

身管弹-线膛预留镀铬层厚度与镀铬沉积速率匹配设计方法

张必良^{1,2}, 刘榜劳¹, 刘兵¹, 何孟林¹, 樊黎霞²

(1. 重庆建设工业(集团)有限责任公司, 重庆 400054;

2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要:以法拉第电解定律为基础,运用二次电流分布规律、镀铬电流密度与电流效率关系,建立了镀铬过程中远阴极相对于近阴极的金属铬沉积速率关系,形成了身管弹-线膛各部位机加预留镀铬层厚度计算公式,并通过试验论证了该方法的正确性,满足工艺及产品技术要求,为设计身管弹-线膛各部位预留镀铬层厚度提供了理论方法。

关键词:身管;镀铬;匹配性;设计方法

本文引用格式:张必良,刘榜劳,刘兵,等.身管弹-线膛预留镀铬层厚度与镀铬沉积速率匹配设计方法[J].兵器装备工程学报,2019,40(S2):114-117.

Citation format:ZHANG Biliang, LIU Banglao, LIU Bing, et al. Design Method of Working Allowance for Chroming Based on the Relationship of Chromium Plate Thickness and Deposition Rate[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019,40(S2):114-117.

中图分类号: TG178

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2019)S2-0114-04

Design Method of Working Allowance for Chroming Based on the Relationship of Chromium Plate Thickness and Deposition Rate

ZHANG Biliang^{1,2}, LIU Banglao¹, LIU Bing¹, HE Menglin¹, FAN Lixia²

(1. Chongqing Jianshe Industry (Group) Co., Ltd., Chongqing 400054, China;

2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The chromium plating is usually finished for both rifle and chamber at one process. Since the chamber is constituted by several cones, the chromium plate thickness is different for the cones. In order to meet the final design size of the chamber and rifle, the relationship of the chromium plate thickness for each cone should be investigated so that the right machining dimension tolerance is given. Base on the Faraday law, the distribution of the second electric current and the chroming current density and efficiency are used to build up the relational expression of the chromium metal deposition rate between the distant cathode and the near cathode. The calculation formula for working allowance of rifle and chamber are all deduced, and the formula are verified by the experiment. The paper provide a design method of working allowance for chroming and the process is meet the gun barrel technical and manufacturing requirements.

Key words: rifling barrel; chromium plating; matching; design method

收稿日期: 2019-06-20; 修回日期: 2019-08-01

基金项目: 国防基础科研项目(2017年)

作者简介: 张必良(1987—), 男, 工程师, 硕士研究生。E-mail: 445635290@qq.com。

通讯作者: 樊黎霞(1965—), 女, 教授, 主要从事兵器制造工艺研究, E-mail: fanlixia151@njjust.edu.cn。

金属铬是一种略带天蓝色的银白色金属,具有硬度高、耐磨性好、抗腐蚀性强等特点,广泛应用于齿轮、仪器仪表、汽车及军工行业等^[1]。

镀铬是一种传统的工艺,应用长达 90 多年。早在 1856 年,德国发明了从铬液中沉积金属铬的方法。1926 年,美国 C. G. Fink 教授等人发明了从含有硫酸的铬酸液中沉积出光亮铬的专利。此后,镀铬工艺才真正在工业中得到广泛应用^[2]。

我国身管镀铬技术是 20 世纪 50 年代从苏联引进,至今已应用 60 多年。我国最初制造的身管是不镀铬的,没有镀铬层的身管容易腐蚀,且使用寿命较低。1955 年,我国二机部工作通讯委员会出版了《身管镀铬》,1980 年以后,我国已培养出很多镀铬专家,身管镀铬技术得到快速发展,并逐步发现了多种镀铬新技术^[3]。尽管如此,身管镀铬仍然存在诸多问题。

身管是自动武器的关键零部件,需要极高的加工精度。身管弹-线膛镀铬层厚度及镀铬层厚度均匀性是影响自动武器射击精度和使用寿命的重要因素,需要严格控制。

由于身管弹-线膛结构的复杂性,以及客观存在的镀铬液分散能力差、电流效率低、电镀时间长、镀铬液各成分离子浓度难以实时控制等原因,镀铬层厚度越厚,铬层厚度均匀性越差,易产生锥差、椭圆度、“狗骨状”形态等缺陷,使得身管弹-线膛各锥体机加后需预留的镀铬层厚度设计难以预测^[4]。2011 年,张三元撰写了《电镀层均匀性及镀液稳定性——问题与对策》,通过采用二次电流分布规律等对电镀层均匀性进行了分析^[5]。但是到目前为止,还没有专门针对身管内膛各锥体镀铬层厚度的理论设计方法。长期以来,身管内膛各锥体需预留的镀铬层厚度基本都是靠工厂的老师傅凭借丰富的实践经验进行设计,并通过后续反复多次电镀试验来修正原设计值。该方法准确性差,需要反复修正设计值,试验周期长、效率低,难以满足现在小批量、多品种、快速换产柔性生产模式。为解决这些问题,本文给出了身管弹-线膛机加预留镀铬层厚度与镀铬沉积速率匹配设计方法。

