

## TC18 钛合金热锻成形换热系数实验研究

张海成<sup>1,2</sup>, 昌春艳<sup>3</sup>, 周 杰<sup>2</sup>

(1. 中国第二重型机械集团德阳万航模锻有限责任公司, 四川 德阳 618000;

2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400000; 3. 四川建筑职业技术学院 基础教学部, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 在 TC18 钛合金热锻成形过程中, 锻件与空气、锻件与模具之间的换热系数对热锻成形过程具有显著的影响。为了精确地测定不同条件下的锻件与空气、锻件与模具之间的换热系数, 基于工艺实验并结合 Deform-3D 有限元分析方法, 通过热传导反问题法, 测定了 TC18 钛合金在不同条件下对应的换热系数。结果表明: 在加热过程中, TC18 钛合金与空气的换热系数在  $0.10 \sim 0.30 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  的范围内变化; 在冷却过程中, 试样与空气的换热系数在  $0.02 \sim 0.10 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  范围内变化; 试样与模具之间的换热系数受接触面的条件影响较大, 无介质、玻璃润滑剂的界面的峰值换热系数较大, 约为  $4.5 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ , 而在保温棉、玻璃纤维布、新型复合布界面接触条件下的换热系数较小, 约在  $0.4 \sim 0.5 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  附近。

**关键词:** TC18 钛合金; 热锻成形; 换热系数; 接触面; 润滑

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.004

中图分类号: TG146.23

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 04-0024-08

## Research on heat transfer coefficient in hot forging of TC18 titanium alloy

Zhang Haicheng<sup>1,2</sup>, Chang Chunyan<sup>3</sup>, Zhou Jie<sup>2</sup>

(1. China Erzhong Group Deyang Wanhang Die Forging Co., Ltd., Deyang 618000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400000, China;

3. Basic Teaching Department, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, China)

**Abstract:** In the hot forging process of TC18 titanium alloy, the heat transfer coefficients between forgings and air, forgings and mold have significant impact on the hot forging process. Therefore, in order to accurately measure the heat transfer coefficients between forgings and air, forgings and mold under different process conditions, the corresponding heat transfer coefficients of TC18 titanium alloy under different conditions were studied by the heat conduction inverse problem method based on process experiments combined with Deform-3D finite element analysis. The results show that during the heating process, the heat transfer coefficient between TC18 titanium alloy and air changes in the range of  $0.1 \sim 0.3 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ , and during the cooling process, the heat transfer coefficient between sample and air changes in the range of  $0.02 \sim 0.10 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ . However, the heat transfer coefficient between sample and mold is greatly affected by the conditions of contact surface. The peak heat transfer coefficient of interface without medium and glass lubricant is relatively large, about  $4.5 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ , while the heat transfer coefficients of interface with insulating cotton, glass fiber cloth and new composite cloth are small, around  $0.4 \sim 0.5 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ .

**Key words:** TC18 titanium alloy; hot forging; heat transfer coefficient; contact surface; lubrication

钛合金是重要的航空轻质高强结构材料, 因具有高比强、耐蚀、耐热等优良性能, 能够大幅减轻航空结构重量, 从 20 世纪 50 年代开始逐步出现在飞机构件上, 且在民用飞机上的用量也在不断扩大, 钛合金用量占飞机结构质量的百分比已成为衡量飞

机用材料先进程度的重要标志之一<sup>[1-2]</sup>。TC18 钛合金 (Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe) 是一种高合金化、高强度近  $\beta$  型钛合金, 该合金在退火态具有较高的强度和韧性水平, 其典型应用性能指标为抗拉强度在  $1080 \sim 1280 \text{ MPa}$  范围内, 断裂韧性  $\geq 55 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 具有优异的材料淬透性, 最大淬透厚度可达  $250 \text{ mm}$ , 因此, 适合大型锻件和大型整体锻件的制造, 现已大量应用于军用及民用飞机上<sup>[3-4]</sup>。

在热锻成形过程中, 锻件与模具的温度场、应力-应变场等工艺参数分布状况, 均会受到锻件表

收稿日期: 2022-11-18; 修订日期: 2023-02-28

基金项目: 四川省重点研发计划资助项目 (2022YFG0102)

作者简介: 张海成 (1988-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: zhanghaicheng@wh.sinomach-ez.cn

