

TC4合金叶片热模锻过程的数值模拟

蔡 军¹ 李付国¹ 任东升^{1,2} 王家臣²

(1 西北工业大学材料学院,西安 710072)

(2 红原航空锻铸工业公司,红原 713801)

文 摘 为了生产出质量合格的叶片,针对 TC4合金叶片的成形特点,为其制订了相应的热模锻成形工艺。同时采用基于有限体积的材料成形模拟技术,对 TC4合金叶片热模锻过程进行了模拟,分析了坯料成形过程中的充填情况、应变场、应力场及终锻温度场的分布规律。模拟结果表明:锻件轮廓清晰,模具型腔充填完整,未出现充不满或折叠等锻造缺陷。实际生产出来的叶片经理化检测和外观检查,质量符合要求,制定的工艺方案合理,可以满足 TC4合金航空风扇转子叶片的成形质量要求。

关键词 TC4合金,叶片,热模锻,数值模拟

Numerical Simulation of Hot Forging Process for TC4 Blade

Cai Jun¹ Li Fuguo¹ Ren Dongsheng^{1,2} Wang Jiachen²

(1 School of Materials Science and Engineering, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072)

(2 Hong Yuan Aviation Forging & Casting Industry Company, Hongyuan 713801)

Abstract In order to produce qualified blade, hot forging forming technology was developed according to the forming features of TC4 blade. At the same time, numerical simulation of airfoil blade during hot forging was carried out to analyze the filling of die and the distributions of strain, stress and temperature. The simulation results showed that the die cavity's filling was good without any forging defect. The quality of TC4 blade can meet the requirement after physical testing, chemical analysis and visual examination. So, hot forging forming technology can meet the production requirement of TC4 airfoil blade.

Key words TC4 titanium alloy, Airfoil blade, Hot die forging, Numerical simulation

0 引言

叶片是航空发动机中的一种重要零部件,它在航空发动机中起着能量转换的关键作用^[1]。由于叶片形状复杂,质量要求高,材料多为昂贵的难变形材料,如钛合金、镍基高温合金等。长期以来,叶片的锻造工艺和模具设计缺乏系统的、精确的理论分析手段,实际生产中主要依赖操作者长期积累的经验,并进行反复试验及修改,因而造成大量人力和物力的浪费,不仅延长了生产周期,而且难以保证叶片的成形质量。

随着计算机技术及数值计算方法的发展,数值模拟技术已成为解决金属塑性成形问题的有力工具。借助于数值模拟技术,在计算机上虚拟实现叶片的锻造成形过程,可以通过图形、数据等方法直观地得到诸如温度、应变和应力分布、载荷及材料流动情况等

各种信息,深化对叶片锻造成形规律的认识,进而实现工艺参数的优化,避免各类缺陷的产生,达到优质、高效、低耗地制造锻件的目的^[2~5]。本文采用 MSC Superforge有限体积模拟软件,对航空风扇转子叶片的热模锻过程进行了三维热力耦合模拟。

1 TC4合金叶片成形工艺及模拟模型

1.1 成形设备

叶片锻造常用的设备有热模锻压力机、螺旋压力机及打击锤等^[6]。根据叶片的外形尺寸、投影面积、材料的变形抗力及工厂设备现状,选择 80 MN 电动螺旋压力机。根据实际生产经验,螺旋压力机打击吨位按下式确定:

$$p = K \cdot \frac{S}{q} \quad (1)$$

式中: p 为螺旋压力机公称压力; K 为系数,热锻约为

收稿日期:2008-07-09;修回日期:2008-09-17

作者简介:蔡军,1977年出生,博士研究生,主要研究方向为材料成形模拟与控制一体化技术。E-mail:caijun0116@163.com

80 kN/cm²; S 为锻件的变形面积; q 为变形系数, 取 1.1。

由式 (1) 计算得到螺旋压力机的公称压力为 100 MN。为了防止叶片在模锻过程中产生锻造缺陷, 并降低设备负荷, 采用多火次的锤击方法, 所以螺旋压力机的公称压力可选计算值的 1/2。