1 身管镀铬过程简介

身管内膛镀铬时,如图 1 所示,一般以身管为阴极,铅-锡合金或铅-铈合金为阳极,通电后,在电流作用下,电镀液中的六价铬离子在身管内膛表面被还原成金属铬,并逐渐沉积于此,形成镀铬层。

根据法拉第电解定律,电镀过程中析出金属的质量与所通过的电流强度、电流效率及电流时间成正比,即

$$M = C I \eta T_i \quad (1)$$

式中: M 为金属质量; C 为电化当量; I 为电流强度; T_i 为电流时间; η 为电流效率。

根据物质质量与体积、密度物理关系可知

$$M = \rho V = \rho \Delta S t \quad (2)$$

式中: ρ 为金属密度; V 为析出金属的体积; ΔS 为单位面积; t 为析出金属的厚度。

又由电流强度与电流密度关系可得

$$I = \Delta S i \quad (3)$$

式中: i 为电流密度。

将式(2)式(3)代入式(1)可得

$$t = \frac{C_i T_i \eta}{\rho} \quad (4)$$

根据式(4)可知,影响电镀层厚度的主要因素有电流强度密度、电流时间及电流效率。

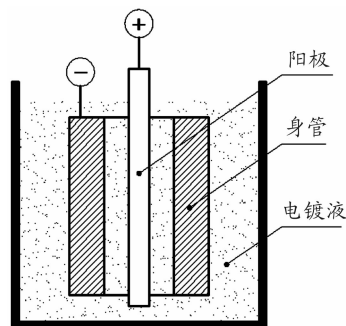


图 1 身管镀铬示意图

2 身管弹-线膛机加预留镀铬层厚度设计方法

如图 2,身管弹-线膛有多个锥体,若直接利用(4)式计算弹-线膛各锥体铬层厚度,则需要计算或测量出各个锥体相应部位的实际电流密度大小、电流效率、电流时间以及电化当量、铬的密度等参数。待测量的参数越多,则分析结果的误差也会越大。因此,使用该公式直接计算身管弹-线膛各锥体需要预留的镀铬层厚度是欠妥的。

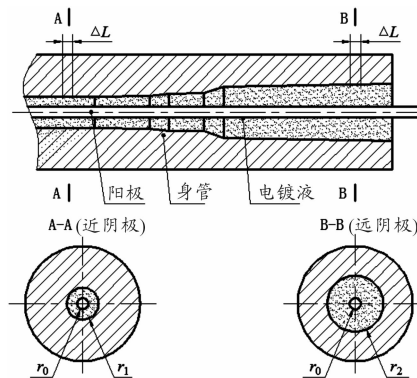


图 2 身管弹-线膛镀铬过程示意图

为此,本文用比值法来计算弹-线膛各锥体部位机加需预留的镀铬层厚度。

如图 2,假设近阴极 A-A 截面处镀铬层厚度为 t_1 ,远阴

极 B-B 截面处镀铬层厚度为 t_2 。通常情况下,身管内膛镀铬采用的是弹-线膛同步镀铬法,也就是在电镀过程中身管各锥体受到的电流作用时间 T_i 是相同的。因此,有

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{i_1 \eta_1}{i_2 \eta_2} \quad (5)$$

由式(5)可知,身管弹-线膛各部位铬层厚度之比与电流密度和电流效率的积成正比。

2.1 身管弹-线膛各部位电流密度之比

2.1.1 一次电流分布规律

镀铬槽中 CrO_3 、 H_2SO_4 水溶液也是导体,同样符合欧姆定律。所以,当电压降 U 一定时,影响阴极表面电流强度 I 的主要因素是电阻 R 。即

$$I = \frac{U}{R}$$

如果将连接阴、阳极之间的镀铬溶液视为导电性均匀的理想导体,那么可以知道近阴极与远阴极电流强度之比与溶液的电阻之比成反比,即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{\rho_0(r_2 - r_0)}{\rho_0(r_1 - r_0)} = \frac{r_2 - r_0}{r_1 - r_0}$$