面与空气的换热系数、锻件与模具之间的换热系数的影响<sup>[5-7]</sup>。近些年来,众多学者对金属材料传热开展了大量的研究工作,在理论研究、实验研究和测试精度上均有了较大进步。孙静娜等<sup>[8]</sup>利用 TC4 钛合金板坯开展了轧制工况下的换热系数实验研究,通过多次优化、修正,获得了较为精确的板坯与空气间、板坯与轧辊间的换热系数。朱智等<sup>[9]</sup>通过自制的实验装置,研究了温度、载荷等参数对 TC11 钛合金与 5CrNiMo 模具钢换热系数的影响,研究发现,随着界面载荷的增加,实验材料与模具之间的接触换热系数不断增大。赵青卿<sup>[10]</sup>开展了 300M 钢热锻成形过程的材料换热系数和摩擦因数的实验研究,获得了 300M 钢表面与空气的换热系数-温度的关系曲线,综合分析了界面接触载荷和界面高温氧化的耦合作用对界面接触换热系数的影响,并将研究结果成功地用于指导 300M 钢大型复杂起落架模锻件的生产中。但是,目前针对 TC18 钛合金热模锻成形工况的换热系数研究较少。

目前,数值模拟在热锻成形过程中发挥了重要的作用,有别于传统依赖试错法,借助数值模拟方法开展工艺方案制定和工艺迭代优化,可大幅度提高工艺优化进度和降低产研发试制成本。数值模拟的精度对工艺方案的准确性以及工艺窗口的确定具有重要的指导作用,数值模拟精度的主要影响因素包括材料模型、边界条件模型(传热、摩擦)等<sup>[11]</sup>,模型不准确会导致模拟结果不准确,不能有效地指导实际生产。由于大型复杂 TC18 钛合金锻件的锻造成形难度大、工艺窗口窄,在锻件生产中会采取各种保温措施(如喷涂玻璃润滑剂、采取软包套等润滑保温措施)。因此,精确地测定 TC18 钛合金锻件在不同工况条件下锻件表面与空气的换热系数、锻件与模具间的换热系数,能够有助于构建高精度热锻成形工况的有限元数值模拟边界模型,获得合理的热锻成形工艺参数窗口,对于指导锻件生产具有重要意义。

本文基于工艺实验并结合 Deform-3D 有限元分析方法,研究不同条件下 TC18 钛合金与空气的换热系数、与 55NiCrMoV7 模具钢之间的换热系数,从而为 TC18 钛合金热锻成形有限元模拟过程中边界条件模型参数的设定提供参考依据。

## 1 材料与空气表面换热系数的测定

### 1.1 实验方案

金属在高温状态下会与周围环境发生辐射放热和对流换热。本实验研究了大型 TC18 钛合金锻件常用

的 4 种条件,分别为:(1)条件 1-1 试样表面不采取任何保护措施;(2)条件 1-2 试样表面均匀喷涂玻璃润滑剂;(3)条件 1-3 试样表面包裹一层保温棉;(4)条件 1-4 试样表面均匀喷涂玻璃润滑剂后再包裹一层保温棉。通过测量 TC18 钛合金试样随炉加热过程和在空气中的冷却过程中试样中心点的温度变化,再利用 Deform-3D 中的反传热模块并运用热传导反问题法进行求解,得到 TC18 钛合金材料的表面换热系数与温度之间的关系。

用于测定表面换热系数的圆柱形试样如图 1 所示,尺寸为  $\Phi 60 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ,材质为 TC18 钛合金,试样中心存在尺寸为  $\Phi 3 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  的盲孔,用于连接测温热电偶。实验过程为:首先将箱式电阻炉加热至  $895 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,随后将样品放入加热炉,利用热电偶测定试样中心点温度随时间的变化,并进行记录。

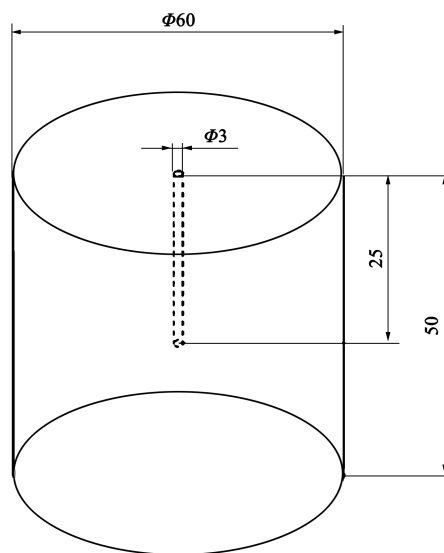


图 1 表面换热系数实验用试样的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen for surface heat transfer coefficient experiment

基于实测的温度变化数据,可利用 Deform-3D 有限元分析软件中的 Inverse Heat Transfer 反传热模块求解试样的表面换热系数<sup>[12]</sup>。模拟利用 Deform-3D 反传热模块、通过线性插值求解获得以温度为变量的换热系数。在试样随炉升温阶段,导入实测的炉内升温曲线(图 2a),试样初始温度设定为  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随后在软件中输入测温点位置,将实测温度数据导入反传热模型中。温度控制点选取范围为  $20 \sim 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,间隔  $50 \sim 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  进行选取。该过程的表面换热系数边界值定义为  $0.00001 \sim 0.5 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ ,表面换热系数预测值设定为  $0.02 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ 。由于加热过程中试样温度变化剧烈,为了提高计算



