

车灯蒸发镀铝件膜厚理论计算方法研究

张少斌, 谢乐贤, 武竹雨, 张 杨

常州星宇车灯股份有限公司, 江苏 常州

收稿日期: 2024年8月6日; 录用日期: 2024年9月3日; 发布日期: 2024年9月10日

摘 要

本文通过建立蒸发镀铝机膜厚理论计算模型, 同时考虑工装旋转和镀铝零件结构对铝层膜厚计算模型的影响因素, 对其进行修正, 可实现不同结构及不同放置位置的镀铝产品的膜厚理论计算。经过实验验证, 该计算模型除了将误差控制在接受范围内, 还能够在产品设计阶段验证镀铝区域结构是否满足镀铝膜厚的需求, 为镀铝产品结构优化提供了重要的参考依据, 同时规避了产品结构导致的产品镀铝缺陷问题。

关键词

蒸发镀铝, 膜厚, 仿真, 理论计算

Research on the Theoretical Calculation Method of Film Thickness of Evaporated Aluminized Parts of Car Lamps

Shaobin Zhang, Lexian Xie, Zhuyu Wu, Yang Zhang

Changzhou Xingyu Automotive Lighting Systems Co., Ltd., Changzhou Jiangsu

Received: Aug. 6th, 2024; accepted: Sep. 3rd, 2024; published: Sep. 10th, 2024

Abstract

In this paper, by establishing the theoretical calculation model of the film thickness of the evaporative aluminized machine, and considering the influencing factors of the rotation of tooling and the structure of the aluminized parts on the calculation model of the aluminum layer film thickness, the theoretical calculation of the film thickness of aluminized products with different

文章引用: 张少斌, 谢乐贤, 武竹雨, 张杨. 车灯蒸发镀铝件膜厚理论计算方法研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(5): 5260-5267. DOI: 10.12677/mos.2024.135476

structures and different placement positions can be realized. After experimental verification, the calculation model can not only control the error within the acceptable range, but also verify whether the structure of the aluminized area meets the requirements of the thickness of the aluminized film in the product design stage, which provides an important reference for the optimization of the aluminized product structure and avoids the aluminized defect caused by the product structure.

Keywords

Evaporative Aluminization, Film Thickness, Simulation, Theoretical Calculations

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

从汽车发明以来,车灯经过了漫长的发展史:从煤油灯发展到如今的LED灯、OLED灯及激光大灯等[1]。早在煤油灯发明时,人们就在灯内加装反射镜以达到汇聚光束的作用,从而得到更好的照明效果[2]。起初反射镜是由纯金属抛光制备而成,但由于对反射面粗糙度要求较高以及汽车趋向于轻量化设计,纯金属反射镜逐步被淘汰。现多采用物理气相沉积(PVD)即蒸发镀铝的方式在塑料件表面沉积一层铝金属层,从而达到反射光线的目的,该工艺方法原理简单、生产速度快,在汽车行业应用广泛[3][4]。

随着蒸发镀铝技术的普及,镀铝件不仅作为反射镜起到光线汇聚作用,有时也作为饰圈起到装饰作用。为了达到配光和美观效果,镀铝件通常设计有复杂的结构和曲面,这使得如何保证零件的所有镀铝区域膜厚达到要求成为一个难题。零件结构的深度、角度以及零件相对蒸发源的距离和角度的不同,必然导致铝层膜厚分布不均匀现象的出现,甚至一些特殊部位可能无法沉积到铝层[5][6]。目前的相关研究主要针对产品的膜厚检验[7]或简单平面结构的镀膜分析[8][9],因此需要开发一套系统的理论计算方法,在设计阶段对复杂结构上镀铝部位的镀铝膜厚进行评估,优化膜厚无法满足要求区域的结构设计,避免产品产生无法满足膜厚要求的缺陷问题。

