

Ti-1023 钛合金等温锻造模具温度场的边界元模拟

李卫民*

(泰州职业技术学院 机电工程系, 江苏 泰州 225300)

摘要: 以 Ti-1023 钛合金等温锻造模具为研究对象, 对热源、模具温升进行详细分析, 运用边界元法模拟模具温度场, 绘制温度等值线, 验证了模拟结果的正确和可行性, 为等温锻造工艺和模具加热系统设计提供了理论依据。

关键词: 等温锻造; 温度场; 边界元法

中图分类号: TG316 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2005) 04-0049-04

Boundary element simulation of the temperature field of Ti-1023 alloy isothermal-forging mold

LI Wei-min

(Mechanical and Electronic Department, Taizhou Polytechnical Institute, Taizhou Jiangsu 225300, China)

Abstract: In this paper, the mold temperature fields in isothermal-forging are analyzed by the Boundary Element Method, the constant temperature lines are drawn and then the results are verified being regarded as the theoretical basis for designing the Isothermal-forging process and the mold heat system.

Keywords: isothermal-forging; the boundary element method; temperature field

1 前言

等温锻造 (Isothermal-forging) 是模具加热到与毛坯成形温度相同的温度, 使毛坯在相对恒定的温度下, 利用液压机以较慢的变形速度成形, 获得预期形状和尺寸的锻造方法。

等温锻造过程是一个非常复杂的金属塑性成形过程, 锻造时最佳锻造条件的选择并非易事。为了获得最佳锻造条件, 锻造温度的确定非常重要。由于在整个等温锻造过程中, 模具与锻材始终保持同一加工温度, 锻坯锻造温度最终确定于模具的温度。因此, 在等温锻造工艺过程中, 模具的加热温度、加热方式、加热装置以及模具温度场的实际状况等对等温锻造工件质量都有影响, 必须正确地制定和设计。

2 模具装置简图及加热系统

图 1 所示为电阻丝单加热器等温锻造用模具装置。上下模座及加热器 10 在同一加热空间, 加热器装在下模并直接加热下模和活动压头 7, 组合凹模 8 通过模座加热到等温锻造所要求的温度, 由于上下模被保温罩 6、9 封闭在同一空间中, 上模通过热辐

射和对流被加热, 温度低于下模, 其只起施加压力的作用, 并不与锻件直接接触, 不影响锻件成形。当模具装置达到热平衡时, 加热器只供给部分功率, 以维持热平衡状态时, 模具装置向外散失的热量。

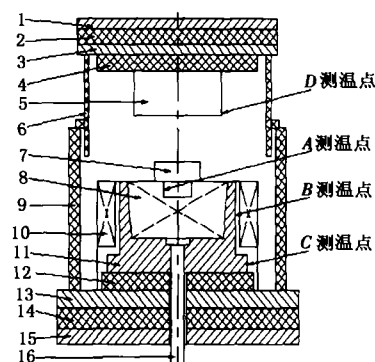


图 1 模具装置简图及测温点分布

1. 上模底板 2. 上模板隔热层 3. 上模安装板 4. 上模座隔热层
5. 上模 6. 上保温罩 7. 活动压头 8. 组合凹模 9. 下保温罩
10. 加热器 11. 下模座 12. 下模座隔热层 13. 下模安装板
14. 下模板隔热层 15. 下模底板 16. 顶杆

Fig. 1 Sketch of mould and the distribution of temperature testing points

在许多等温精密锻造实例中, 为避免上下模错移, 通常在模具上设置导向机构, 增加了模具结构的复杂性和装配精度。为了解决这一问题, 本文设计的等温精密锻造模具采用闭式模锻方法, 闭式模

* 男, 31 岁, 讲师

收稿日期: 2004-09-01

锻使整个毛坯在组合凹模 8 中成形, 活动压头 7 只起中间传递压力的作用, 同时是闭式型腔的一部分, 这样, 在放置活动压头时只要一般定位即可, 从而简化模具结构和操作。

模具加热温度的测量是通过插在上下模测温孔和下模型腔内的热电偶来进行的, 测温过程通过 ZWK 型可控硅控温仪来控制。如图 1 所示, A、B、C、D 4 点为测温点, A 点为模拟结果检测点, B 点是模具温度控制点, 同时, B、C 两点为边界条件点, D 点的测量是为了便于计算边界辐射参数。根据实验结果, 作了如图 2 所示的 A、B、C 3 点的温升曲线图。在模具处于保温 2h 30min 后, 测量了 D 点的温度为 600℃。

从图 2 中可以看出, 开始加热时, 下模外壁温度升温非常迅速, 直到温度达到 890℃时, 下模外壁开始保温, 温度始终保持在 890℃, 呈水平直线。当 B 点处于保温状态时, A 点、C 点还在缓慢地升温, 当 A 点温度达到 813℃, C 点温度达到 706℃以后, 系统进入了平衡保温状态。

