

doi: 10.7690/bgzd.2017.07.019

不同材料壳体对熔铸装药过程传热影响分析

张明明, 王大奎, 万力伦, 冉 靖

(重庆红宇精密工业有限责任公司, 重庆 402760)

摘要: 为了解不同壳体材料熔铸装药过程的传热情况及探针提升速度变化趋势, 对壳体装药热探针护理过程中传热学进行分析。以钛合金、铬镍钢及铝合金为例, 通过单层圆筒壁常规稳态导热微分方程进行传热学分析, 推导出探针提升速率影响关系方程, 并分别对钛合金、铝合金、铬镍钢 3 种壳体材料传热学进行比较研究。结果表明: 在壳体材料不同, 其余相同的条件下, 探针提升速率随壳体导热系数的增加而降低, 且呈 1 阶指数衰减变化, 当壳体导热系数大于 $75 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时, 曲线基本趋于水平。同一材料壳体, 探针提升速率随环境温度的增加而降低且呈斜率为负值的直线变化关系, 不同材料壳体, 当环境温度较低时, 探针提升速率相差较大, 当环境温度达到某一最大值时, 探针提升速率相同。

关键词: 不同材料壳体; 熔铸装药; 传热学影响; 分析

中图分类号: TJ410.6 **文献标志码:** A

Study on Influence of Different Material Shell on Diathermancy with Casting Explosive During Charging Process

Zhang Mingming, Wan Dakui, Wan Lilun, Ran Jing

(Chongqing Hongyu Precision Industrial Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

Abstract: In order to research the diathermancy of different material shell during casting explosive charge process and the change trend of the probe ascending velocity rate, analyze diathermancy in shell charging heat probe maintenance process. Taking titanium alloy, nickel chromium steel, and aluminum alloy as example, by single layer cylinder wall regular steady state diathermancy differential equation, carry out diathermancy analysis of casting explosive charge probe maintenance process, derivate probe ascending velocity rate influence relation equation, compare and research on diathermancy titanium alloy, nickel chromium steel, and aluminum alloy. The research results show that: under same conditions, by using different shell material, probe ascending velocity rate is reduced when shell heat conductivity increases, and was first order exponential decay. When the shell thermal conductivity was greater than $75 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, the curve was basic tend parallel. That the same material shell, the rate of heat probe minished with increasing of environment temperature, and was liner changing of negative slop. When the shell material is different, in conditions of environment temperature is low, the rate of heat probe ascended was six to one, then it was high, the rate was the same.

Keywords: different material shell; casting explosive charge; influence of diathermancy; analysis

0 引言

熔铸装药是一种广泛使用的装药技术。炸药在熔铸凝固过程中, 由于体积收缩, 往往在壳体中间部位出现孔洞, 其中容积大而集中的孔洞体为缩孔, 细小而分散的孔洞体为缩松。熔铸装药炸药在壳体内部的凝固顺序由外而内, 炸药凝固释放的热量通过壳体壁传导散失到周围环境, 故壳体导热系数的大小直接影响壳体内炸药的凝固^[1]。为研究不同材料壳体在采用探针护理装药过程中炸药凝固影响, 笔者选用应用较广泛的钛合金及铝合金进行热力学分析影响研究。

热探针护理是通过对探针内部通蒸汽, 使探针加热周围药液, 通过间断提升热探针使其对特定范

围即将凝固的药液进行加热, 使熔化的药液不断给下部因药温降低、体积收缩而形成的纵向缩孔进行补充, 从而达到减少缩孔的目的^[2]。但由于热探针护理工艺复杂, 影响因素较多, 致使该工艺方法在热导率较小、比热容较大的钛合金壳体战斗部上的应用效果不理想; 因此, 笔者主要对钛合金(TC4)、铬镍钢及铝合金壳体装药热探针护理过程中传热学, 以探索出壳体材料与传热学影响关系, 从而为不同材料壳体战斗部装药过程参数设置提供依据。