2. 蒸发镀铝原理分析

采用PVD在注塑件表面进行镀铝,需在真空环境下,对钨丝通电加热,钨丝温度升高,放置在钨丝上的铝受热汽化。当气体铝原子的平均自由程 $\bar{\lambda}$ [10](式(1))大于蒸发源到基材之间的线性尺寸时,铝原子可以直接从蒸发源飞向基材,并在基材表面冷却形成薄膜。

$$\bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 P} \quad (1)$$

上式中: $\bar{\lambda}$ ——原子的平均自由程, k ——玻尔兹曼常数($1.380649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$), T ——分子所处环境的温度, d ——气体分子的有效直径(空气: 3.74×10^{-10}), P ——分子所处空间的压强。

如图1(a)、(b)所示为双峰钨丝蒸发源的结构,由于蒸发源(即放置在钨丝上的铝圈)尺寸相较于其距离基材的尺寸较小,可以将其视为点蒸发源,即从蒸发源向各个方向的蒸发量是一致的(见图1(c))。

因此,理想状态下(铝材均匀蒸发,且没有质量损失),在蒸发过程中,蒸发的铝材以蒸发源为中心,向四周扩散,形成一个不断扩大的均匀壁厚球面。随着扩散进行,球面半径不断扩大,但是球面始终保持等质量。从微元的角度来看,在蒸发源与工件表面的法向上,可以近似的认为,与工件表面接触的球面壁厚即在该位置点上的铝材沉积厚度,膜厚 t 可直接由式(2)求出。在其它方向上,则需要考虑投影角度问题,即此时的膜层厚度 t 可以利用球面壁厚 t' 和球面微元与膜层微元之间的夹角 θ 得到,即式(3)。

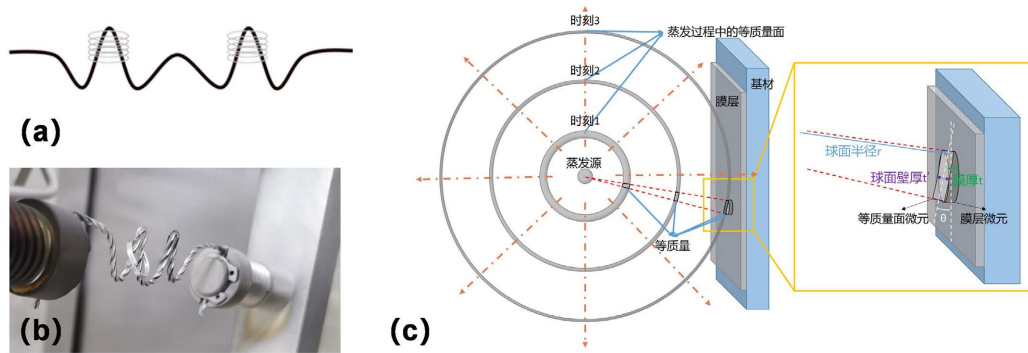


Figure 1. Schematic diagram of bimodal tungsten wire structure (a) Structure, (b) Physical drawing, (c) Schematic diagram of the evaporation principle of point evaporation source

图 1. 双峰钨丝结构(a) 结构示意图; (b) 实物图; (c) 点蒸发源蒸发原理示意图

$$t = t' = \frac{m}{4\pi r^2 \rho} \quad (2)$$

上式中: t ——膜层厚度, t' ——等质量面壁厚, m ——膜料质量, ρ ——蒸发膜层密度(可近似为膜料密度), r ——蒸发源到膜厚测试点的距离。

$$t = t' \cdot \cos \theta = \frac{m}{\rho} \cdot \frac{1}{4\pi r^2} \cdot \cos \theta = \frac{m \cos \theta}{4\pi r^2 \rho} \quad (3)$$

上式中: θ ——球面微元与膜层微元之间的夹角(等同于蒸发方向与膜厚测试点所在面的法向的夹角)。

针对蒸发镀铝所用铝圈膜料,其质量 m 可表示为:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot S \cdot l \cdot N \quad (4)$$