1.2 成形工艺

从 TC4 合金的变形抗力、允许变形程度随温度变化的规律, 以及从减少能量消耗和充分利用合金塑性的角度出发, 始锻温度愈高愈好。但如果始锻温度超过合金的转变温度过多, 晶粒剧烈长大, 锻后将形成魏氏组织。在力学性能上的反映是锻件的室温塑性很低, 达不到技术条件要求。因此, 为使锻件具有良好的综合性能, 一般应选择在转变点温度以下进行锻造。作为一般规律, 始锻温度应为 T 以下 14~28^[7]。因此确定坯料的始锻温度为 920, 模具预热温度为 300, 环境温度为 25, 终锻温度大于 800。模拟采用开式模锻, 坯料与模具的摩擦系数选为 0.3。

材料本构关系模型是数值模拟的关键, 它会对模拟模型的准确性和模拟精度产生直接影响。TC4 合金属于应变速率敏感性材料, 根据 MSC SuperForge 软件内置的本构关系类型, 选用 Hot Forging Material Form 2 作为材料的本构关系模型, 即

$$\bar{\sigma} = \max(S, C \dot{\epsilon}^{-M}) \quad (2)$$

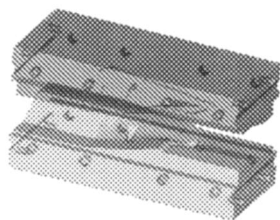
式中, $\bar{\sigma}$ 为流动应力, S 为最小屈服应力, C 为应变速率常量, $\dot{\epsilon}$ 为等效应变速率, M 为应变速率敏感性指数。

1.3 成形模具及坯料

采用 PRO/E 进行实体建模, 然后再导入 MSC Superforge 软件中, 图 1 为模拟采用的预制坯图及模具图。



(a) 预制坯



(b) 模具

图 1 坯料及模具图

Fig 1 Prefom and dies

2 模拟结果及分析

通过初步分析后制定的工艺方案为:

第一火次, 第一锤采用 1% 打击能量, 将坯料压出扭角, 第二锤在坯料被压出扭角后选用 30% 的打击能量进行成形;

第二火次, 在第一火次的基础上, 采用 60% 的能量打击两次。

其中, 打击第一锤的目的是基于小能量打击使坯料准确定位并产生合适的扭角, 保证坯料成形过程中不会出现偏移情况, 从而避免出现局部填充不满的情况。

由于模具预热温度与坯料初始温度相差较大, 当坯料与模具接触后, 坯料温度下降很快, 随着变形过程的进行, 坯料的接触表面积增加, 尤其是与模具的接触面积增加, 使得坯料与模具的传热速度加快。钛合金温度降低时其变形抗力急剧增加, 塑性下降, 若锤击力过大, 容易导致锻件开裂, 因此, 终锻温度不宜过低。因此, 在第一火次打击结束后, 将热料回炉加热至 920 后再进行第二火次成形。终锻件如图 2 所示, 为了研究叶片在热模锻过程中的变形情况, 分别在阻尼台、叶身中间及榫头部位选取 3 个典型截面进行分析。

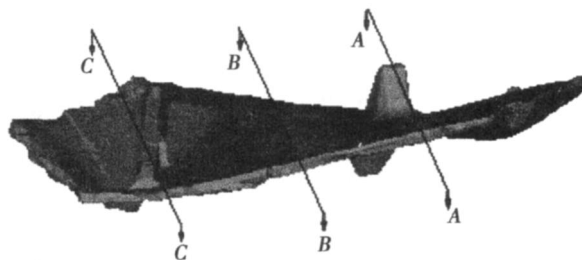


图 2 终锻件图

Fig 2 Final forging

2.1 坯料充填情况

图 3 为 A-A 截面热模锻过程中坯料与模具的接触图。可以看出, 在第一次采用小能量打击后, 阻尼台稍微变形, 出现了一定的扭角, 已实现定位及防止坯料偏移的目的; 在第二次打击完成后, 阻尼台已完全填满, 并开始向两侧流动; 当第三次打击完成后, 坯料开始出现毛边; 第四次打击使得坯料高度继续降低, 型面更加清晰。



