

# BT22 钛合金固溶冷却过程中温降特性分析

吴晓东<sup>1,2</sup>, 葛 鹏<sup>2</sup>, 杨冠军<sup>2</sup>, 毛小南<sup>2</sup>, 周 伟<sup>2</sup>, 冯宝香<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘 要:** 采用 ANSYS 有限元分析软件对 BT22 钛合金固溶热处理后降温阶段温度场进行模拟, 并绘制热处理工件在降温过程中的温度分布等值图, 从温度-时间曲线和工件内部不同部位温度曲线两个角度分析温降的不均匀性。通过对比实测曲线和模拟曲线发现两者的相对误差在 2%~5%, 同时把实测降温曲线分为 3 个阶段: 快速降温阶段、平缓降温阶段和慢降温阶段, 并分析其形成的原因。

**关键词:** BT22 钛合金; 热处理; 温度场; 计算机模拟

**中图分类号:** TG146.2<sup>+3</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2010)02-0249-05

BT22(TC18)是原苏联研制成功的一种高强高韧近  $\beta$  钛合金<sup>[1]</sup>。其名义成分为 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe。该合金淬透性高并具有令人满意的强塑性, 因此可制成大型锻件、模锻件和高强承力件。但是大规格锻件生产过程中需要大量的前期投入, 产品一旦报废, 将造成很大的损失。在进行新的工艺探索时, 大锻件由于尺寸大, 不可能对不同尺寸的大规格锻件一一进行等尺寸的实物试验, 而小试样试验会与实际生产过程相差很大, 并且具有一定的局限性。为了解决这一问题, 用计算机对热处理过程进行数字化模拟得到越来越广泛的应用, 并且这一方法为大规格锻件热处理过程中其内部温度场的了解提供了可能。有些学者对热处理加热炉温度场的数字模拟做了大量的工作<sup>[1,2]</sup>, 还有学者对热处理大尺寸工件在升温过程内部温度场进行了模拟<sup>[3,4]</sup>。前人的工作都反映了大工件在加热过程中由于其尺寸大, 导致内外升温的不均匀。

但是大工件热处理后, 出炉冷却降温过程由于尺度大会引起降温缓慢使得内外温差较大。尤其像 BT22 钛合金这种以固溶时效为主要热处理工艺来强化的合金, 固溶后冷却缓慢在工件内部产生的温差对工件性能的影响尤为明显。对这一问题的研究很少有人报道。本研究用有限元软件 ANSYS 对大规格工件固溶冷却过程的温降特性进行研究, 同时绘制工件内部特征点温度随时间的变化关系。最后通过试验验证计算机模拟热处理的可行性。

## 1 实 验

本实验用模拟和实测两种方法对工件的降温过程进行研究。选用虚拟仿真有限元软件 ANSYS 对中规格 BT22 钛合金固溶处理后空冷过程中内部温度场进行模拟。选定的降温曲线特征点为工件的心部, 其坐标为(0, 0, 0.0225)。

采取图 1 所示方法实测工件内部温度变化曲线。

工件尺寸为  $\phi 170 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ , 初始温度为热处理出炉时的温度  $875 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_{\beta}+30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 和  $810 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_{\beta}-35 \text{ }^\circ\text{C}$ )。外界空气温度为  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 。工件中心(特征点)钻出小尺寸盲孔, 铂铑热电偶插入盲孔内并由测温表记录每分钟温度变化。由于工件尺寸较大, 盲孔尺寸较小, 电偶与孔缝隙热散失可忽略不计, 这样测温表读出的数值能比较准确地反映工件内部的真实温度变化。

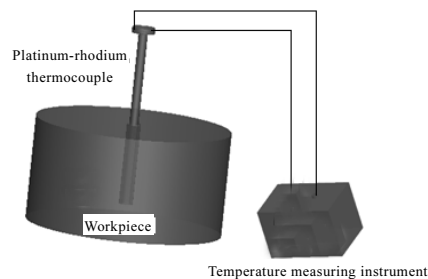


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Sketch map of tester

收稿日期: 2009-01-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划((2007CB613805)

作者简介: 吴晓东, 男, 1984 年生, 硕士, 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055, 电话: 029-86231078, E-mail: wuxiaodong020312@163.com

