文章编号：1004－0609(2003)05－1202－04

热浸铝过程中表面层厚度动态控制模型①

夏 原[1]，董 延[1]，李东风[2]
(1. 中国科学院 力学研究所，北京 100080；2. 清华大学 工程力学系，北京 100084)

摘 要：热浸铝镀层由表面层及过渡层两部分组成，两种层厚所受的影响因素不同，其中提升速度、基体表面状态、液态铝的粘度和膜冷凝过程中的温度分布等是影响表面层厚度变化的因素。分析上述诸多影响因素，得出影响表面层厚度变化的主要因素是液态铝的粘度和提升速度，并建立了流体力学的计算模型。结果表明：热浸铝表面层厚度和镀铝液的粘度系数与提升速度乘积的平方根成正比，与镀铝液密度的平方根成反比。

关键词：热浸铝；镀层；动态控制；流体力学
中图分类号：TG 174.443 **文献标识码**：A

人们早期用过渡层代替整个镀铝层。Roy 等[1]在较为全面地研究 Al-Zn 镀层厚度变化过程后认为：随温度升高，热浸铝层厚度逐渐减薄；而随时间延长，浸铝层厚度逐渐增加。也有学者[2]认为随温度及时间的增加，镀层厚度均增大。文献[3－5]表明，热浸铝镀层是由表面层及过渡层组成。但在过去研究工作中，将表面层的生长过程从整个镀层的生长过程中分离开来进行研究的不多，这也使得热浸铝工艺的选择具有很大盲目性。文献[6]证实，过渡层厚度随着时间的变化遵循抛物线生长规律。

本文作者通过对热浸铝层表面层厚度变化的研究，利用简化的动态控制模型，得出镀铝表面层厚度的变化随温度和提升速度的变化规律。

1 镀铝层生长的影响因素

图 1 所示为 Q235 钢热浸铝的金相组织。从图 1 可以看出钢热浸铝后其组织由表面层、过渡层及基体 3 部分组成。其中表面层是由 α-Al 为主的纯铝层及呈白色条状的 $FeAl_3$ 的金属间化合物组成；中间过渡层是以 Fe_2Al_5 为主的锯齿状金属间化合物层；基体是普通钢。

过渡层的厚度与温度、时间有直接的关系；表面层的厚度受到提升过程中吸附效应的影响，与铝液与基体的浸润性、镀铝液的粘度、提升过程中的速度有直接的关系[7,8]。其中镀铝液的粘度又是镀铝液温度的函数，具体关系如下[9]：

$$\mu_T = A\exp\left(\frac{E_\mu}{RT}\right) \tag{1}$$

式中 A 为常数，E_μ 为粘性活化能，R 为气体常数，T 为绝对温度。

2 表面层厚度变化流体力学计算模型

图 2 所示为热浸铝流体力学模型，钢丝以恒定速度(u)垂直提升，提升过程中，由于铝液体的粘

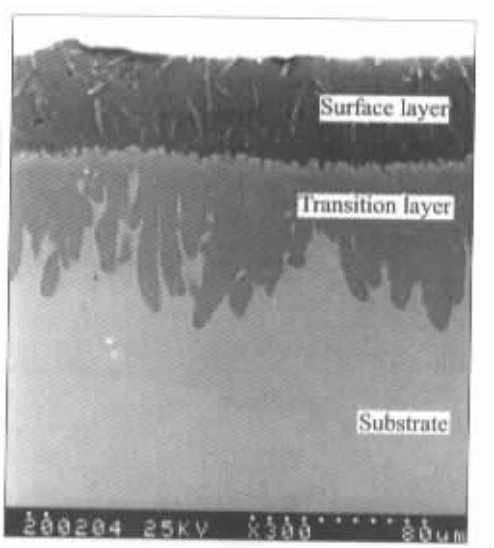

图 1 Q235 钢热浸铝金相组织

Fig. 1 Metallographical structure of hot-dip aluminized Q235 steel

① 基金项目：国家自然科学基金资助项目(50071066) 收稿日期：2002－11－10；修订日期：2002－02－22
作者简介：夏 原(1963－)，男，研究员，博士.
通讯联系人：夏 原，研究员，北京海淀区中关村北四环西路 15 号力学所；电话：010－62554190；E－mail：xia@imech.ac.cn
万方数据