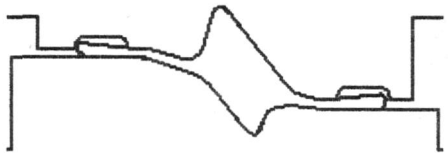
(a) 第一次打击



(b) 第二次打击



(c) 第三次打击

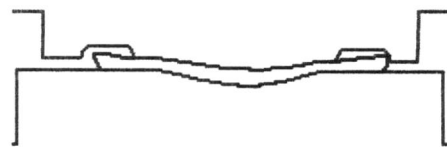


(d) 第四次打击

图 3 A - A 截面坯料与模具接触情况

Fig 3 Contact of billet and die on section A - A

图 4 为 B - B 截面热模锻中坯料与模具的接触图。可以看出,在第一次打击过程中,叶身部位没有接触到模具;而第二次打击完成后,坯料已基本完成型腔的充填;第三次打击完成后,坯料已完全充填型腔,并开始出现毛边;当第四次打击完成后,叶身厚度继续降低,更多的金属流入毛边槽,并形成清晰的轮廓。

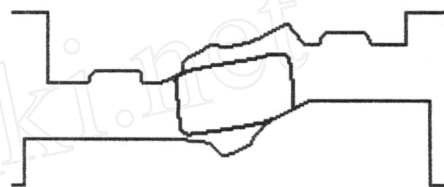


(d) 第四次打击

图 4 B - B 截面坯料与模具接触情况

Fig 4 Contact of billet and die on section B - B

图 5 为 C - C 截面热模锻过程中坯料与模具接触图。可以看到,在第一次打击完成后,C - C 截面略微变形,同样起到了对坯料的定位作用;在第二次打击完成后,坯料已基本充填叶片榫头部位型腔;第三次打击完成后,坯料已完全充填型腔,并开始出现毛边;当第四次锤击后,变形量已经很小,金属继续流入毛边槽。



(a) 第一次打击



(b) 第二次打击



(c) 第三次打击



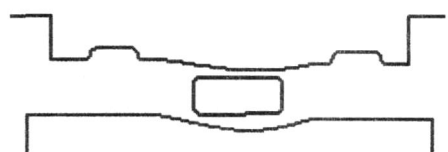
(d) 第四次打击

图 5 C - C 截面坯料与模具接触情况

Fig 5 Contact of billet and die on section C - C

通过分析坯料的充填情况可以发现,三个典型截面的充填效果均十分理想,锻件轮廓清晰,模具型腔充填完整,未出现充不满和折叠等锻造缺陷,制定的工艺方案可以满足叶片的成形质量要求。

2.2 坯料应变情况



(a) 第一次打击



(b) 第二次打击



(c) 第三次打击

图 6 为 A - A 截面的等效应变分布云图。可以看出,第一次打击完成后,变形主要出现在与下模接触的的边缘部位,最大值为 0.569,其他部位应变均较小。对比四次打击情况可以看到,最大应变出现在靠近边缘部位。第 3 次打击结束后由于阻尼台上下部分已经完全填充,因此在第四次打击结束后,阻尼台上下部分的应变对比第三次打击没有明显变化。