图 2 表面换热系数测定的实验照片

(a) 装样入炉 (b) 炉外空冷

Fig. 2 Experimental photos of surface heat transfer coefficient measurement

(a) Load sample into furnace (b) Air cooling outside furnace

效率, 求解模型采用较大的时间步长 (0.001 ~ 10 s), 允许的最大温度变化为 1 °C。

## 1.2 结果分析

将反算优化后的求解结果 (表面换热系数-温度变化曲线) 导入数值模型中进行正向求解计算, 同时, 输出试样中心点的模拟温度曲线与实测温度

曲线进行对比, 结果如图 3a 所示。由图 3a 可以看出, 反算优化后的表面换热系数模拟结果与实测数据匹配良好, 证明了本方法的准确性。最终获得的 TC18 钛合金随炉升温阶段的表面换热系数如图 3b 所示, 在  $0.10 \sim 0.30 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  范围内变化。

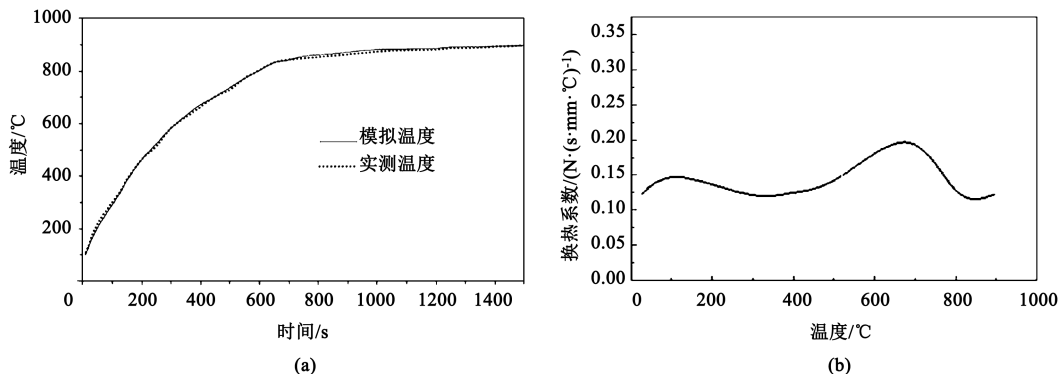


图 3 试样在炉中加热的升温曲线 (a) 及相应的表面换热系数曲线 (b)

Fig. 3 Temperature rise curves of sample heated in furnace (a) and corresponding surface heat transfer coefficient curve (b)

试样空冷阶段的初始温度设为 895 °C, 环境温度设为 20 °C。将实测的空冷降温曲线及测温点位置输入到反传热模型中。每隔 50 ~ 100 °C 定义确定模拟点, 并将空冷过程中的表面换热系数边界值设为  $0.00001 \sim 1 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ , 表面换热系数预测值设为  $0.02 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。为了提高计算效率, 模型求解采用变时间步长 0.001 ~ 10 s, 每个时间步长的最大温度变化量为 1 °C。最终模拟结果如图 4 所示, 其空冷表面换热系数比升温时的低, 在  $0.02 \sim 0.10 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  范围内变化。

再以同样的方法对不同条件下的 TC18 钛合金在 20 ~ 895 °C 之间的表面换热系数进行测定, 最终得到

的结果如表 1 和表 2 所示, 其曲线图如图 5 所示。由图 5 可知, 无论是随炉升温还是空冷降温, 在加入保温棉后其表面换热系数均小于其他保温条件下的表面换热系数, 故保温棉的保温效果最好, 而均匀涂敷玻璃润滑剂的保温效果次之, 但相较于无保护介质下具有一定的保温效果。