上式中: ρ ——膜料密度, S ——铝圈截面积($0.25\pi \text{ mm}^2$, 铝圈半径 0.5 mm), l ——每圈铝长度, (20 mm), N ——铝圈数。

将式(4)代入式(3)中,可将其简化为:

$$t = \frac{m \cos \theta}{4\pi r^2 \rho} = \frac{\rho S l N \cos \theta}{4\pi r^2 \rho} = \frac{5 N \cos \theta}{4 r^2} \quad (5)$$

3. 模型建立及理论分析

3.1. 工装及蒸发源 3D 模型建立

根据本公司使用的单轴蒸发镀铝机和工装的实际结构及尺寸建立如图 2 所示的 3D 数据模型。(X、Y、Z 轴单位: mm)

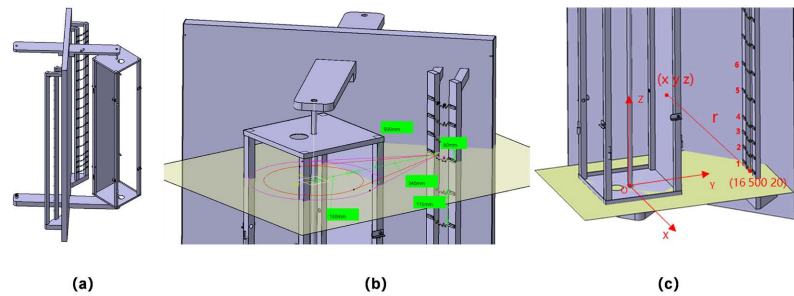


Figure 2. (a) (b) 3D model of the internal tooling and evaporation source of the aluminizing machine, (c) the coordinates of a certain point on the evaporation source and the tooling

图 2. (a) (b) 镀铝机内部工装及蒸发源 3D 模型(c) 蒸发源与工装上某点坐标

3.2. 理论模型建立假设

建立单根钨丝所能形成的铝层膜厚理论计算模型，其中，模型建立满足以下假设：

1. 蒸发原子或分子与残余气体分子间不发生碰撞：本司单轴蒸发镀铝机工作压力为 1.5×10^{-2} Pa，工作温度为 25°C (298 K)，根据式(1)计算分子平均自由程 $\bar{\lambda} = 441$ mm，大于蒸发电极到工装的距离 340 mm；
2. 在蒸发源附近的蒸发原子或分子之间也不发生碰撞；
3. 蒸发沉积到基板上的原子不发生再蒸发现象，即第一次碰撞就凝结于基板表面上。

当满足上述假设时，即可认为每一个蒸发原子或分子，在入射到基板表面上的过程中均不发生任何碰撞，而且到达基板后又全部凝结。

3.3. 膜厚理论值计算

对镀铝机 3D 模型建立坐标系，以工装底面中轴圆心为坐标原点 O；以工装片正对蒸发极为初始位置；坐标轴 X、Y、Z 方向如图 2 中所示。以蒸发源钨丝 1 为例，蒸发源钨丝的空间坐标为(16, 500, 20)，其余蒸发源钨丝的空间坐标可根据其与蒸发源钨丝 1 的间距获得。那么空间中某点(x, y, z)距离蒸发源钨丝的距离 r 满足：