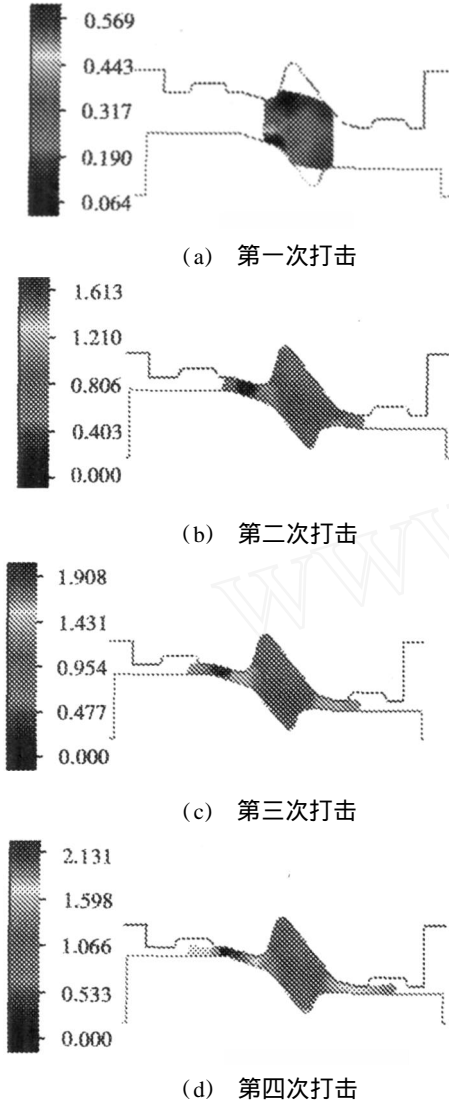


图 6 A - A 截面坯料等效应变分布

Fig 6 Distribution of effective strain of billet on section A - A

图 7 为 B - B 截面的等效应变分布云图。可以看到,在第一次打击完成后,叶身部位有微小的应变存在。第二次打击后,叶身部位的应变随之增加,坯料向模具型腔两侧流动。由于摩擦的影响,靠近毛边槽区域部位的等效应变值要比其他区域的大,等效应变分布极不均匀,且随着打击次数的增加,其应变差值也随之变大,坯料变形的不均匀程度也越来越严重。根据文献 [5 ~ 6] 所述,采用圆棒坯料成形的叶片,其叶身部位有明显的墩粗过程,应变主要集中在心部,而两侧的应变则较小。而采用本文预制坯所成形的锻件,其叶身部位最大应变值出现在模具型腔的

边缘,这主要是由于坯料在第一次打击后,叶身部位已存在变形所造成的。

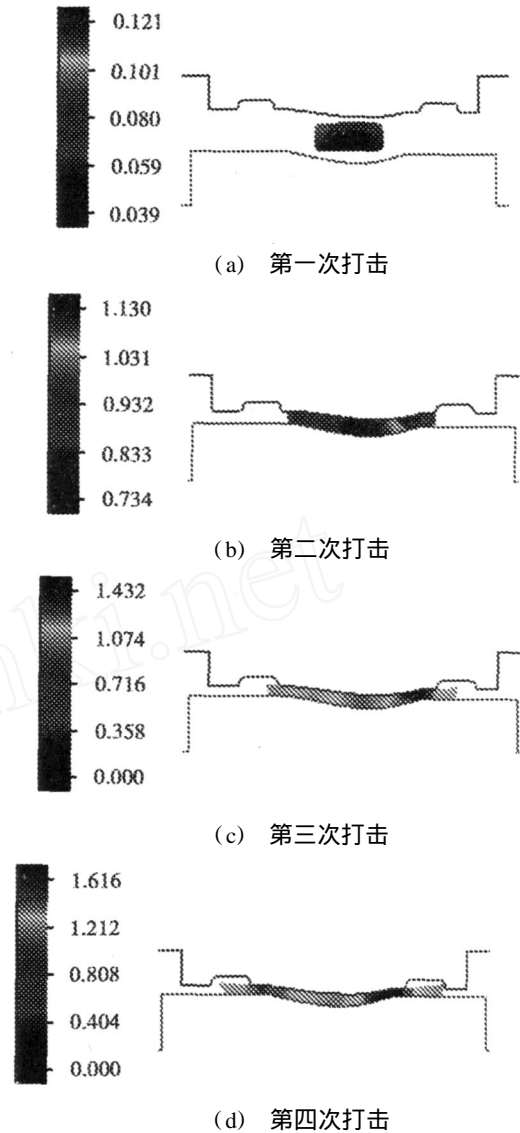
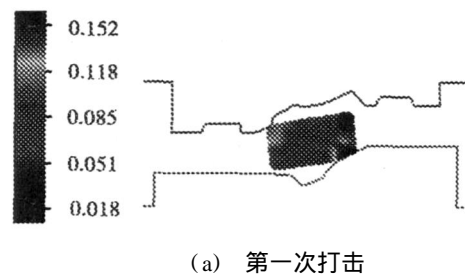


