜[J]. 真空, 2019, 56(3): 78-80.

ZHANG Yichen. Vacuum fon coating[J]. Vacuum, 2019, 56(3): 78-80. (in Chinese)

[16] 孙薇薇,田修波,李慕勤,等. 偏压对自源笼形空心阴极放电制备 Si-DLC 薄膜结构和性能的影响[J]. 中国表面工程,2019,32(3):69-79..
SUN Weiwei, TIAN Xiubo, LI Muqin, et al. Effects of bias voltage on structure and property of Si-DLC films fabricated by Self-source cage type hollow cathode discharge process[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(3):69-79. (in Chinese)
[17] 雒向东.磁控溅射 Cu 膜的表面形貌演化研究[J]. 半导

- 体技术, 2007(2): 138-141. LUO Xiangdong. Study on surface morphology evolution of magnetron sputtering Cu films[J]. Semiconductor Technology, 2007(2): 138-141. (in Chinese)
- [18] 侯清润, 茅卫红, 陈宜保. 气体放电实验与帕邢定律[J]. 物理实验, 2004(1): 3-4, 8.
 HOU Qingrun, MAO Weihong, CHEN Yibao. Gas discharge experiment and Paschen's law[J]. Physical Experiment, 2004(1): 3-4, 8. (in Chinese)
- [19] 吴忠振. 高功率脉冲磁控放电及离子注入与沉积 CrN 薄膜研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

WU Zhongzhen. Growth of CrN films by plasma ion implantation deposition based on high power pulsed magnetron discharge[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)

[20] 孔维星. 细长不锈钢管的辉光放电特性及内壁氮化研 究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.

KONG Weixing. Glow discharge in long and thin stainless steel tube and nitrding of inner wall[D]. Harbin: Harbin

Institute of Technology, 2019. (in Chinese)

作者简介:高凯晨,男,1998 年出生,硕士研究生。主要研究方向为 表面改性。

E-mail: 57304745@qq.com

巩春志(通信作者),男,1979年出生,博士,副教授,硕士研究生导师。主要研究方向为表面改性、冷喷涂。

E-mail: chunzhigong@163.com