性作用将使其在连续的垂直向上的基体上产生稳定的速度分布，然而基体表面状态会直接影响速度的大小[10]。研究表明铁铝体系具有良好的浸润性，因在热浸铝过程之前基体经过充分的助镀处理，故在热浸铝情况下，铝液与基体完全浸润，且在本实验条件下提升速度属于滞流范围，故可认为基体表面状态对速度分布的影响不大。假设匀速提升，这时液体膜已经达到稳定流动，且为不可压缩流体，其速度分布与提升高度 Z 的关系由相似率可知，完全相当于钢丝静止时，镀铝液沿基体垂直向下流动时膜的速度分布[10, 11]。并假设镀铝液表面内外温度差别很大，镀铝件提升时，设定提出时膜温已经小于浸镀液凝固温度，从而迅速固化，因此 $\mathrm{d}T/\mathrm{d}Z$ 有显著下降。

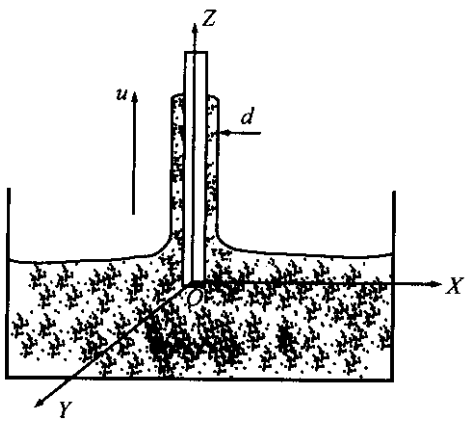

图 2　热浸铝流体力学模型

Fig. 2　Fluid dynamics model of hot-dip aluminized coating

通过前面的分析可知，提升速度(u)、浸镀液的粘度(μ_T)、镀铝液的温度(T)是影响表面层厚度的关键因素，因而表面层的厚度是 u、T 和粘度 μ_T 的函数。本节针对钢丝、钢管的圆柱形模型及钢板的平面形试样模型，通过简化来推导铝层厚度变化的函数关系。

2.1　圆柱形试样在镀铝过程中铝液的稳定流动模型

图 3 所示为圆柱形计算模型，由图可知圆柱形样品的研究属于轴对称问题，因此在柱坐标系下偏应力张量为

$$u_r = r_\theta = 0,\ u_z = u_z(r),\ T = T(r)$$

同时此问题属于定常问题：$\frac{\partial}{\partial t} = 0$。

考虑体积力，因液体仅受重力作用而悬垂平行

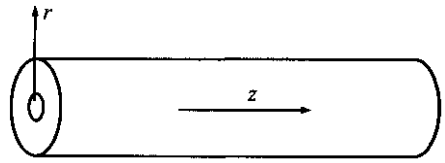

图 3　圆柱形计算模型

Fig. 3　Columniform calculation model

流动：

$$F_r = F_\theta = 0,\ F_z = \rho g$$

故在柱坐标系下运动方程为

$$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}(rT_{rr}) - \frac{1}{r}T_{\theta\theta} = 0 \tag{2}$$

$$-\frac{\partial p}{\partial \theta} = 0 \tag{3}$$

$$\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}(rT_{rz}) = 0 \tag{4}$$

由(2)，(3)，(4)式可得

$$p = -c_0 z + f(r) \tag{5}$$

由于沿圆柱轴心方向没有压力梯度，故待定常数 $c_0 = 0$，将(5)式代入(4)式有

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}(rT_{rz}) = -\rho g r \tag{6}$$

方程(6)的通解为

$$T_{rz} = -\frac{1}{2}\rho g r + c_1\frac{1}{r} \tag{7}$$

式中　c_1 为待定常数。

牛顿流体本构方程：

$$\tau = T_{rz} = \mu\left(\frac{\mathrm{d}u_z}{\mathrm{d}r}\right) \tag{8}$$

式中　μ 为粘性系数，由(7)，(8)两式可得如下常微分方程：

$$\frac{\mathrm{d}u_z}{\mathrm{d}r} = \frac{1}{\mu}\left(-\frac{\rho g}{2}r + \frac{c_1}{r}\right) \tag{9}$$

边界条件为

$$r = r_1 \text{ 时，} u_z = 0 \tag{10}$$

$$r = \delta + r_1 \text{ 时，} \frac{\mathrm{d}u_z}{\mathrm{d}r} = 0,\ u_z = u_0 \tag{11}$$