试验采用小试样来模拟大锻棒固溶冷却过程中的内部组织的演变情况。采用在大锻棒的心部钻出  $\phi 12 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$  的盲孔,把小试样放入孔中进行热处理模拟。可通过分析小试样组织了解大锻棒内部的组织演变。以工件热处理降温实测曲线拐点对应的降温时间作为制备显微组织分析样品的依据,  $875 \text{ }^\circ\text{C}$  降温取样时间为 5, 16, 22 min。  $810 \text{ }^\circ\text{C}$  降温取样时间为 8, 15, 37 min。试样热处理后经砂纸打磨抛光制成金相样,用  $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}=1:3:7$  作为腐蚀剂对试样表面进行腐蚀。采用 OLYMPUS PMG3 光学显微镜对试样热处理组织进行观察和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 数学模型的建立

工件冷却过程中的影响因素很多,在软件求解过程中把所有因素都考虑是不现实的,因此在复杂的实际条件下合理假设和简化是很有必要的。本模型作如下假设和简化:(1) 假定圆柱体工件冷却过程中对流传热是均匀的,这样模型就可以简化成 1/4 圆柱体;(2) 钛合金工件在冷却过程中相变热暂不考虑;(3) 假设圆柱体工件无限长,也就是说辐射和对流传热发生在侧面,工件与架板之间的接触传热不考虑。

工件在空气冷却过程中辐射和对流传热是主要的传热过程,因此两者满足的换热条件为:

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\tau} = H(T_w - T_A) \quad (1)$$

式中,  $H$  和  $\tau$  分别表示总的换热系数和换热边界,  $T_w$  为工件表面温度,  $T_A$  为周围空气温度。三维对流传热问题可看成是静态导热和由于流体宏观流动造成的热量转移所产生的复合作用。因此工件三维温度场模型为:

$$\begin{aligned} \rho(t)c(t)\left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}\right) \\ = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为沿壁面流体导热系数。模型边界条件为牛顿对流边界,也就是对流和辐射混合的换热边界,其表达式为:

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\tau} = h(T_w - T_A) + h_s(T_w^4 - T_A^4) = H(T_w - T_A) \quad (3)$$

式中,  $H$  为总换热系数,  $H = h + h_s$ 。  $h$ ,  $h_s$  分别为对流传热系数和辐射换热系数。

### 2.2 有限元模型的建立

有限元模拟其具体过程分为 3 步:建模,根据热处理工件实际尺寸建立模型,由于模型的对称性,

取 1/4 建模作为分析对象;施加载荷,本研究视圆柱体工件无限长,也就是工件只有侧面施加的折算为对流换热系数的辐射换热系数和自然对流换热系数总的面载荷;求解,根据实测降温曲线设定载荷步持续时间间隔为 4200 s,时间步长为 60 s。ANSYS 有限元软件进行热分析的基本原理是将所处理的对象首先划分有限个单元(每个单元包含若干个节点),然后根据能量守恒原理求解一定边界条件和初始条件下每一节点处的热平衡方程,由此计算出各节点的温度值,进而求出其他相关量<sup>[5]</sup>。因此,在建模之前首先要定义单元类型和材料属性。分析中选择 SOLID70 八节点六面体单元,六面体每个顶点都是一个节点。热处理所用钛合金其热传导率和比热容是温度的函数,如图 2。

有限元计算利用的是有限元模型,因此在 ANSYS 软件中建立的实体模型必须网格化转换成有限元模型。施加在实体边界上的载荷最终传递到模型上的节点或单元上进行求解。图 3 是建立的有限元模型。模型中共 38 238 个单元,7293 个节点。

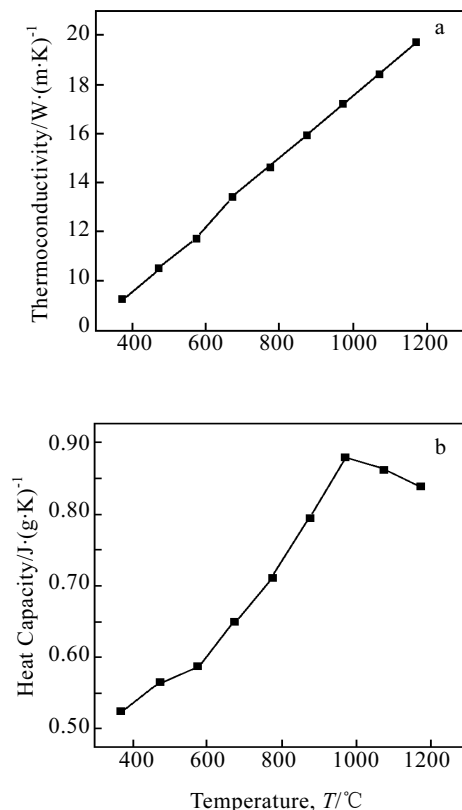


图 2 材料属性曲线

Fig.2 Material property curve: (a) thermoconductivity-temperature curve and (b) heat-capacity temperature curve