$$r^2 = (16 - x)^2 + (500 - y)^2 + (20 - z)^2 \quad (6)$$

根据镀铝零件的 3D 数据，零件镀铝区域中某点 A(x, y, z)所在平面的法向与 X、Y、Z 轴的夹角为 α 、 β 、 γ (如图 3(a)所示)。

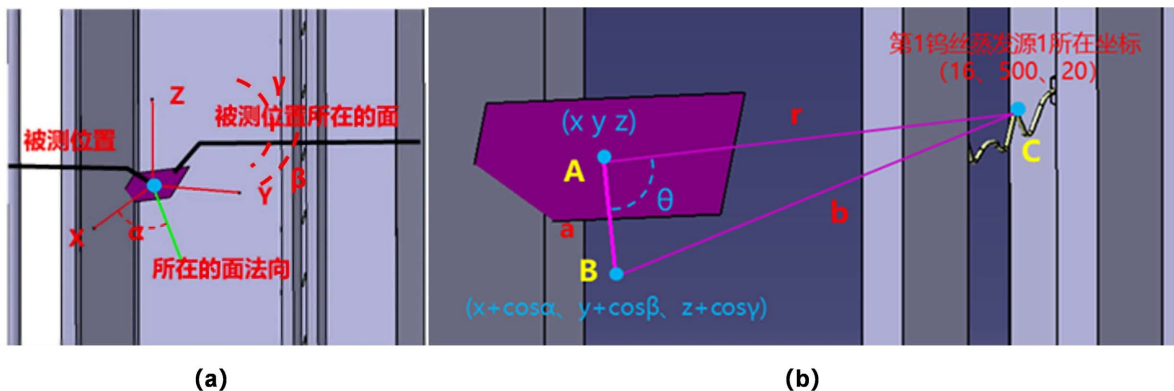


Figure 3. (a) The angle between the normal direction of the plane and the coordinate axis where the point to be measured is located and (b) the schematic diagram of the cosine theorem

图 3. (a) 待测点所在平面法向与坐标轴夹角(b) 余弦定理示意图

经过被测点 $A(x, y, z)$, 沿点 A 所在平面的法线方向测量一个单位长度, 这个单位长度的端点 B 的坐标可表示为 $(x + \cos\alpha, y + \cos\beta, z + \cos\gamma)$, 点 A 、点 B 与蒸发源 $C(16, 500, 20)$ 可构成图 3(b) 中所示的三角形。至此, 可利用余弦定理求出式(5)中的 $\cos\theta$, 即式(7), 将其代入式(5)得到式(8), 即被测位置所镀铝层膜厚的理论值计算公式。

$$\cos\theta = \frac{a^2 + r^2 - b^2}{2ar} \quad (7)$$

其中: $a=1$, $r^2 = (16-x)^2 + (500-y)^2 + (20-z)^2$,

$$b^2 = (x + \cos\alpha - 16)^2 + (y + \cos\beta - 500)^2 + (z + \cos\gamma - 20)^2$$

$$t = \frac{5N[1 + \cos\alpha(x-16) + \cos\beta(y-500) + \cos\gamma(z-20)]}{4[(x-16)^2 + (y-500)^2 + (z-20)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

4. 工装旋转修正及验证

4.1. 工装旋转修正

在工装旋转的过程中, 工装上的工件有时会背对蒸发源, 因而无法沉积铝层, 因此必须考虑工装旋转时不同角度对铝层沉积厚度的影响。如图 4 所示, 铝层能沉积的位置范围为蒸发源至工装旋转体的切线范围之内, 即位置 1 至位置 3 之间能有效镀膜, 其中位置 2 处镀膜效率最高, 其余位置则被工装遮挡。有效镀膜角度 φ 可由以下公式求得:

$$\varphi = 2\cos^{-1}\frac{R}{L} = 2\cos^{-1}\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{L} \quad (9)$$

工装旋转过程中, 式(9)中的 r 和 θ 随着工装旋转角度变化而变化, 导致在不同的工装旋转位置对应不同的膜厚。因此考虑旋转角后, 工装旋转过程中平均膜厚的计算方法如下:

- 在有效镀膜角度范围 φ 内, 均匀选取不同的工装旋转角 ω 值;
- 根据膜厚计算公式(8)分别计算出对应工装旋转角度下的膜厚值;
- 将所有计算出的膜厚值取平均值作为整个镀膜过程中被测点的平均膜厚 $\bar{t}$;
- 在工装旋转的情况下, 铝圈膜料的利用率并非百分之百, 而是与有效镀膜角度范围相关, 因此,