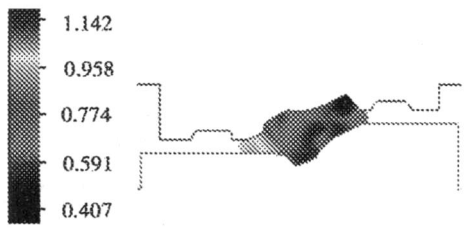
图 7 B - B 截面坯料等效应变分布

Fig 7 Distribution of effective strain of billet on section B - B

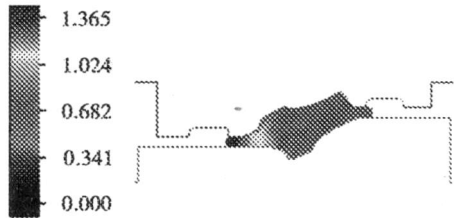
图 8 为 C - C 截面的等效应变分布云图。可以看出,在第一次打击后,C - C 截面有微小的应变存在,和阻尼台部位相比,此处的应变要小很多,与叶身部分的应变相当,说明第一次打击主要使阻尼台部位发生变化。随着打击次数的增加,叶身部位的应变也随之增加,最大应变出现在靠近模具型腔的边缘部位。



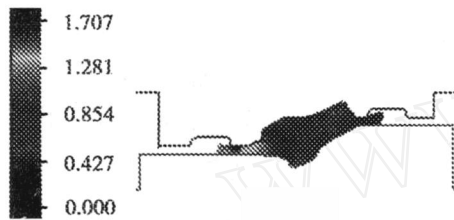
(a) 第一次打击



(b) 第二次打击



(c) 第三次打击



(d) 第四次打击

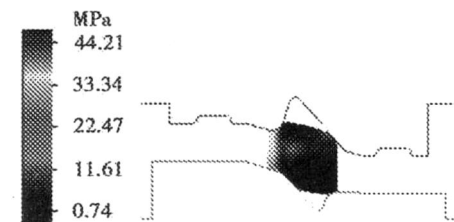
图 8 C - C截面坯料等效应变分布

Fig 8 Distribution of effective strain of billet on section C - C

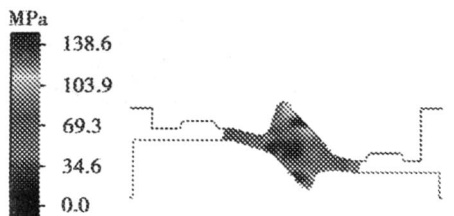
通过对三个典型截面应变分布的分析可以发现,由于叶片形状复杂,在成形过程中应变分布十分不均匀,其中阻尼台边缘部位的应变最大,叶身其次,头部应变则最小。