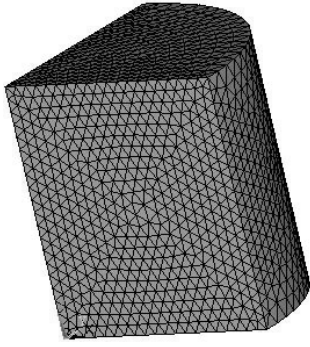


图 3 有限元模型

Fig.3 Finite element model

### 2.3 模型的求解与分析

工件在空气中冷却其温度场随时间变化而变化，也就是说模型中施加的载荷是随时间变化的，因此要用瞬态热分析来分析这一过程<sup>[6]</sup>。

图 4 是工件 875 °C 降温 30 min 的温度分布等值图。图中工件的温度分布差别很大，等值图中工件内外心部区域和边部区域温差达 70 °C。等温区呈层状分布。

模拟等值图中温度的分布呈层状，并且温度沿着半径方向从里向外依次降低，这一现象可由傅里叶定律来解释。热量从工件内部向外部传递遵循傅里叶定律，用以下关系式描述：

$$q^* = \frac{KA\Delta T}{d}$$

假定材料在 500 °C 左右热传导系数  $K$  不变，相同热传导距离  $d$  下，外部由于与空气接触热流密度远远大于内部，因此工件外围温差大于内部(图 5)，在图 5 中反映为曲线斜率随着距中心距离增大而增大。这种降温过程中大工件内外较大的温差可以解释大规格锻棒热处理后内部组织的不均匀性。

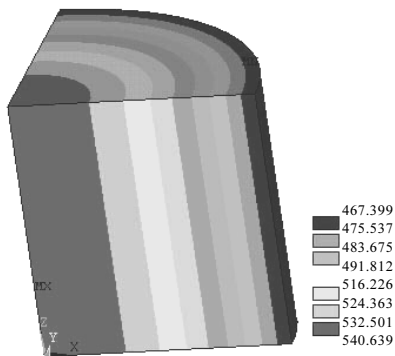


图 4 工件降温 30 min 温度分布等值图

Fig.4 Temperature isopleth map of workpiece after cooling for 30 min

图 6 给出了工件内部中心点实测曲线与模拟曲线。可以看出，实测曲线与模拟曲线吻合得比较好，模拟曲线在 ab 段稍高于实测曲线是因为软件计算中所加的辐射换热系数期望值小于实际值，模拟计算中减少了工件向外辐射的热量，因此实测曲线低于模拟曲线。而在 d 点以后，软件计算中所加的辐射换热系数期望值高于实际值，模拟这一阶段向外辐射的热量高于实际，因此模拟曲线低于实测曲线。两者大致呈双曲线走向，300 °C 以上其相对误差在 2%-5%。但是实测曲线在 bc 处被一段平缓曲线分为 3 部分，对应着降温的 3 阶段：快速降温阶段，这一阶段由于工件刚接触空气，两者之间温差相当大，工件向外辐射和外围对流传热相当剧烈，因此温度随时间变化很快，降温速率达到 20.3 °C/min；平缓降温阶段，这一阶段温度变化放缓，降温速率降至 3.3 °C/min，但是这一阶段只持续了 7 min 左右就进入了第 3 阶段；慢降温阶