在计算过程中, m 应进行一定修正, 即实际使用膜料质量 $m' = \frac{\varphi}{2\pi}m$ 。

即由于工装旋转修正后的公式为式(10)

$$t_{r1} = \frac{\varphi}{2\pi}\bar{t} \quad (10)$$

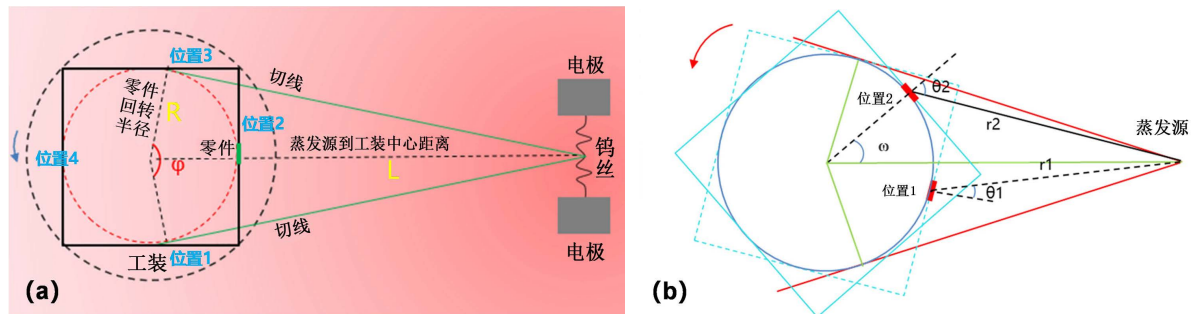


Figure 4. Schematic diagram of tooling rotation

图 4. 工装旋转示意图

4.2. 公式验证

使用平面样板对蒸发源为单个 8 圈铝丝在工装上的镀膜厚度进行理论验证，结果如图 5 所示，结果表明理论分析误差低于 10%。

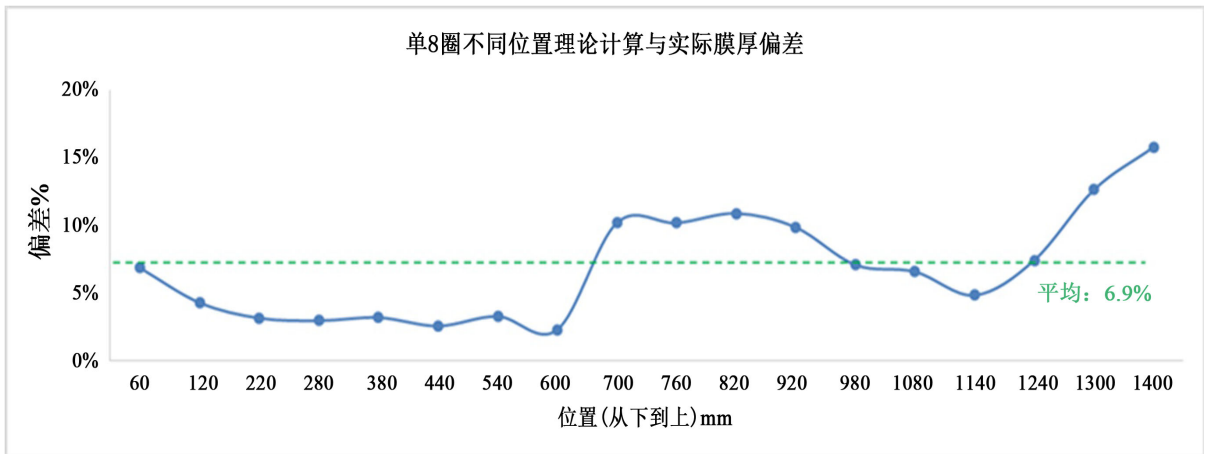


Figure 5. Deviation between the theoretical and actual values of the film thickness
图 5. 镀膜厚度理论值与实际值偏差