## 2 材料与模具界面接触换热系数的测定

### 2.1 实验方案

在模拟热锻过程温度场时, 传热学模型的准确性受工件与模具之间的界面接触换热系数的影响,

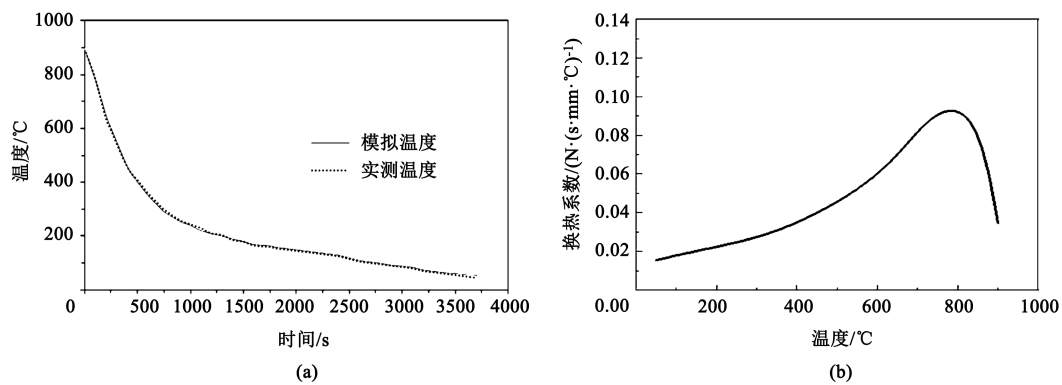


图 4 试样空降温曲线 (a) 及相应的表面换热系数曲线 (b)

Fig. 4 Temperature drop curves of sample cooled in air (a) and corresponding surface heat transfer coefficient curve (b)

表 1 不同条件下随炉升温过程中的表面换热系数 ( $\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ )				
Table 1 Surface heat transfer coefficients under different conditions during heating process in furnace ( $\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ )				
温度/ $^\circ\text{C}$	条件 1-1	条件 1-2	条件 1-3	条件 1-4
27	0.12347	0.12360	0.01384	0.01336
100	0.16116	0.30578	0.01765	0.01623
300	0.11323	0.07891	0.01753	0.01946
400	0.12630	0.10254	0.01847	0.01892
500	0.13170	0.09052	0.02988	0.01957
700	0.23534	0.08483	0.01828	0.01607
800	0.10390	0.11280	0.01922	0.01664
895	0.12254	0.18910	0.04373	0.00973

表 2 不同条件下空冷过程中的表面换热系数 ( $\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ )				
Table 2 Surface heat transfer coefficients under different conditions during cooling process in air ( $\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ )				
温度/ $^\circ\text{C}$	条件 1-1	条件 1-2	条件 1-3	条件 1-4
50	0.01540	0.01406	0.00445	0.00475
150	0.02026	0.01906	0.00517	0.00438
250	0.02435	0.02169	0.00552	0.00546
350	0.03022	0.02797	0.00638	0.00557
450	0.03959	0.03561	0.00667	0.00702
550	0.05139	0.04737	0.00893	0.00659
650	0.06840	0.05301	0.00681	0.00381
750	0.09581	0.09714	0.01425	0.01397
850	0.09184	0.12984	0.00712	0.00800
900	0.03453	0.04712	0.01642	0.01711

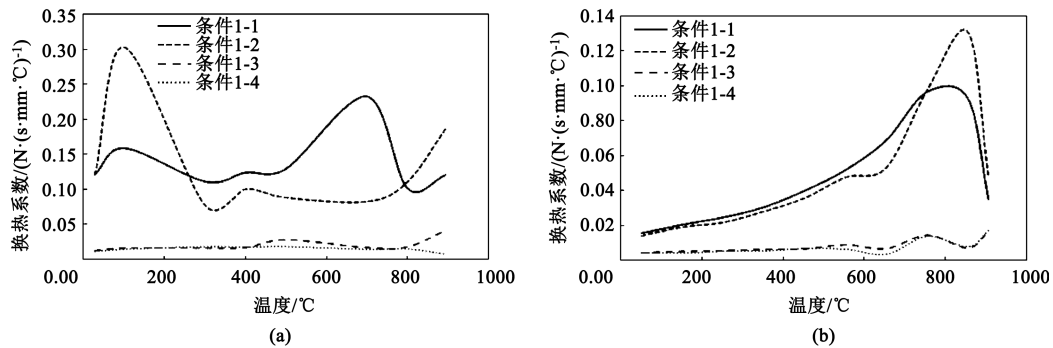


图 5 不同条件下试样升温 (a) 和降温 (b) 时的表面换热系数曲线

Fig. 5 Surface heat transfer coefficient curves of sample in temperature rise (a) and temperature drop (b) under different conditions

而传热学模型将直接关乎温度场计算的精度，而温度场的正确与否又关乎组织场、应力场以及应变场计算的精度。所以，锻件与模具材料之间的界面接触换热系数的选择非常关键，其误差将对整个热锻成形过程的模拟精度产生重要影响。有学者研究表明<sup>[13]</sup>，界面接触换热系数随着界面接触载荷的增加而增大，当界

面接触载荷达到临界载荷时，界面接触换热系数不会继续增加，基本不发生变化。因此，本实验选取了较大的界面接触载荷（100 MPa），在同等的界面接触载荷条件下，利用热传导反问题法求解界面接触换热系数，研究了大型 TC18 钛合金锻件在常用的 5 种热锻成形条件下与 55NiCrMoV7 模具钢之间的接触换热行为，