2.3 坯料应力情况

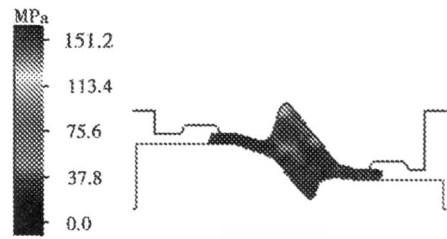
图 9 为 A - A 截面的坯料等效应力分布云图。



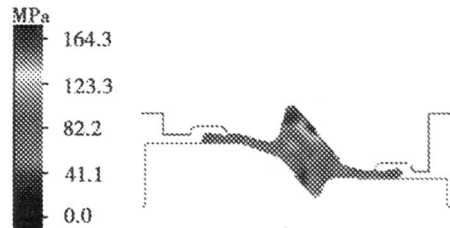
(a) 第一次打击



(b) 第二次打击



(c) 第三次打击



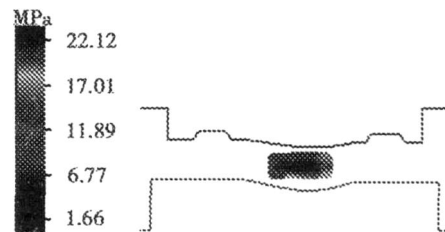
(d) 第四次打击

图 9 A - A截面坯料等效应力分布

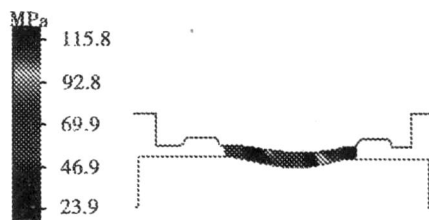
Fig 9 Distribution of effective stress of billet on section A - A

从图 9 可以看出,在第一次打击时,坯料等效应力不大,最大应力值仅为 44.21 MPa,主要集中在与模具接触的局部区域,各部位的应力非常小,随着打击次数的增加,坯料内应力也逐步增大,最大应力集中在阻尼台的上下边缘部位。

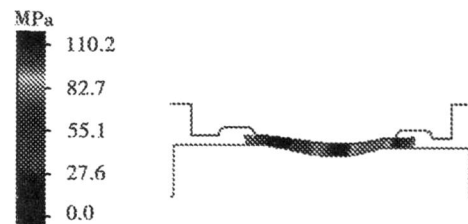
图 10 为 B - B 截面坯料等效应力分布云图。



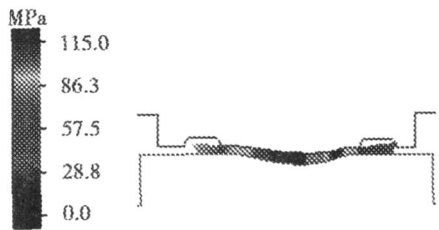
(a) 第一次打击



(b) 第二次打击



(c) 第三次打击



(d) 第四次打击

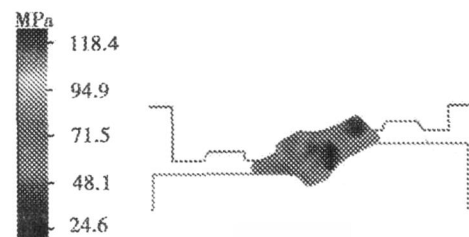
图 10 B - B 截面坯料等效应力分布图

Fig 10 Distribution of effective stress of billet on section B - B

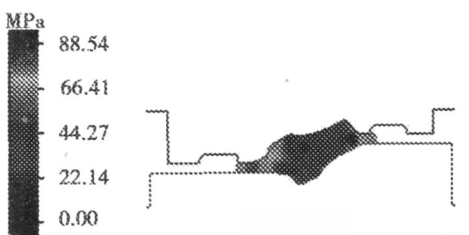
从图 10 可以看出,在第一次打击时,由于叶身与模具还没有接触,因此应力很小,最大等效应力值仅为 22.12 MPa,主要来自于其他部位坯料的扭转所带来的应力。随着打击次数的增加,叶身部位的应力也逐步增大,当第三次打击时 B - B 截面的应力达到最大,但要小于 A - A 截面的应力。当第四次打击时,应力最大值集中于叶身的中间部位,且向两侧逐步减小。图 11 为 C - C 截面坯料的等效应力分布云图。