5. 立体角引入及验证

5.1. 立体角修正

目前的研究表明，铝层膜厚与立体角 Ω 成正比关系[11]。因此除工装旋转外，也需考虑镀铝件可接受镀铝的立体角 Ω (如图 6 所示)。

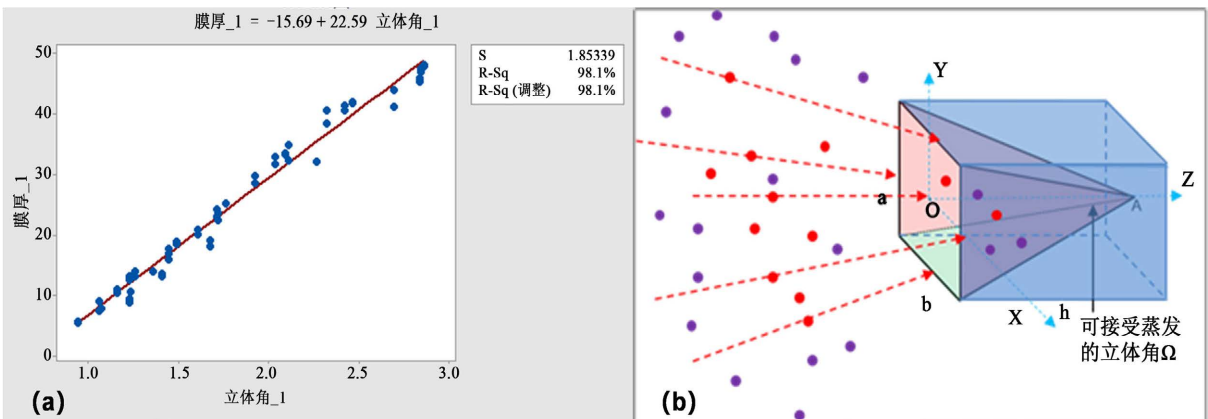


Figure 6. The relationship between the solid angle and the film thickness and schematic diagram of the acceptable evaporation solid angle at position A
图 6. 立体角与膜厚关系示意图及在 A 位置可接受的蒸发立体角示意图

选定一个 Ω ，实测几组膜厚数据与理论值进行对比，如表 1 中所示。对两组数据进行拟合得到图 7，可以发现理论值与实际值之间呈线性关系。因此可对膜厚计算公式再次进行修正，即：

$$t_{r2} = k \cdot t_{r1} + h \quad (11)$$

Table 1. The theoretical and actual values of the film thickness at the same solid angle Ω
表 1. 在相同立体角 Ω 下的膜厚理论值与实际值