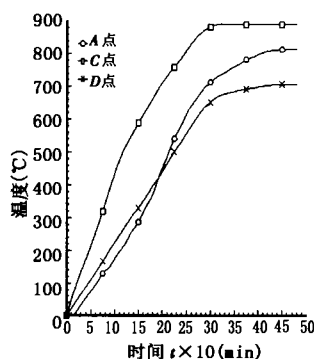


图 2 A、B、C 点温升曲线概貌

Fig. 2 Curve of temperature rise at points of A、B、C

系统热态模型可表达为:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q' + Q''$$

式中 Q ——电能转化而得的热能

Q_1 ——上模底板传出的热量

Q_2 ——系统内对流、传导以及辐射的热量

Q_3 ——保温罩传出的热量

Q_4 ——下模底板传出的热量

Q' ——系统蓄热

Q'' ——热损失

3 下模温度场的边界元模拟及模拟结果分析

边界元法是 20 世纪 80 年代兴起的一种数值计

算方法, 利用控制微分方程的基本解建立相应的边界积分方程, 再结合边界的剖分而得到离散算式。由于只在边界上划分, 实际上是将问题降维处理, 降维的结果必然减少代数方程组的未知数。由于积分方程可用加权余量法得到, 即由于近似函数而引起的误差得到合理分配, 从而达到最佳效果。因此利用边界元方法分析模具温度场问题具有其他方法不可比拟的优越性。

设热传导问题的控制方程为:

$$C \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (\text{在 } \Omega \text{ 内}) \quad (1)$$

边界条件:

$$T = \bar{T} \quad (\text{在 } \Gamma_1 \text{ 边界上}) \quad (2)$$

$$q = -\frac{\partial T}{\partial n} = \bar{q} \quad (\text{在 } \Gamma_2 \text{ 边界上}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_f - T) \quad (\text{在 } \Gamma_3 \text{ 边界上}) \quad (4)$$

初始条件应满足:

$$T = T_0, t = 0 \quad (\text{在 } \Omega \text{ 内}) \quad (5)$$

式中 C ——导热系数 (m^2/s)

T_f ——域外气体的温度 ($^{\circ}\text{C}$)

α ——换热系数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$)

λ ——材料的导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$)

对式 (1~4) 引入权函数 T^* , 由加权余量法得:

$$\int_0^t \int_{\Omega} \left(\nabla^2 T - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) T^* d\Omega dt = \int_0^t \int_{\Gamma_1} (T - \bar{T}) q^* d\Gamma dt - \int_0^t \int_{\Gamma_2} (q - \bar{q}) T^* d\Gamma dt - \int_0^t \int_{\Gamma_3} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial n} - \alpha (T_f - T) \right] T^* d\Gamma dt \quad (6)$$

式中 T^* 为热传导问题的基本解, 其表达式为:

$$T^*(r, t; r_i, \tau) = \frac{1}{[4\pi\alpha(t-\tau)]^{3/2}} \exp\left(-\frac{R^2}{4\alpha(t-\tau)}\right) \quad (7)$$

q^* 为基本解的边界法向导数:

$$q^*(r, t; r_i, t) = \frac{\partial T^*}{\partial n} = \frac{-R}{2\alpha(t-\tau)} \frac{\partial R}{\partial n} T^* \quad (8)$$

式中 R 表示集中热源点到场点的距离:

$$R = |r - r_i|$$

考虑如下两个函数:

$$T = T(r, \tau), T^* = T^*(r, t; r_i, \tau)$$

可以看出, 函数 T 和 T^* 是两个伴随方程的解, 并且有:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (TT^*) = T^* \frac{\partial T}{\partial \tau} + T \frac{\partial T^*}{\partial \tau} = \alpha (T^* \nabla^2 T - T \nabla^2 T^*) \quad (9)$$

上式两端对空间和时间作积分, 并结合格林第二定理, 可得:

$$c_i T_i = \alpha \int_0^t \int_{\Gamma} \left(T^* \frac{\partial T}{\partial n} - T \frac{\partial T^*}{\partial n} \right) d\Gamma dt + \iint_{\Omega} T_0 T_0^* d\Omega \quad (10)$$

式中

$$c_i = \begin{cases} 1 & \in \Omega \\ 1/2 & \in \Gamma(\text{光滑边界}) \\ (1 - \theta/2\pi)/(1 - \theta/4\pi) & \in \Gamma(\text{不光滑边界}) \end{cases}$$