式中　r_1 为试样半径，δ 为镀膜厚度，u_0 为提升速度，由式(9)、(10)、(11)可得

$$u_0 = \frac{1}{\mu}\left[\begin{array}{l} -\frac{\rho g}{4}(\delta + 2r_1) \\ +\frac{\rho g}{2}(\delta + r_1)^2\ln\left(\frac{\delta + r_1}{r_1}\right) \end{array}\right] \tag{12}$$

此式即为提升速度 u_0 和膜厚 δ 及试样半径 r_1 的函数关系。

万方数据

2.2 平板形试样平面层流流动模型

在直角坐标系下运动方程为

$$\frac{d^2u_y}{dx^2} = -\frac{\rho g}{\mu} \tag{13}$$

边界条件为

$$x = 0 \text{ 时}, u_y = 0 \tag{14}$$

$$x = \delta \text{ 时}, \frac{du_y}{dx} = 0, u_y = u_0 \tag{15}$$

式中 δ 为镀膜厚度，u_0 为提升速度。由式(13)、(14)、(15)可得

$$u_0 = \frac{\rho g}{2\mu}\delta^2 \tag{16}$$

式(16)即为提升速度 u_0 和膜厚 δ 的函数关系。

3 结果与讨论

相关研究表明[12]，在铝层中加入适量的稀土能够起到细化铝层组织、改善镀层质量的作用。

图 4 给出了在 750 ℃、浸镀 2 min 的条件下，稀土铝热浸镀过程中表面层厚度随提升速度变化的结果。图中平滑曲线是理论的计算结果，虚线部分是理论结果除以系数 3 修正后的值，分散点是实验结果。从图 4 中可以看出没有经过修正的理论值和实验结果有相当的偏差，经过简单修正后的理论值和实验值吻合很好。出现这种偏差的原因在于我们在计算的过程中假设铝液和铝液表面的温度差别很大，以致镀铝件在提出液面时就立即凝固，这在实验过程中实际上是不可能的，所以在凝固之前镀铝件上的铝液总有一定的回流。同时长时间浸铝后，Fe 在 Al 中溶解量增加，影响到铝液的粘度。这些都对计算的结果产生了一定的影响，设 $\delta_{表面} = k\delta$，

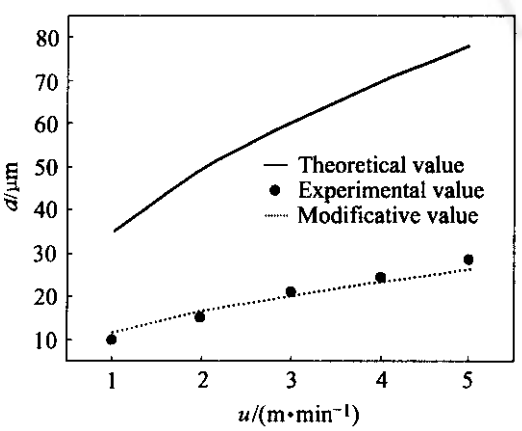

图 4 实验值与理论值的比较

Fig. 4 Comparison of experimental value and theoretical value

其中 k 可以由实验测定，在本实验中(稀土铝，750 ℃) $k \approx 0.33$。

结合上节两种类型的推导结果，分析式(12)，在 $r_1 = +\infty$ 时，也就是当圆柱形试样表面近似平面时求极限可得 $u_0 = \frac{\rho g}{2\mu}\delta^2$，这个结果和在平面情况下的结果式(16)是一致的。圆柱形试样计算可以当成平面试件来处理，一般情况下镀铝表面层的厚度可以近似为

$$\delta = k\sqrt{\frac{2\mu \cdot u_0}{\rho g}} \tag{17}$$

其中 k 是由实验测定的常数，μ 是镀铝液的粘性系数，δ 为镀膜厚度，u_0 为提升速度，ρ 是镀铝液的密度。

4 结论

热浸铝过程中表面纯铝层的厚度变化规律可以用简化的流体力学模型来进行研究，其厚度近似为 $\delta = k\sqrt{2\mu \cdot u_0 \cdot (\rho g)^{-1}}$。因而提高表面纯铝层的厚度可以通过增大铝液的粘度或提高提升速度来实现。但是增大铝液的粘度必然要降低铝液的温度，会导致镀铝试件的表面质量下降，因此提高表面纯铝层厚度的方法只能靠提高提升速度来实现。为防止大面积漏镀影响试件表面的质量，提升速度不能太大。

致谢

力学研究所微重力实验室刘荣博士对本文模型的建立提出了独到的见解，作者在此表示衷心感谢！

REFERENCES

[1] Roy S, Sivan V, Balasubramanyan. The interface in Al-Zn alloy coating over mild steel[J]. Surface Technology, 1978, 7(5): 361 - 365.