理论值	12.7	14.1	16.5	19.8	22.6	25.4	28.2
实际值	13.9	18.9	28.9	39.0	49.0	59.0	62.1

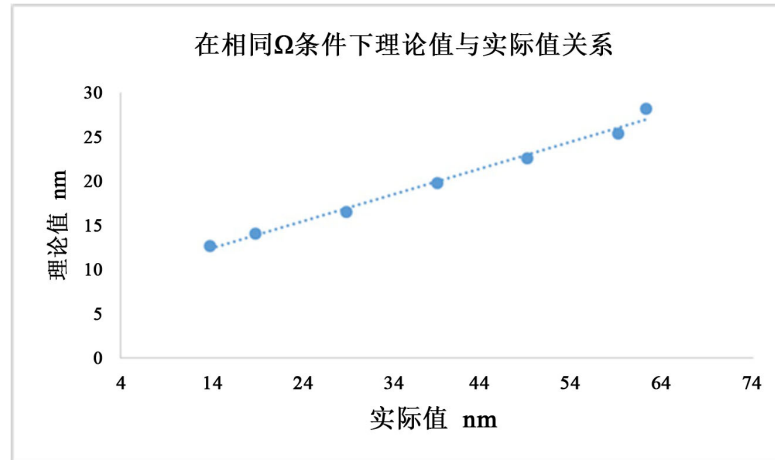


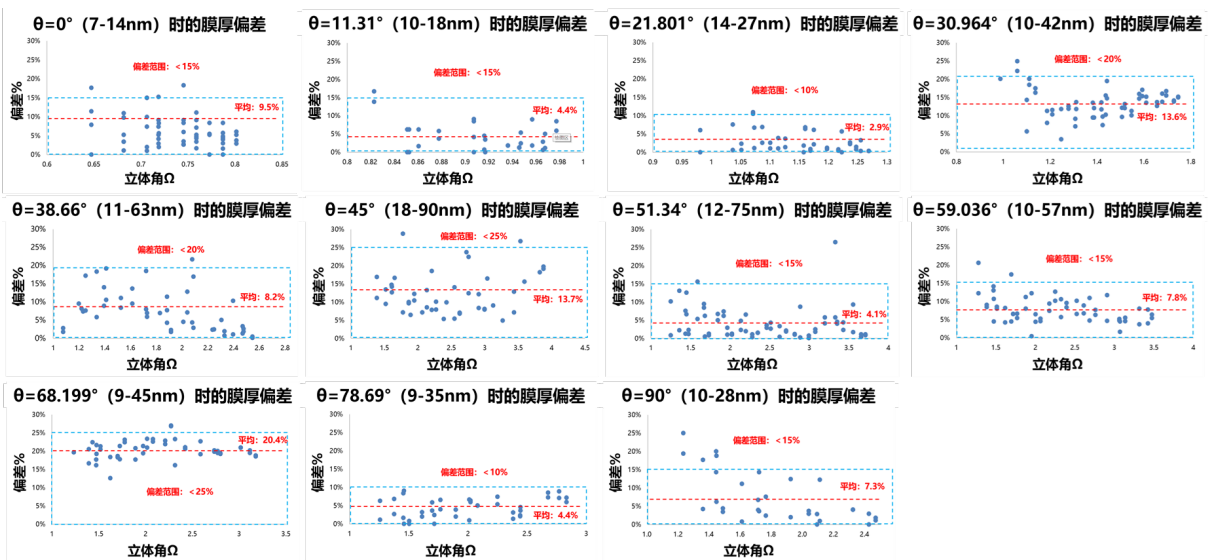
Figure 7. Relationship between theoretical and actual film thickness
图 7. 膜厚理论值与实际值关系

其中系数 k 、 h 与工艺参数、 Ω 、 m 、 θ 角等因素相关，在这些相关因素都保持一致的条件下 k 、 h 为定值。最终计算时， k 、 h 的值由理论值和实际值的数据拟合得出。

至此，通过式(11)，在考虑工装旋转及工件结构的情况下可对镀铝件不同区域的镀铝膜厚进行相应理论计算。

5.2. 公式验证

对结构件在不同蒸发角度下的镀膜厚度进行验证，结果如图 8 所示，在 11 种不同镀膜面与蒸发方向夹角条件下，验证不同结构对应的理论膜厚与实际测量膜厚的平均偏差 $\leq 10\%$ 。