根据边界条件公式 (2~4), 式 (10) 可写成:

$$c_i T_i + \alpha \int_0^t \int_{\Gamma} (q^* + \frac{\alpha}{\lambda} T^*) T d\Gamma d\tau = \alpha \int_0^t \int_{\Gamma} q T^* d\Gamma d\tau + \iint_{\Omega} T_0 T^0 d\Omega \quad (11)$$

$$\text{式中 } q = \begin{cases} \partial T / \partial n & \in \Gamma_1 \\ \bar{q} & \in \Gamma_2 \\ \alpha T_i / \lambda & \in \Gamma_3 \end{cases}$$

将热传导问题的基本解 (7) 沿环向积分可得到轴对称热传导问题的基本解:

$$T_{As} = \int_0^{2\pi} T^* d\theta = \frac{2\pi}{[4\pi\alpha(t-\tau)]^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2 + r_i^2 + (x-x_i)^2}{4\alpha(t-\tau)}\right] I_0 \frac{r_i}{2\alpha(t-\tau)} \quad (12)$$

轴对称热传导问题基本解的法向导数为:

$$q_{As} = \frac{\partial T_{As}}{\partial n} = \frac{1}{8\sqrt{\pi}[\alpha(t-\tau)]^{5/2}} \exp\left[-\frac{r^2 + r_i^2 + (x-x_i)^2}{4\alpha(t-\tau)}\right] \cdot \left\{ \left[r I_0 \left(\frac{r_i}{2\alpha(t-\tau)} \right) - r_i I_1 \left(\frac{r_i}{2\alpha(t-\tau)} \right) \right] \frac{\partial r}{\partial n} + (x-x_i) \cdot I_0 \left(\frac{r_i}{2\alpha(t-\tau)} \right) \frac{\partial x}{\partial n} \right\} \quad (13)$$

上式中, I_0 , I_1 为零阶和一阶 Bessel 函数:

$$I_0(y) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi e^{y \cos \theta} d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{y \cos(\theta-\theta_i)} d\theta$$

$$I_1(y) = \frac{dI_0}{dy}$$

将式 (12)、(13) 代入 (11), 可得到:

$$c_i T_i + \alpha \int_0^t \int_{\Gamma} r (q_{As} + \frac{\alpha}{\lambda} T_{As}) T d\Gamma d\tau = \alpha \int_0^t \int_{\Gamma} r q T_{As} d\Gamma d\tau + \iint_{\Omega} r T_0 T_{As0} d\Omega \quad (14)$$

式 (14) 即为轴对称热传导问题的边界积分方程, 其中 Γ 为 r 和 x 形成的半平面的边界。对边界积分离散, 可建立边界元求解的线性方程组, 从而求解边界节点的温度, 在已知边界节点温度条件下, 由式 (14) 又可求得域内任何一点的温度。

如图 3 所示, 下模传热方式以导热为主, 因其材料本身缺陷产生的周向温度及热流一般是很少的, 可以忽略不计, 且下模无内热源。所以, 只存在第 1 和第 3 边界条件。根据程序计算结果, 本文选取其中 3 个典型面 OP、OQ、OR 面作为研究对象, 绘制了 OP、OQ、OR 面的等温线。如图 4、5、6 所示, 等温线图中, X 轴是以模具下模中心线为轴, 下模顶面型腔中心为始点的轴线; R 轴是以下模圆周半径方向为轴, 下模顶面型腔中心点为零起点的轴线。该等温线精确的反映了 3 种典型情况下的温度分布状况。3 种典型面中的等温线分布与下模中的热流方向垂直, 符合热流线必须与等温线垂直相交的理论。模座外壁温度控制在 890°C , 下模型腔表面最低温度为 811.739°C , 下模型腔表面最高温度为 812.63°C 。模座外壁与下模型腔表面最大

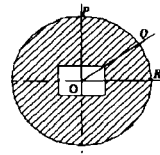


图 3 下模座横截面

Fig. 3 Cross section of the bottom mould seat

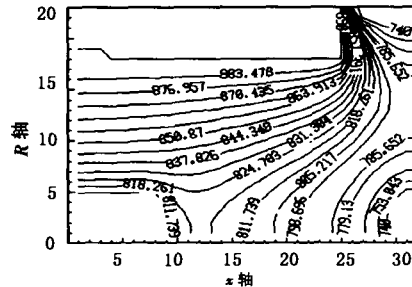


图 4 OP 面等温线 (1/2)

Fig. 4 Constant temperature lines of OP section (1/2)

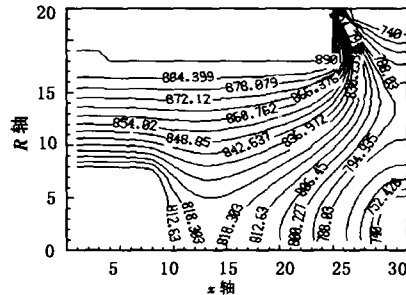


图 5 OQ 面等温线 (1/2)