式中: I_1 、 I_2 为近、远阴极电流强度; R_1 、 R_2 为近、远阴极电阻; r_1 、 r_2 为近、远阴极半径; r_0 为阳极钢丝半径; ρ_0 为溶液的导电率。

2.1.2 二次电流分布规律

由文献[4-5]可知,实际上镀铬过程中电解质溶液的导电性与金属导体的导电性有明显的差异,当电流通过电解质溶液时,在电极表面会存在不同程度的极化现象,造成溶液中电流出现二次分布,这也是最为接近实际的电流分布情况。根据一次电流分布规律,可以推导得知二次电流分布的电流强度之比为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{(r_2 - r_0) + \kappa \frac{\Delta\varphi}{\Delta I}}{(r_1 - r_0) + \kappa \frac{\Delta\varphi}{\Delta I}} \quad (6)$$

式中: $\kappa \frac{\Delta\varphi}{\Delta I}$ 为阴极极化度。

由式(6)可知,远、近阴极电流强度之比与距离和阴极极化度的一次多项式成反比。

2.1.3 电流密度比

电流密度就是单位面积上的电流强度,对于内孔表面电流密度可表示为

$$i = \frac{I}{S} = \frac{I}{2\pi r \cdot \Delta L}$$

在远、近阴极 ΔL 长度范围内,电流密度之比为

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{I_1/S_1}{I_2/S_2} = \frac{I_1 S_2}{I_2 S_1} = \frac{(r_2 - r_0) + \kappa \frac{\Delta\varphi}{\Delta I}}{(r_1 - r_0) + \kappa \frac{\Delta\varphi}{\Delta I}} \cdot \frac{r_2}{r_1} \quad (7)$$

2.2 身管弹-线膛各部位电流效率之比

镀铬时,电源提供至阴极的电子并不是全部用于主反应

还原金属离子,还有相当一部分电子消耗在副反应上,如电解水,即电流的利用率往往达不到 100%,甚至非常低。因此,存在电流利用率的问题,此处称之为电流效率。

根据日本工业标准 H9123,可知镀铬中电流效率 η 与电流强度 I 和温度 T 的关系见表 1 所示。

表 1 电流效率与电流强度和温度的关系

$\eta/\%$ I/dm^2	$T/^\circ\text{C}$				
	25	35	45	55	65
10	24	13	12	10	-
20	32	19	16	13	-
30	36	25	18	16	12
40	-	34	19	17	13
50	-	36	21	18	15
60	-	-	22	19	16

一般,身管镀铬工艺所采用的电流强度一般在 $30 \text{ A}/\text{dm}^2$ 左右,电镀液温度一般在 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。考虑到电镀时身管最大远阴极和最小近阴极的距离之比一般不超过 2.5,由式(7)可知,身管弹-线膛各部位电流效率分布在表 1 中 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 所在列的 10% 到 16% 这个区间内。由此,可近似认为电流效率与电流强度是成正相关的,即

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{16\% + (i_2 - i_1) \frac{16\% - 10\%}{30 - 10}}{16\%} = 1 + \frac{0.3I_1}{16} \left(\frac{i_2}{i_1} - 1 \right)$$

式中: η_1 、 η_2 为近、远阴极电流效率。

根据实际镀铬工艺参数,可将上式中 I_1 取近似值为 $30 \text{ A}/\text{dm}^2$,上式可简化为

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = 1 - \frac{9}{16} \left(1 - \frac{i_2}{i_1} \right) \quad (8)$$

因此,可以认为远、近阴极电流效率之比是电流强度之比的一次多项式。

2.3 金属铬沉积速率及镀铬层厚度

由式(1)可得沉积速率为

$$v = \frac{dt}{dT_i} = \frac{Ci\eta}{\rho}$$

由此可得,身管弹-线膛远近阴极的金属铬沉积速率之比为

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{i_2}{i_1} \cdot \frac{\eta_2}{\eta_1}$$

由式(4)可得,身管弹-线膛远近阴极的金属铬沉积厚度之比为

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{i_2}{i_1} \cdot \frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{v_2}{v_1} \quad (9)$$

当已知某近阴极铬层厚度 t_1 以及远近阴极半径值 r_1 、 r_2 以及阳极钢丝半径 r_0 ,就可以通过式(7)~式(9)联立计算得到远阴极沉积的铬层厚度。

3 设计实例及验证

下面以某身管为例,对弹-线膛机加预留的镀铬层厚度进行设计和试验验证。

已知某身管内膛镀铬后的成品尺寸、最小单边铬层厚度、阳线直径公差、镀铬阳极钢丝半径以及阴极极化度,具体见表2,需要设计弹-线膛机加预留镀铬层厚度及弹-线膛各锥体机加时的直径大小。