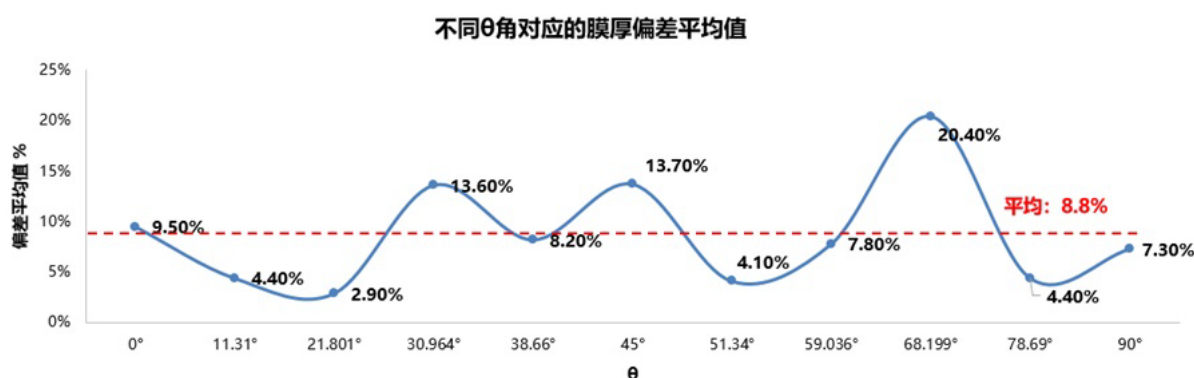


Figure 8. Theoretical and practical deviations of aluminum film of structural parts at different evaporation angles

图 8. 结构件在不同蒸发角度下铝层镀膜理论实际偏差

6. 总结与展望

本文从车灯零件蒸发镀铝原理出发, 分析了影响单轴机镀铝件膜厚的因素, 将其融入到膜厚理论计算模型中, 得出了一套计算方法:

(1) 通过运用微元分析方法, 我们精确地构建了待测点膜厚与点蒸发源质量及其之间相对位置参数的一般模型。

(2) 建立单轴镀铝机的数学模型, 将相应的位置参数带入到一般模型中, 得到在工装固定时器件表面的理论膜厚计算模型。

(3) 依次引入工装旋转修正与立体角修正, 得出计算不同结构及不同位置镀铝零件的铝层膜厚的理论模型。

(4) 通过对比实际测量膜厚值与理论计算膜厚值, 对计算模型进行验证并得到误差范围。

后续我们将把该计算方法导入计算机软件中, 在软件中选定待测点及其所对应的立体角即可完成该点的理论膜厚计算, 从而实现在设计阶段验证镀铝区域结构是否满足镀铝膜厚需求, 并为产品镀铝区结构优化为提供重要的参考依据, 避免因产品结构问题导致的镀铝缺陷。

参考文献

- [1] 姚明. 浅谈智能式车灯的发展[J]. 实用汽车技术, 2006(2): 2.
- [2] 李祥兵, 杨伟民. 车灯反光镜真空镀铝层脱落形成机理及对策[J]. 汽车电器, 2024(2): 82-85.
- [3] 朱俊. 轿车车灯的镀铝和免底涂技术[J]. 汽车与配件, 2010(3): 23-25.
- [4] 李静, 周丹. 车灯零件表面镀铝对其温度的影响[J]. 汽车零部件, 2016(3): 50-52.
- [5] 马佳焱, 张少斌, 范蓉, 等. 车灯零件镀铝边界的研究[J]. 机械工程与技术, 2022, 11(4): 339-346.
- [6] 王华方, 马佳焱, 范蓉, 等. 镀铝件结构与镀铝层膜厚的关系研究[J]. 机械工程与技术, 2020, 9(4): 279-289.
- [7] 陈桂莲, 周鹏飞, 缪渝斌. 晶振法测试车灯反射镜膜厚研究[J]. 光学仪器, 1999(Z1): 156-158.
- [8] 谭晓华. 带材真空镀铝设备蒸发源与最佳膜厚分布的探讨[J]. 真空, 1999(2): 21-25.
- [9] 韩耀文. 真空蒸镀铝膜厚度分布的研究[J]. 真空, 1986(3): 15-20.
- [10] 章青. 用类比法导出理想气体分子平均自由程公式[J]. 物理与工程, 2006, 16(5): 61-62.
- [11] 朱国. 磁控溅射镀膜相关物理过程的多尺度模拟与实验研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2020.