1 模型建立

计算选用战斗部结构如图 1 所示, 该壳体为单层圆筒状。热探针结构见图 2。探针护理熔铸装药过程: 将一定温度的药液加入到壳体中, 加入已通

收稿日期: 2017-03-17; 修回日期: 2017-04-23

作者简介: 张明明(1983—), 女, 安徽人, 硕士, 工程师, 从事装药工艺研究。

入蒸汽的热探针，并通过间断提升探针药液进行护理，确保药液自下而上凝固。探针护理过程热量传递过程：1) 水蒸汽给探针提供的热量；2) 药液自身冷却释放的热量，外部热量主要通过壳体壁传递到环境；3) 热量的传递过程主要是，蒸汽的热量→探针壁→药液→壳体壁环境；4) 过程中，药液通过壳体壁向周围释放冷却热。

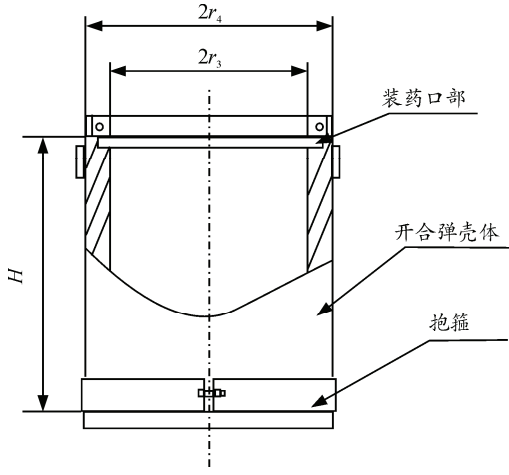


图 1 壳体结构

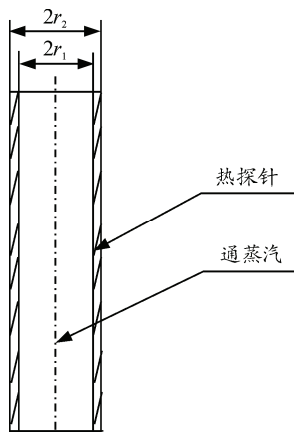


图 2 探针局部结构

2 战斗部熔铸装药过程传热学分析

2.1 分析假设

由于探针护理装药过程涉及的影响因素很多，为方便分析，笔者根据实际需要做如下假设^[2]：1) 将探针的加热过程简化为图 2 所示，将探针简单地看成一个单层圆筒，而不考虑其内部结构；2) 药液假设为均质，热传导系数稳定；3) 通入探针的蒸汽压力稳定，即探针加热温度恒定；4) 探针开始提升时，壳体内药液温度分布均匀。

2.2 传热学计算分析

在上述假设基础上，根据单层圆筒壁的常规稳态导热微分方程^[3]，整理得出如下关系式：

1) 通过探针传递给药液的热量

$$\Phi_1 = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (\text{W/m}) ;$$

2) 通过药液层传递到壳体内壁的热量

$$\Phi_2 = \frac{t_2 - t_3}{\frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (\text{W/m}) ;$$

3) 通过壳体内壁传到壳体外壁的热量

$$\Phi_3 = \frac{t_3 - t_4}{2\pi\lambda_3 \ln \frac{r_4}{r_3}} \quad (\text{W/m}) ;$$

4) 通过探针经过药液、壳体壁传到外壁的热量

$$\Phi_4 = \frac{t_1 - t_4}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (\text{W/m}) .$$

式中： t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 分别为探针内壁、探针外壁、药液外层、壳体外壁及室温，且 $t_4 = t_w$ ，K； r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 分别为探针内、外径，药柱外径，壳体外径，m； λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为探针壳体、药液(导热系数)、弹体壁导热系数，W/(m·K)； $R_1 + R_2 + R_3 =$

$$\frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{2\pi\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3} .$$

5) 药液柱由内及外的温度分布：

$$t(r) = t_2 - (t_2 - t_3) \ln \frac{r}{r_2} / \ln \frac{r_3}{r_2} .$$

6) 对于弹体，单位长度的散热量为

$$\Phi_L = h\pi d_0(t_w - t_\infty), \quad \Phi_L = h\pi d_0(t_w - t_\infty) .$$

其中： $d_0 = 2r_4$ 为壳体外径； h 为壳体壁对流传热系数； t_∞ 为室温，K。壳体壁对流传热系数主要包括自然对流传热系数及辐射传热系数 2 部分，W/(m²·K)，计算如下：