[2] Liang D. Hot dip galvanized steel[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1997, 34(10): 1513 - 1516.

[3] 夏 原，姚 枚，李铁藩. 热浸铝镀层形成过程的微观结构及机理[J]. 中国有色金属学报，1997，7(4)：154 - 157.
XIA Yuan, YAO Mei, LI Tie-fan. Coating formation process and microstructure during hot dip aluminizing (hda) on steel[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997, 7(4): 154 - 157.

万方数据

[4] LI Ya-jiang. Characteristics of phase constitution in the Fe-Al alloy layer of calorized steel pipe [J]. Materials Science, 1995, 30: 2635 - 2639.

[5] Adam G. The investigation on the microstructure model of aluminized steel [J]. Metallurgical Transactions A, 1977, 8A(4): 973 - 975.

[6] 夏　原，姚　枚，张瑞平. A3 钢热浸铝镀层生长规律的影响因素[J]. 中国有色金属学报，1996，6(1)：74 - 77.
XIA Yuan, YAO Mei, ZHANG Rui-ping. The affecting of temperature and time to the growth of hot-dip aluminizing coating on A3 steel[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1996, 6(1): 74 - 77.

[7] 刘顺华，宋世崑，高洪吾，等. 钢丝连续热浸镀铝工艺的研究[J]. 材料保护，2000，33(9)：41 - 43.
LIU Shun-hua, SONG Shi-kun, GAO Hong-wu, et al. Study on continuous hot-dip aluminium plating for steel wire[J]. Materials Protection, 2000, 33(9): 41 - 43.

[8] 宋世崑，刘顺华，李长茂，等. 钢材的连续热浸镀铝[J]. 金属热处理，2000，5：16 - 19.
SONG Shi-kun, LIU Shun-hua, LI Chang-mao, et al. Continuous hot-dip aluminium plating for steel wire[J]. Heat Treatment of Metal, 2000, 5: 16 - 19.

[9] 王常珍. 冶金物理化学研究方法[M]. 北京：冶金工业出版社，1982. 268.
WANG Chang-zhen. Metallurgic Physicochemical Research Technique [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982. 268.

[10] 周世权，熊维皓，付元植. 工艺参数对液态铝与钢界面层及其性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2000，2：16 - 17.
ZHOU Shi-quan, XIONG Wei-hao, FU Yuan-zhi. Effect of process parameters on interface layer and properties of liquid aluminum/steel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2000, 2: 16 - 17.

[11] 张长桥，虞万钟. 热浸镀工艺中提抽过程膜厚度动态控制模型[A]. 第一届中国热浸会议论文集[C]. 石家庄：中国腐蚀与防护学会，河北省冶金研究所，1991. 148 - 154.
ZHANG Chang-qiao, YU Wan-zhong. Controlling Model of the Thickness in Hot Dipping Drawing Process[A]. Symposium on The First Hot-Dip Conference of China [C]. Shijiazhuang: Chinese Society for Corrosion and Protection, Hebei Institute of Metallurgy, 1991. 148 - 154.

[12] 黄亲国，钟华仁. 稀土对热浸镀层组织和性能的影响[J]. 南昌航空工业学院学报，1999，13(2)：31 - 34.
HUANG Qin-guo, ZHONG Hua-ren. Effect of RE on the microstructures and properties of hot-dip aluminized coatings[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology, 1999, 13(2): 31 - 34.

Surface coating control model of hot dip aluminizing

XIA Yuan[1], DONG Yan[1], LI Dong-feng[2]
(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080;
2. Department of mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Hot dip aluminizing coating consists of surface layer and transition layer, and the thickness of each layer is influenced by respective factors. Drawing velocity, surface state of metal, viscosity of melted aluminum and temperature distribution in the film are possible factors which determine the thickness of surface layer. The viscosity of liquid aluminum and drawing velocity are the main factors to the thickness of surface layer. The fluid dynamics model is established to describe the formation of surface layer, and the thickness of the surface layer can be determined by the viscosity of melted aluminum and drawing velocity through the model. Results show that the thickness of the hot-dip aluminizing surface layer is in proportion to the square root of the product of the melted aluminum viscosity and the drawing velocity, but in inverse proportion to the square root of the melted aluminum density.

Key words: hot dip aluminizing; coating; dynamic control; fluid dynamics

（编辑　李艳红）

万方数据