并求解界面接触换热系数。5 种热锻成形条件分别为：(1) 条件 2-1 试样表面不采取任何保护措施；(2) 条件 2-2 试样表面均匀喷涂玻璃润滑剂；(3) 条件 2-3 试样与模具之间加垫一层保温棉；(4) 条件 2-4 试样与模具之间加垫一层玻璃纤维布；(5) 条件 2-5 试样与模具之间加垫一层新型复合布棉)。实验装置简化示意图如图 6 所示。

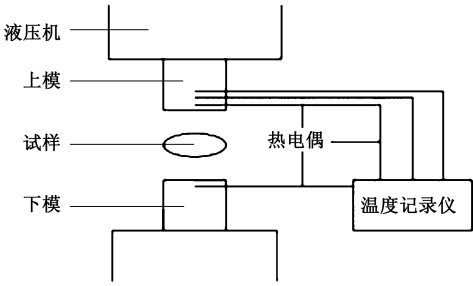


图 6 实验装置简化示意图

Fig. 6 Simplified schematic diagram of experimental device

测定试样与模具的界面接触换热系数，所用试样为  $\Phi 60\text{ mm}\times 30\text{ mm}$  的圆柱体（图 7），模具中均设置了测温孔（图 8）。在实验过程中，首先将加热炉温度升至  $895\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其次将试样放入炉中加热  $30\text{ min}$ ，之后用夹样钳（包裹石棉）快速夹出后放置在下模，最后，启动液压机按照预设载荷进行接触条件下的稳定换热。

通过 Deform-3D 有限元分析软件，模拟 TC18 钛合金试样与 55NiCrMoV7 模具钢之间的传热过程，获取不同界面接触换热系数下的温度变化，并将实

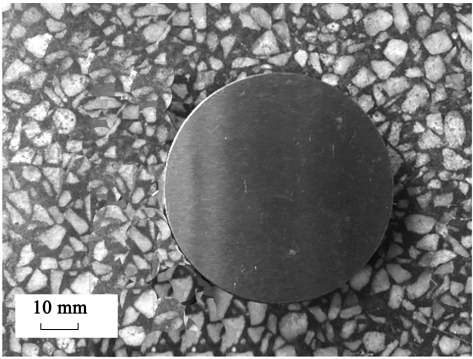


图 7 界面接触换热实验用试样实物图

Fig. 7 Sample physical picture for interface contact heat transfer experiment

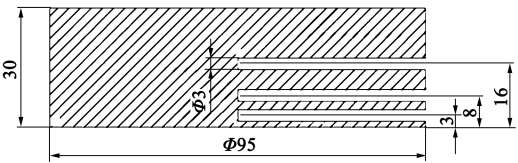


图 8 上、下模具测温孔示意图

Fig. 8 Schematic diagram of temperature test holes in upper and lower molds

测模具温度变化曲线与 Deform-3D 数值模拟相结合，最终确定不同接触条件下的界面接触换热系数。为了使模拟过程符合实际，整个传热数值模拟过程可分为 3 个阶段：(1) 空冷试样出炉到与下模接触前的过程；(2) 在下模静置，到与上模接触前的过程；(3) 与上、下模同时接触的过程。整体模拟过程如图 9 所示。

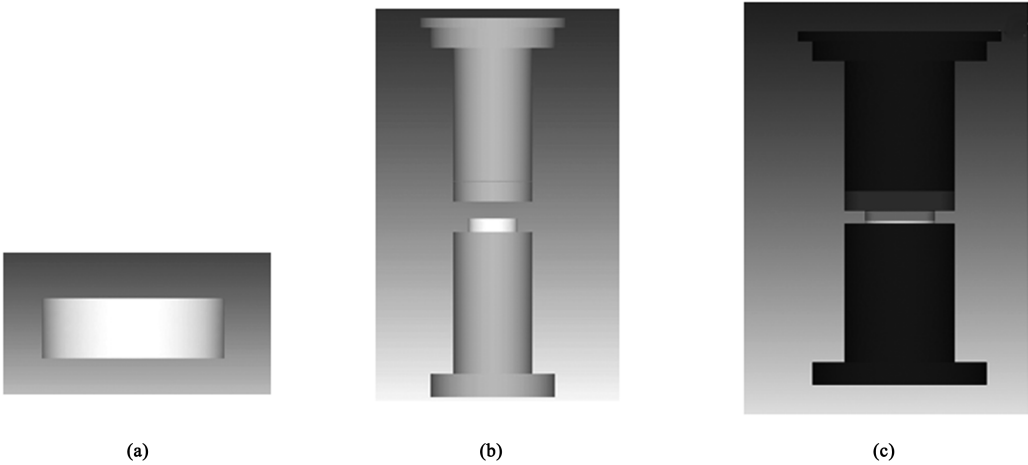


图 9 界面接触换热模拟过程

(a) 阶段 1 (b) 阶段 2 (c) 阶段 3

Fig. 9 Interface contact heat transfer simulation process

(a) Stage 1 (b) Stage 2 (c) Stage 3

将环境温度设置为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，模具初始温度设置为  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，试样初始温度设置为  $895\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。空气换热系