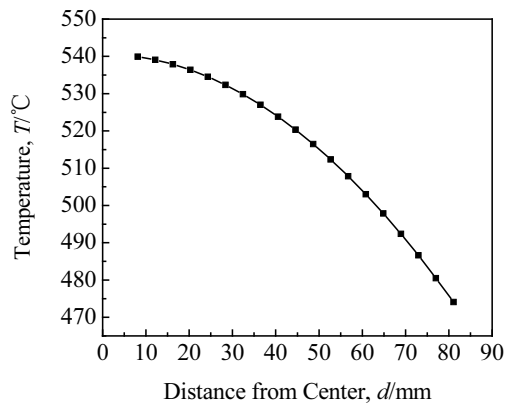


图 5 工件内部温度曲线

Fig.5 Temperature curve of workpiece interior

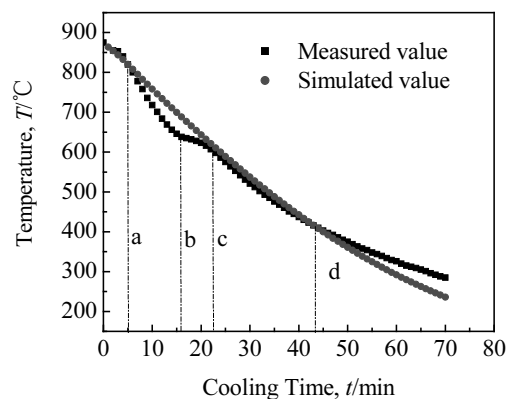


图 6 工件 875 °C 降温温度-时间曲线

Fig.6 Temperature-Time curve of work piece cooled at 875 °C: (a) 5 min, (b) 16 min, (c) 22 min, and (d) 43 min

段, 这一阶段降温速率明显又增大, 达到  $9.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 并持续到最后。875  $^{\circ}\text{C}$  降温模拟曲线由于之前没有考虑钛合金工件在冷却过程中相变, 因此降温过程中没有平缓的阶段曲线, 呈一条平滑的曲线。

图 7 为 3 张 OM 照片对应图 6 曲线上 a, b, c 3 点。材料是加热到相变点之上开始降温的, 温度降至 a 点, 有很少量的  $\alpha$  相在  $\beta$  晶界和晶内析出, 降至 b 点,  $\beta$  晶内  $\alpha$  相数量有所增加, 到 c 点金相照片显示析出的  $\alpha$  相布满了整个  $\beta$  晶粒。这样就不难解释为什么曲线会有一段平缓的部分, 在这一阶段大量的  $\alpha$  相析出, 所释放的相变潜热部分抵消了工件降温散失的热量, 因此降温速率变得平缓。过了这一阶段, 虽然  $\alpha$  相也有析出但是析出相放出的潜热小于工件散失的热量, 降温速率又增大。

图 8 是工件 810  $^{\circ}\text{C}$  固溶后冷却模拟和实测降温曲

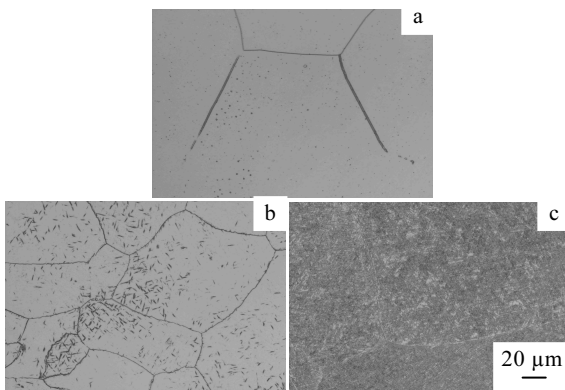


图 7 材料 875  $^{\circ}\text{C}$  降温 3 阶段组织

Fig.7 Microstructures of three phases from 875  $^{\circ}\text{C}$  cooling down: (a) cooling for 5 min, (b) cooling for 16 min, and (c) cooling for 22 min

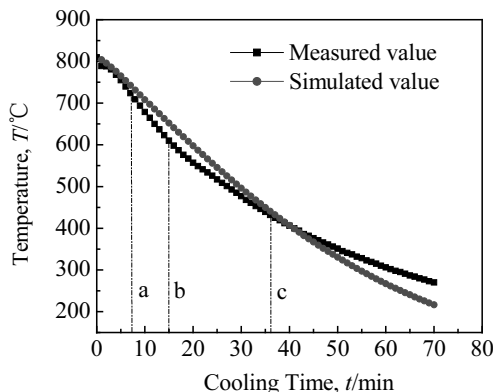


图 8 工件 810  $^{\circ}\text{C}$  降温温度-时间曲线

Fig.8 Temperature-time curve from 810  $^{\circ}\text{C}$  cooling down: (a) cooling for 8 min, (b) cooling for 15 min, and (c) cooling for 37 min

线。可看出两者都是比较平滑的曲线, 实测曲线在 15 min 处有一个拐点。拐点处把曲线分为两阶段, 第 1 阶段降温速率达  $14.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 第 2 阶段降温速率降至  $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