① 自然对流传热系数^[4-5]。

特征温度 t_m (°C) = $\frac{1}{2}(t_w - t_\infty)$ ，由此查得空气的物性值 λ_m 、 ν_m 、 Pr_m ，据此计算判据 $(GrPr)_m = \frac{g\alpha(t_w - t_\infty)H^3}{\nu_m^2} Pr_m$ 与 $10^4 \sim 10^9$ 、 $10^9 \sim 10^{13}$ 之间的大小关系，判断属于何种对流(层流、湍流)并根据层流对流传热系数 $h_c = 0.59 \frac{\lambda_m}{d} (GrPr)_m^{1/4}$ ，湍流公式：

$h_c = 0.10 \frac{\lambda_m}{d} (GrPr)_m^{1/3}$ 。式中 H 为加热高度，采用有效管长，m。

② 辐射传热系数^[6]。

取壳体外表面发射率为 0.8，则辐射传热系数为：

$$h_r = \frac{\varepsilon_s c_b \left[\left(\frac{t_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_\infty}{100} \right)^4 \right]}{t_w - t_\infty} = \frac{\varepsilon c_b \left[\left(\frac{t_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_\infty}{100} \right)^4 \right]}{t_w - t_\infty}。$$

其中 c_b 为黑体辐射系数， $c_b = 5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ；则 $\Phi_L = h\pi d_0(t_w - t_\infty) = (h_c + h_r)\pi d_0(t_w - t_\infty)$ ^[5]。

7) 由图 1 可以看出： $\Phi_L = \Phi_{23}$ ，即

$$(h_c + h_r)\pi d_0(t_w - t_\infty) = \frac{t_2 - t_4}{\frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{2\pi\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3}}。$$

由上式可以求出探针表面温度 t_2 。

8) 又由 $\Phi_2 = \Phi_3$ ，即

$$(h_c + h_r)\pi d_0(t_w - t_\infty) = \frac{t_3 - t_w}{2\pi\lambda_3 \ln \frac{r_4}{r_3}}，$$

可以求出 t_w 。

将求出值与计算假设值进行比较，当两者比较接近时即为计算所需的值，然后进行下一步的计算。

9) 又有 $\Phi_4 = \Phi_L$ ，求出 t_1 ，即

$$(h_c + h_r)\pi d_0(t_4 - t_\infty) = \frac{t_1 - t_4}{2\pi\lambda_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + 2\pi\lambda_2 \ln \frac{r_3}{r_2} + 2\pi\lambda_3 \ln \frac{r_4}{r_3}}。$$

10) 根据 4)、7)和 8)的结果，可求出药液内部温度变化与半径的关系，根据药液黏稠时的温度 $T=t(r)$ ，求出探针对药液的加热半径 r 。

11) 药液冷却释放的冷却热 $\Phi_{冷} = C_p M_{总} \Delta T_{冷}$ ，

C_p 为药液的热容量， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

12) 过程中热量的交换有如下的关系：探针提供的热量+药液冷却释放的热量=融化部分药液吸收的热量+通过壳体壁散失到空气中的热量，具体公式如下：

$$C_p M \Delta T \frac{r}{r_4} + \frac{t_1 - t_2}{2\pi\lambda_1 \ln \frac{r_1}{r_2}} \tau L = (h_c + h_r)\pi d_0(t_4 - t_\infty)L + C_p M \Delta T。$$

根据 10)求出的半径： $M = \frac{1}{4} \pi (r^2 - r_2^2) L \rho$ ， $M_{总}$

$= \frac{1}{4} \pi (r_4^2 - r_2^2) L \rho$ ， $\Delta T_{冷} = T_0 - T$ ， $\Delta T = t_2 - T$ 。其中：