数按照空冷测定的表面换热系数进行设定。TC18 钛合金试样与模具间的界面接触换热系数设置为

$0.02 \sim 8 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ , 并在模型中选取与实际测温点相同位置处进行温度追踪, 获取模拟温度变化曲线。当模拟温度与实测温度在误差允许范围内相符时, 即获得 TC18 钛合金与模具钢之间的界面接触换热系数。

## 2.2 结果分析

在 TC18 钛合金试样与模具的界面接触换热模拟实验中, TC18 钛合金锻件在常用的 5 种热锻成形工况 (条件 2-1 试样表面不采取任何保护措施、条件 2-2 试样表面均匀喷涂玻璃润滑剂、条件 2-3 试样与模具之间加垫一层保温棉、条件 2-4 试样与模具之间加

垫一层玻璃纤维布、条件 2-5 试样与模具之间加垫一层新型复合布棉) 下的试样实测温度变化曲线与模拟温度变化曲线如图 10 所示, 图 10 中的 2 个实测温度值是由距离上模中心不同深度处的热电偶测得 (其中, P1 处热电偶对应深度为 8 mm, P2 处热电偶对应深度为 16 mm), 模拟温度曲线是利用 Deform-3D 软件模拟计算的结果, 模拟过程中假设上、下模与试样的换热系数相同。从实测温度曲线可知, 从常温上升至实际温度需要一定的响应时间。因此, 在对热电偶进行测温校准的同时, 还不应忽视热电偶的延迟响应等情况, 故等待采集到的温度数据接近稳定后方可使用。