表2 某身管弹-线膛尺寸

序号	项目	数值
1	阳线直径 $D_{阳}/mm$	5.56
2	阴线直径 $D_{阴}/mm$	5.67
3	弹膛一锥大端直径 D_{00}/mm	9.63
4	弹膛一锥小端直径 D_{10}/mm	9.05
5	弹膛二锥小端直径 D_{20}/mm	6.5
6	弹膛三锥小端直径 D_{30}/mm	6.45
7	弹膛四锥小端直径 D_{40}/mm	5.793
8	弹膛五锥小端直径 D_{50}/mm	5.56
9	阳线直径公差 P/mm	+0.02
10	最小单边铬层厚度 δ/mm	0.01
11	阳极钢丝半径 r_0/mm	1.05
12	阴极极化度 $\kappa \frac{\Delta\varphi}{\Delta I}$	10

分析:考虑到身管的工况,身管阳线与子弹弹头为过盈配合,阳线表面承受弹丸和火药高温、高压、高速冲刷挤压磨损作用,必须保证阳线上的铬层厚度足够厚。所以,此处以阳线直径为设计基准,也就是将阳线表面视为近阴极,其他各锥体表面视为远阴极。

解:① 确定设计基准

首先,确定阳线表面铬层厚度。根据已知条件可以知道,机加时在阳线表面应预留的最小铬层厚度为

$$t_{阳} = 2\delta + P = 2 \times 0.01 + 0.02 = 0.04 \text{ mm}$$

② 计算弹膛其他各锥体铬层厚度

结合上述①中计算结果,联立式(7)式(8)式(9),可得弹-线膛各锥体铬层厚度,计算结果见表3。

③ 弹-线膛各锥体机加时的直径大小 D_{i1}

易知,身管弹-线膛机加直径等于身管内膛成品尺寸与镀铬层厚度之和,即

$$D_{i1} = D_{i0} + t_i$$

由此,计算各锥体机加直径 D_{i1} 见表3。

根据表3中的计算结果,对身管进行机械加工和镀铬试验,通过对10件身管进行镀铬试验,镀铬后经检测,合格9件,不合格1件(前处理不当,导致局部无镀层),合格率为

90%,效果非常理想,满足工艺及产品技术要求。图3为镀铬身管解剖图。

表3 某产品身管弹-线膛镀铬层厚度及机加直径

序号	项目	mm		
		成品尺寸	机加尺寸	铬层厚度
1	阳线直径 $D_{阳}$	5.56	5.60	0.04
2	阴线直径 $D_{阴}$	5.67	5.709	0.039
3	一锥大端直径 D_{00}	9.63	9.644	0.014
4	一锥小端直径 D_{10}	9.05	9.066	0.016
5	二锥小端直径 D_{20}	6.5	6.53	0.030
6	三锥小端直径 D_{30}	6.45	6.48	0.030
7	四锥小端直径 D_{40}	5.793	5.83	0.037
8	五锥小端直径 D_{50}	5.56	5.6	0.04

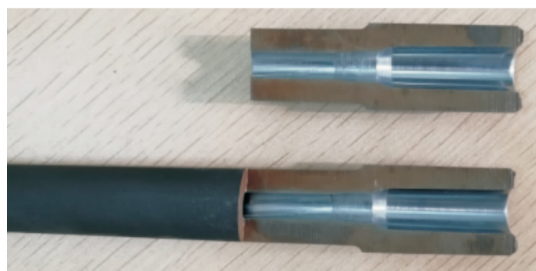


图3 镀铬身管解剖图

4 结论

本文以法拉第电解定律为基础,运用二次电流分布规律、镀铬电流密度与电流效率关系等,建立了镀铬过程中远阴极相对于近阴极的金属铬沉积速率关系,形成了身管弹-线膛各部位机加预留镀铬层厚度计算公式,并通过试验论证了该方法的正确性,满足工艺及产品技术要求,为设计身管弹-线膛各部位预留镀铬层厚度提供了理论方法。

参考文献:

- [1] 曾华梁. 电镀工艺手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1997:228.
- [2] 张升达. 硬铬电镀技术的发展与现状[J]. 表面技术, 2000,29:6.
- [3] 奚兵. 枪管镀铬的发展与实践[J]. 腐蚀与防腐, 2000(3):131.
- [4] 何伟春. 关于二次电流分布公式的理论分析[J]. 郑州高等专科学校学报, 2000(3):26-29.
- [5] 张三元. 电镀层均匀性及镀液稳定性——问题与对策[M]. 北京:化学工业出版社, 2011:5-18.