T_0 为药液初始温度； T 为药液黏稠时的温度； M 为被加热药液的质量，kg； L 为被加热药液高度，m； ρ 为药液密度， kg/m^3 。由以上公式即可计算探针提升时间 $\tau(\text{s}/\text{m})$ ，带入探针提升速率 $v(\text{m}/\text{s}) = 1/\tau$ ，即可得出探针提升速率。

2.3 不同材料壳体传热学分析结果与讨论

根据钛合金壳体探针传热学分析及公式推导，绘出 3 种材料壳体战斗部熔铸装药探针提升速率与环境温度变化关系曲线，见图 3；3 种材料壳体战斗部熔铸装药探针提升速率与药液凝固点关系曲线见图 4；3 种材料壳体探针提升速率与药液导热系数关系曲线见图 5；探针提升速率与壳体导热系数关系曲线见图 6；3 种壳体材料相关物性参数见表 1。

表 1 各壳体材料相关参数

材料	密度/ (g/cm^3)	导热系数/ ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	比热容/ ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)	备注
钛合金(TC4)	4.50	7.955	2 521	20℃参数
铬镍钢(30CrMnSiNi2A)	7.85	10.1	460	20℃参数
铝合金(87AL-13Si)	2.70	162	871	20℃参数

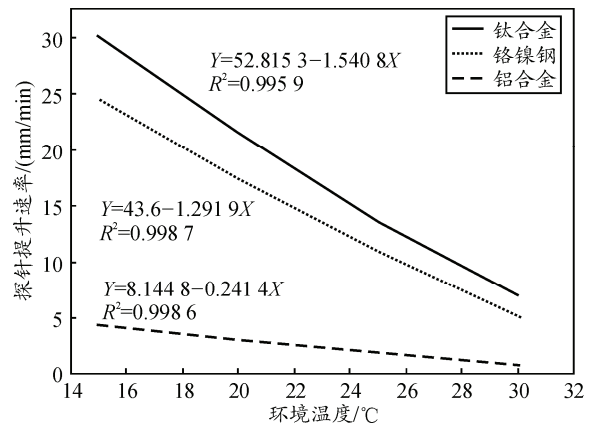


图 3 3 种壳体探针提升速率-环境温度关系曲线

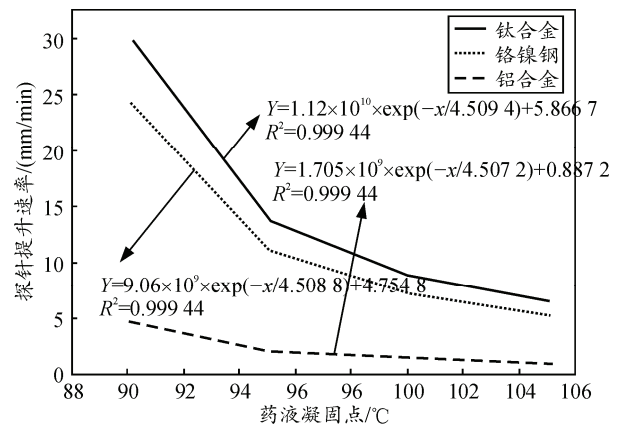


图 4 3 种壳体探针提升速率-药液凝固点关系曲线

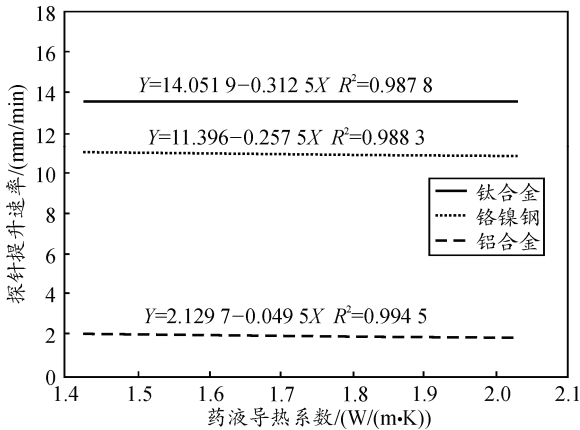


图 5 3 种壳体探针提升速率-药液导热系数趋势对比

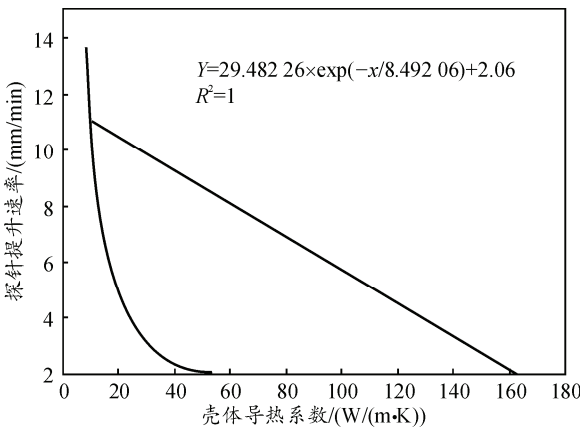


图 6 探针提升速率-壳体导热系数关系曲线

由表 1 及图 3 可看出：同一环境温度下，探针提升速率随导热系数的增大而降低，且导热系数越小，探针提升速率降低幅度越大；同一材料壳体，探针提升速率随环境温度的增加而降低，与环境温度呈直线关系；当壳体材料导热系数较大时，探针提升速率受环境温度变化较不明显，但均呈直线变化。由表 1 及图 4 可看出：同一材料壳体，探针提升速率与药液凝固点呈 1 阶指数，且随着药液凝固点的增加呈 1 阶指数衰减关系，相同药液凝固点时，壳体导热系数越大探针提升速率越小，主要是由于壳体导热系数大时，相同时间通过壳体传递到环境的热量愈多，壳体内部药液不能及时对已凝固炸药进行补缩，只有通过探针加热周围药液进行补缩，才能满足药液由外而内凝固时的传热行为。由表 1 及图 5 可看出：同一材料壳体，探针提升速率随药液导热系数的增加呈直线递增，且变化趋势均比较缓慢，直线斜率均小于 0.5，导热系数越大，直线斜率越小；同一药液导热系数条件下，导热系数越