图 9 为 3 张 OM 照片对应图 8 降温曲线中 3 点。照片中可看出降温到 a 点处组织主要是条状  $\alpha$  相, 在初生  $\alpha$  相之间有少量球状次生  $\alpha$  相析出, 经分析  $\alpha$  相含量大约 35%。ab 阶段次生  $\alpha$  相大量析出并长大, 因此降温曲线有一个拐点, 降温至 b 点  $\alpha$  相含量大约 70%。bc 阶段次生  $\alpha$  相析出仍在继续,  $\alpha$  相含量大约 90%, 并伴随着  $\alpha$  相的长大。

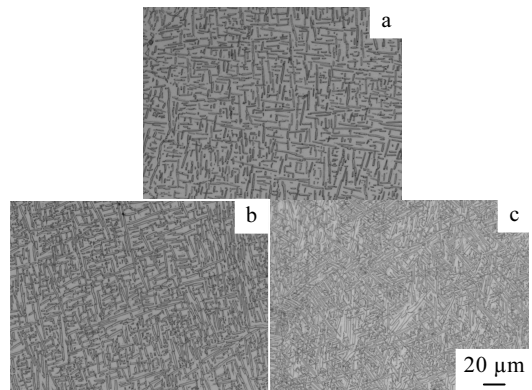


图 9 材料 810  $^{\circ}\text{C}$  降温组织

Fig.9 Microstructures from 810  $^{\circ}\text{C}$  cooling down: (a) cooling for 8 min, (b) cooling for 15 min, and (c) cooling for 37 min

### 3 结 论

- 1) 中规格 BT22 钛合金工件热处理降温过程中其内外温差可达  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。
- 2) 采用 ANSYS 有限元分析软件能比较准确反映工件热处理过程中的热过程。通过模拟测得降温过程的温度值相对误差在 2%~5%。
- 3) 工件在模拟降温过程中由于没有考虑相变热, 降温曲线是一平滑曲线, 但实际降温过程中由于相变热的存在, 875  $^{\circ}\text{C}$  降温曲线中会存在一段平缓的阶段, 但时间不会很长。

#### 参考文献 References

[1] Wei Shouyong(魏寿庸), Zhu Pu(祝瀑), Wang Weiqi(王伟琪). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 1998, 15(4): 4

[2] Ren Yanqiu(任雁秋), Li Yike(李义科), He Youduo(贺友多) et al. *Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology*(包头钢铁学院学报)[J], 1999, 18(4): 423

[3] He Youduo(贺友多), Liu Zhongxing(刘中兴), Li Baowei(李

- 保卫) *et al. Iron & Steel*(钢铁)[J], 1989, 24(3): 55
- [4] Yu Wanghua(余万华), Liu Xinzhong(刘新忠), Dai Shifeng(戴石峰) *et al. Steel Rolling*(轧钢)[J], 2005, 22(5): 17
- [5] Cheng Xiuling(程秀玲), Li Shengli(李胜立), Shan Shuiwei(单水维). *Southern Metals*(南方金属)[J], 2007, 28(5): 5
- [6] Zhang Zhaohui(张朝晖). *ANSYS8.0 Thermal Analysis Tutorial and Example*(ANSYS8.0 热分析教程与实例解析)[M]. Beijing: China Railway Press, 2005: 3

## Temperature Drop Characteristic Analysis of Solid-Solution Treated BT22 Titanium Alloy during Cooling

Wu Xiaodong<sup>1,2</sup>, Ge Peng<sup>2</sup>, Yang Guanjun<sup>2</sup>, Mao Xiaonan<sup>2</sup>, Zhou Wei<sup>2</sup>, Feng Baoxiang<sup>1</sup>

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** Internal temperature field of solid-solution treated BT22 titanium alloy during cooling was simulated using ANSYS finite element software and the temperature isopleth map of workpieces was plotted during this procedure. Inhomogeneity of temperature distribution during cooling was analyzed from two points of view, i.e. the temperature-time curve and position-temperature curve of workpiece interior. By comparison the relative error of actual curve and simulation curve is 2%-5%. The actual cooling curve was divided into three phases: fast cooling phase, gentle cooling phase and slow cooling phase. The reason of phase formation was also analyzed.

**Key words:** BT22 titanium alloy; heat treatment; temperature field; computer simulation

---

Corresponding author: Wu Xiaodong, Master, School of Metallurgy Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-29-86231078, E-mail: wuxiaodong020312@163.com