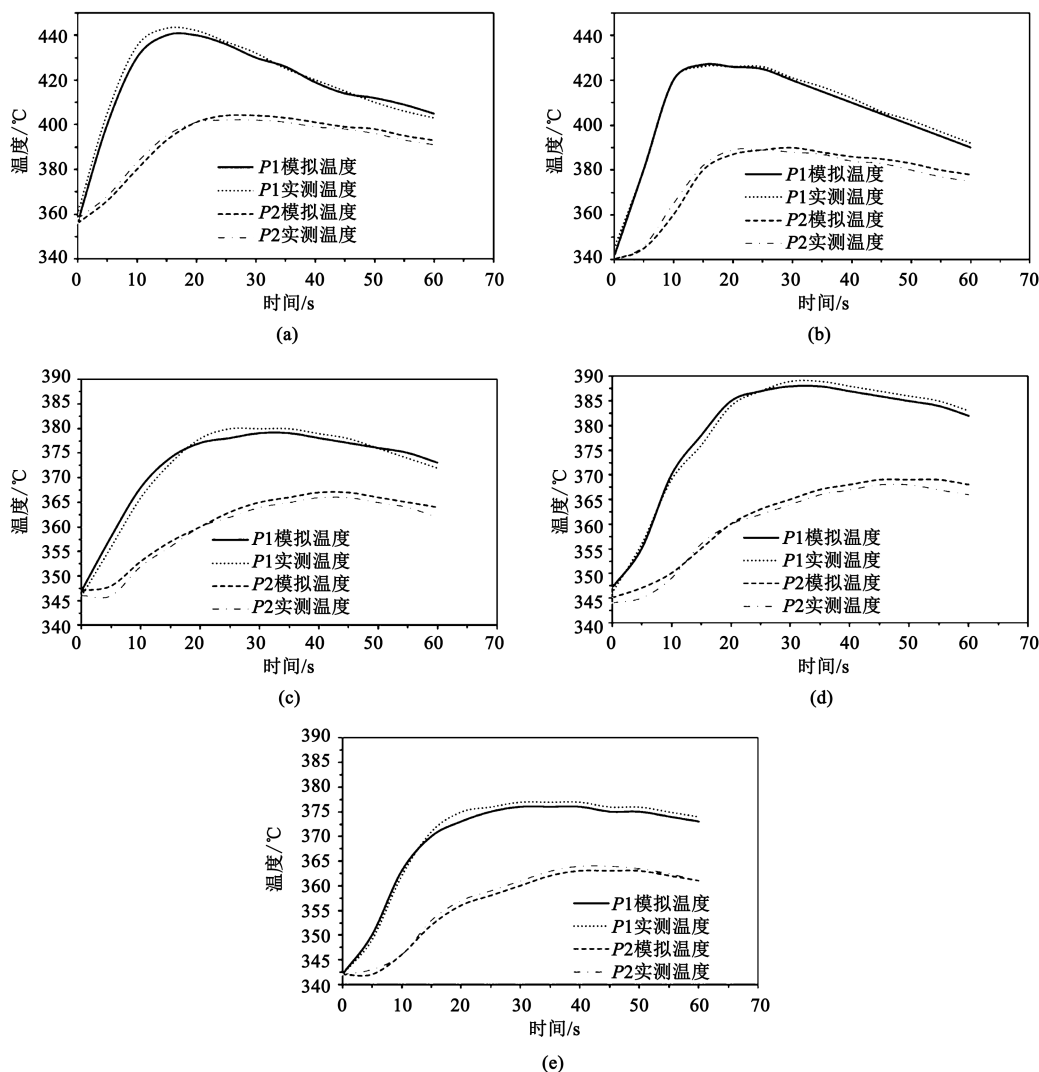


图 10 不同热锻成形条件下界面接触换热的实测温度与模拟温度

(a) 条件 2-1 (b) 条件 2-2 (c) 条件 2-3 (d) 条件 2-4 (e) 条件 2-5

Fig. 10 Measured and simulated temperatures of interface contact heat transfer under different hot forging conditions

(a) Condition 2-1 (b) Condition 2-2 (c) Condition 2-3 (d) Condition 2-4 (e) Condition 2-5

最后, 将不同热锻成形条件下的模具实测温度变化曲线和模拟曲线进行对比, 从而确定各条件下

的上模与试样之间的界面接触换热系数, 结果如表 3 所示, 其曲线图如图 11 所示。由图 11 可以看出, 不

表 3 不同热锻成形条件下的界面接触换热系数  
( $\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ )

Table 3 Interface contact heat transfer coefficients under different hot forging conditions ( $\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ )

时间/s	条件 2-1	条件 2-2	条件 2-3	条件 2-4	条件 2-5
0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.020
5	4.00	4.50	0.40	0.45	0.400
8	0.70	0.65	0.18	0.35	0.160
10	0.70	0.65	0.18	0.30	0.145
15	0.70	0.65	0.17	0.28	0.144
20	0.65	0.60	0.17	0.26	0.142
25	0.30	0.30	0.16	0.24	0.140
30	0.20	0.25	0.15	0.22	0.130
40	0.15	0.15	0.14	0.20	0.120
50	0.10	0.10	0.12	0.18	0.110
60	0.05	0.10	0.10	0.15	0.100

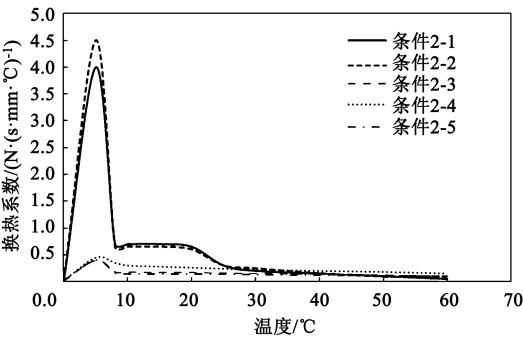


图 11 不同热锻成形条件下的界面接触换热系数的测定结果  
Fig. 11 Measured results of interface contact heat transfer coefficient under different hot forging conditions

同界面条件下的温度及接触换热系数的变化规律基本一致，即随着换热过程的进行，坯料与模具进行界面换热时，模具温度先快速上升，到达峰值后逐渐下降，对应的界面接触换热系数同样先增加后减少。在热前期（0~5 s），界面接触换热系数快速增加，到达峰值后快速减少，随后进入缓慢下降区域。

由表 3 和图 11 可知，对比 5 种热锻成形条件，条件 2-1 和 2-2 下的界面接触换热系数更大，即热交换更快，上模到达峰值温度更早且峰值温度更高，达到峰值的时间约为 5 s，峰值接触换热系数均为  $4.5 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。其余 3 种条件下的界面换热系数波动趋势相似，0~5 s 快速上升至峰值后逐渐下降，随后趋于平稳，无明显波动，其峰值界面接触换热系数约  $0.4 \sim 0.5 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ，换

热系数均较小，试样与上模之间的换热速度远小于干摩擦条件。

3 结 论

（1）在随炉升温过程中，TC18 钛合金的表面换热系数在  $0.10 \sim 0.30 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  的范围内变化。加热后的空冷过程中，由于试样表面发生氧化，TC18 钛合金在空气中的表面换热系数比升温时低，在  $0.02 \sim 0.10 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  范围内变化。在 400 °C 以后稳定在  $0.02 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  附近。