小探针提升速率越大。由表 1 及图 6 可看出：熔铸装药过程其他工艺参数相同的条件下，探针提升速率随壳体导热系数的增加而降低，且呈 1 阶指数衰减关系，由捏合曲线可知，当壳体导热系数大于 75 W/(m·K)时，曲线基本趋于水平，说明导热系数的变化对探针提升速率影响不大。上述分析结果与实际生产中探针护理熔铸装药结果一致。

3 结束语

通过常规稳态导热微分方程，对熔铸装药探针护理过程进行热力学分析，结论如下：

- 1) 同一材料壳体，探针提升速率随环境温度的增加而降低且呈斜率为负值的直线变化关系，不同材料壳体，当环境温度较低时，探针提升速率相差较大，当环境温度达到某一最大值时，探针提升速率相同。
- 2) 在壳体材料不同，药液凝固点相同的条件下，探针提升速率随壳体导热系数的增加而降低，导热系数越大探针提升速率降低幅度越小，且同一壳体材料，探针提升速率与药液凝固点均呈 1 阶指数衰减关系。
- 3) 在壳体材料不同，药液导热系数相同的条件下，探针提升速率随壳体导热系数的增加而降低，且同一壳体材料，探针提升速率与导热系数呈斜率为负的直线关系。
- 4) 在壳体材料不同，其余相同的条件下，探针提升速率随壳体导热系数的增加而降低，且呈 1 阶指数衰减变化，当壳体导热系数大于 75 W/(m·K)时，曲线基本趋于水平。

参考文献：

- [1] 温世武, 姚兰英. 装药工程[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2008: 45-50.
- [2] 姜波, 齐杏林, 崔亮, 等. 发射装药保温时间的模拟计算[J]. 火工品, 2010, 137(3): 48-49.
- [3] 戴锅生. 传热学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1998: 24-32.
- [4] 章熙民, 任泽霖, 梅飞鸣, 等. 传热学[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985: 113-128, 148-172.
- [5] 戴锅生. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1991: 143-180.
- [6] 李斌. 传热学自学指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 204-205.