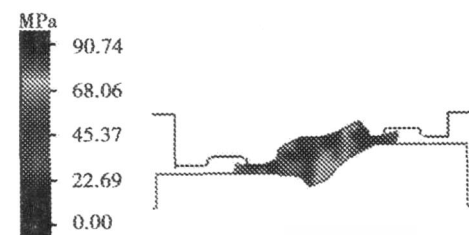
(a) 第一次打击



(b) 第二次打击



(c) 第三次打击



(d) 第四次打击

图 11 C - C 截面坯料等效应力分布

Fig 11 Distribution of effective stress of billet on section C - C

从图 11 可以看出,在第一次打击时,应力很小,最大应力仅为 8.391 MPa,比叶身及阻尼台部位的应力都要小。随着打击次数的增加,叶身部位的应力也呈现增大的趋势。第二次打击时,等效应力峰值较高,但从坯料应力分布云图上看,只有个别点的应力较大,而截面整体应力仍然较小。当第四次打击时 C - C 截面的整体应力分布最大,但要小于 A - A 截面及 B - B 截面的峰值应力。

对叶片三个截面的等效应力分析可以看到,在变形过程中,等效应力峰值几乎都出现在与模具接触的区域。这是由于坯料和模具接触时,坯料的温度急剧降低,TC4 合金材料塑性降低,从而导致其变形抗力增加。

2.4 坯料终锻温度场分布

图 12 为终锻温度分布情况。可以看到,坯料最高温度为 924.6,最低温度为 859.9,温差为 64.7,温度控制很理想。坯料部分位置温度较始端温度有所上升,这是由于塑性变形产生的热量,以及因摩擦产生的热量瞬间完全抵消由于模具激冷所造成的温降,使坯料的温度不降反升,温度较低的区域主要出现在阻尼台和榫头的肋部。

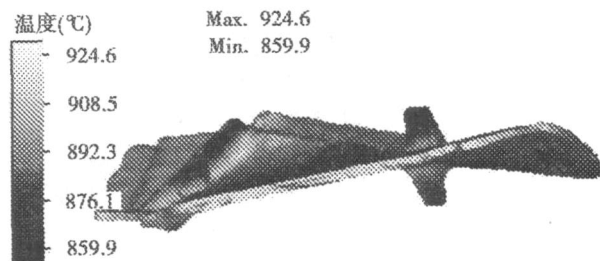


图 12 终锻温度分布

Fig 12 Temperature distribution at end of finish forging

3 实际生产验证

从模拟情况看,制定的工艺合理。工厂采用此工艺进行了实际生产,生产出来的叶片经高倍组织、低倍组织、冲击性能、高温持久性能、室温拉伸性能、高温拉伸性能等理化检测和外观检查,叶片质量符合要求,图 13 为实际生产的叶片照片。

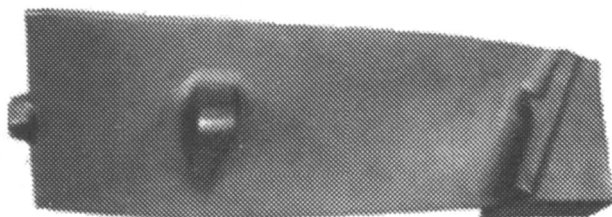
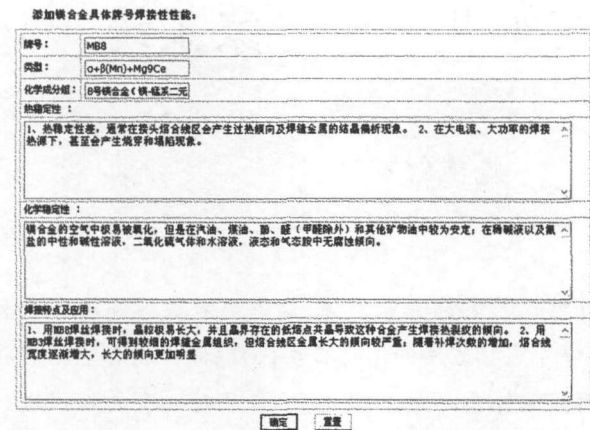


图 13 实际生产的叶片

Fig 13 Photo of TC4 alloy blade

(下转第 25 页)