Fig. 5 Constant temperature lines of OQ section (1/2)

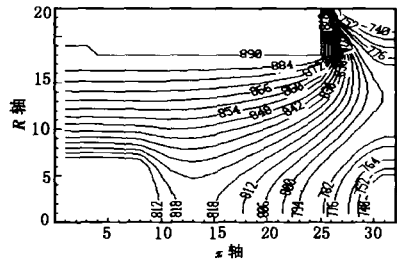


图 6 OR 面等温线 (1/2)

Fig. 6 Constant temperature lines of OR section (1/2)

温差为 78.261°C , 该温差非常重要, 热电偶正是根据这一温差, 并控制模座外壁温度, 使下模温度达到等温锻造工艺所要求的范围; 下模型腔表面间的最大温差为 0.891°C , 非常小, 使钛合金在理论规定的范围内进行了等温锻造。因此, 3 种典型面中的等温线分布与实际等温线相吻合。

从以上模拟的结果可以看出, 不论是程序计算结果, 还是等温线的分布, 都与实际情况比较吻合, 所以, 采用计算机模拟分析模具热场, 准确度较高,

提高 D2 模具钢轧材使用寿命的研究

李志宏^{1*}, 任学平²

(1. 四川工程职业技术学院, 四川 德阳 618000; 2. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 为提高 D2 冷作模具扁钢轧材的使用寿命, 进行了一系列实验与探究: 在化学成分方面, 采用添加稀土的方法; 在最终热处理方面, 采用正交实验法进行工艺优化, 选用 4 个淬火温度, 4 个回火温度, 两种回火次数和 4 种回火时间, 再综合考虑是否添加稀土等因素, 通过大量实验对比, 优选出一个最佳热处理工艺, 与原生产工艺下的材质相比, 试样的耐磨性和冲击韧性均大为改善, 从而达到提高 D2 模具扁钢轧材使用寿命的目的。

关键词: D2 冷作模具钢; 最终热处理; 正交实验

中图分类号: TG335 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2005) 04-0052-04

Study on increasing the service life of D2 die steel rolled section

LI Zhi-hong¹, REN Xue-ping²

(1. Sichuan Engineering Technical College, Deyan Sichuan 618000, China;

2. School of Material Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to increase the service life of the D2 die steel rolled section for cold working, a series of experiments and investigations are finished according to that as far as the chemical composition is concerned, the way of increasing Re is adopted; For the finished heat treatment, we adopt normal experiment to seek optimum technology and select four quenching temperature points, four tempering temperature points and two tempering times as well as four tempering time; Afterwards we make the consideration of whether we will increase Re or not and finally, we choose out the optimum heat treatment technology by a lot of trial comparisons. Compared with the material under the former technology condition, we find that the material properties are greatly improved on the wearability, impact toughness and so that the purpose to increase the service life of D2 dies has been realized.

Keywords: D2 die steel for cold working; finished heat treatment; normal experiment

1 引言

高碳高铬型 (1.5% C, 12% Cr) 冷作模具钢

D2 是目前国际上广泛应用的冷作模具材料, 属于美国 ASTM A681 工具钢标准中的钢号。由于它具有高硬度、高耐磨性、高淬透性和小的热处理变形性等特性, 比较适合大截面、高精度和长寿命模具的制造。在我国, D2 钢正在逐步地取代 Cr12MoV 钢。

*男, 34 岁, 讲师, 硕士
收稿日期: 2005-05-08

可以计算出模具内各点温度, 整个模具装置的设计特别是加热系统的设置是正确和可行的。

4 结论

本文研究的 Ti-1023 钛合金等温锻造模具是在 30 000kN 液压机上正常工作的, 采用闭式模锻, 下模镶嵌在下模座里。通过计算分析, 得出如下结论:

(1) 钛合金等温锻造温度是关键参数, 通过模拟分析, 模座外壁温度控制在 890℃ 以下, 下模型腔表面最低温度为 811.739℃, 最大温差为 78.261℃。

(2) 温度场计算程序的开发为钛合金等温锻造工艺中模具的加热温度的计算、验证加热装置的正确与

否提供了理论依据。同时为模具的优化设计, 以及获得合理的锻件微观组织及性能提供了可行的理论依据。

(3) 隔热保温层有效地发挥了作用, 最大限度地避免了模具热量的损失, 缩小了模具温差, 提高了模具的加热效率。

参考文献:

- [1] 祝林森. 金属成形过程的计算机模拟 [J]. 航空精密制造技术, 1990, 23 (4): 30-34.
- [2] 陈静波, 申长雨, 高峰, 等. 注塑模冷却分析的边界元法 [J]. 塑料工业, 2002, 30 (1): 23-25.
- [3] 杨德全, 等. 边界元理论及应用 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2002.