（2）不同热锻成形条件下的温度及换热系数变化规律基本一致：随着换热过程的进行，坯料与模具间进行界面换热，模具温度快速上升至峰值后逐渐下降，对应的界面接触换热系数同样呈现先增加后减少的趋势。5 种条件下，无介质、玻璃润滑剂的界面接触换热系数更大，即热交换更快，上模到达峰值温度更早且峰值温度更高，其余 3 种条件下（保温棉、玻璃纤维布、新型复合布）的界面接触换热系数波动趋势相似且大小相近。

（3）本文在研究界面接触换热系数时，未考虑材料在变形过程中变形热的叠加对换热系数的影响，但在热锻变形过程中，变形潜热对锻件内部的温度场和界面处的传热具有明显的影响，未来还需更深入开展相关研究。

参考文献：

[1] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展 [J]. 航空材料学报, 2014, 34 (4): 44-50.  
Zhu Z S. Research status and development of titanium alloy technology for aviation in China [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34 (4): 44-50.

[2] 宗影影, 王琪伟, 袁林, 等. 航空航天复杂构件的精密塑性体积成形技术 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (9): 1-15.  
Zong Y Y, Wang Q W, Yuan L, et al. Precision plastic volume forming technology for aerospace complex components [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (9): 1-15.

[3] 王鹏. TC18 钛合金锻件准  $\beta$  锻共性技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.  
Wang P. TC18 Titanium Alloy Forging Standard  $\beta$  Research on Forging Commonness Technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.

[4] 张爽爽. TC18 钛合金高温热变形行为的研究 [D]. 汉中: 陕西理工大学, 2022.  
Zhang S S. Study on Hot Deformation Behavior of TC18 Titanium Alloy at High Temperature [D]. Hanzhong: Shaanxi University of

- Science and Technology, 2022.
- [5] Caron E J F R, Daun K J, Wells M A. Experimental heat transfer coefficient measurements during hot forming die quenching of boron steel at high temperatures [J]. Int. J. Heat Mass. Transf., 2014, 71: 396-404.
- [6] Caron E, Daun K J, Wells M A. Experimental characterization of heat transfer coefficients during hot forming die quenching of boron steel [J]. Metall Mater Trans B-Process Metall Mater Process Sci., 2013, 44 (2): 332-343.
- [7] Chen S, Chen K, Peng G, et al. Effect of heat treatment on hot deformation behavior and microstructure evolution of 7085 aluminum alloy [J]. Mater. Des., 2012, 25: 93-98.
- [8] 孙静娜, 向文杰, 徐森. TC4 钛合金板轧制换热系数实验研究 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (3): 59-65.
- Sun J N, Xiang W J, Xu S. Experimental study on rolling heat transfer coefficient of TC4 titanium alloy plate [J]. Journal of Plastic Engineering, 2022, 29 (3): 59-65.
- [9] 朱智, 张立文, 顾森东. TC11 钛合金与 5CrMnMo 模具钢间接触换热实验研究 [J]. 大连理工大学学报, 2012, 52 (4): 509-513.
- Zhu Z, Zhang L W, Gu S D. Experimental study on contact heat transfer between TC11 titanium alloy and 5CrMnMo die steel [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52 (4): 509-513.
- [10] 赵青卿. 300M 钢的热锻成形边界条件及其影响因素研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- Zhao Q Q. Study on the Boundary Conditions of Hot Forging of 300M Steel and Its Influencing Factors [D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [11] Burte P R, Im Y T, Altan T. Measurement and analysis of heat transfer and friction during hot forging [J]. Journal of Engineering for Industry, 1990, 112 (4): 332-339.
- [12] 李亨, 田开国, 李健. 9NiCrMoV 钢淬火过程换热系数仿真分析与试验 [J]. 材料热处理学报, 2022, 43 (4): 156-161, 169.
- Li H, Tian K G, Li J. Simulation analysis and test of heat transfer coefficient of 9NiCrMoV steel during quenching process [J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2022, 43 (4): 156-161, 169.
- [13] Semiati S L, Collings E W, Wood V E, et al. Determination of the interface heat transfer coefficient for non-isothermal bulk-forming processes [J]. Journal of Engineering for Industry, 1987, 109 (1): 49-57.

## 欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发行, 全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

**主要栏目:** 综述、锻造、板料成形、管材成形、特种成形、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

**读者对象:** 大专院校的师生, 金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 256 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本(每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本(每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本(上册)(包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本(下册)(包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

**邮局汇款信息:**

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

邮编: 100083

收款人: 《锻压技术》编辑部

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-804

E-mail: fst\_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部