(b) 添加具体牌号的焊接性

图 9 添加 MB8 合金的信息

Fig 9 Adding of information of MB8 alloy

图 9(a)是添加 MB8 各种试验结果,图 9(b)是添加 MB8 的焊接性能。点击确定后显示添加完成,数据库就有了 MB8 的信息以供查询和编辑。添加完成后返回到编辑界面,上传 MB8 的相图、CCT 图等。现有的数据库中关于 CCT 的信息还不多,管理用户对数据库进行维护,上传有关信息。

4 系统特点

相对分类和牌号众多的钢材来说,镁合金的牌号较少,对收集信息增加了难度,这样将导致收集可能不全面,不利于数据库的完善;由于牌号少,对已经收集的信息易于综合,为数据库中表格的建立降低一定

的难度。这样还有利于简化系统界面,使系统更加直观,也有利于管理员用户对系统的维护;并且性能查询也可以设置成单一查询,用户就可以快速查询出需要的信息。有利于系统与用户需求相结合,即使用户对镁及镁合金的焊接性能不太了解,也能在此系统中快速查询出所需信息。

5 结论

此系统是利用 ASP 和 SQL Sever 数据库技术结合焊接知识设计而成的一个比较完善的镁合金焊接性数据。数据库中包含了镁合金焊接方面的各种数据和图表,使用户通过系统的各项功能快速方便了解镁合金焊接性各方面的信息。系统是基于 B/S 结构的数据库系统,具有数据共享、安全性高等优点;并且界面简洁,利于用户使用和管理员维护。

参考文献

- 1 史耀武. 焊接技术手册. 福州:福建科学技术出版社, 2005: 363 ~ 368
- 2 ASP + SQL Server 典型网站建设案例. 北京:清华大学出版社, 2006: 6 ~ 12
- 3 顾曾迪,杨大木,金心博. 有色金属焊接. 第 2 版. 北京:机械工业出版社, 1995: 301 ~ 330
- 4 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册第 2 卷焊接的材料. 北京:机械工业出版社, 1992: 521 ~ 527

(编辑 任涛)

(上接第 20 页)

4 结论

(1)两火次打击后坯料各部位充填效果理想,锻件轮廓清晰,未出现充不满和折叠等锻造缺陷,表明设计的工艺方案合理,可以满足叶片的成形质量要求。

(2)由于叶片形状复杂,导致成形过程中应变分布十分不均匀,阻尼台的边缘部位最大,榫头部位最小;变形过程中等效应力峰值则几乎都出现在与模具接触的区域。

(3)坯料终锻温度控制理想,部分位置由于塑性变形及摩擦生热导致终锻温度较始端温度有所上升,而终锻温度较低的区域主要出现在阻尼台和榫头的肋部。

参考文献

- 1 张志文著. 叶片锻造. 西安:西安交通大学出版社, 1987

- 2 王开全. 汽轮机叶片精密模锻技术 CAD 与 CAE 研究. 燕山大学硕士学位论文, 2004
- 3 Zhan Mei, Yang He, Liu Yuli Deformation characteristic of the precision forging of a blade with a damper platform using 3D FEM analysis Journal of Materials Processing Technology, 2004; 150(3): 290 ~ 299
- 4 Hu ZM, Dean TA. Aspects of forging of titanium alloys and the production of blade forms Journal of Materials Processing Technology, 2001; 111(1 ~ 3): 10 ~ 19
- 5 薛善坤,刘雪梅,熊爱明等. TC4 合金叶片精锻过程的二维数值模拟. 机械科学与技术, 2004; 23(7): 793 ~ 795
- 6 蔡旺,杨合,刘郁丽等. 单榫头叶片叶身精锻成形规律. 机械科学与技术, 2005; 24(2): 135 ~ 138
- 7 张晓露. TC4 合金大型框锻件成形工艺设计与过程模拟. 西北工业大学硕士论文, 2007

(编辑 吴坚)