

# ZL205A铝合金大型复杂筒体 构件淬火过程模拟与变形预报\*

卢琛<sup>1</sup>,张程菘<sup>2</sup>,富宏亚<sup>1</sup>,闫牧夫<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001;

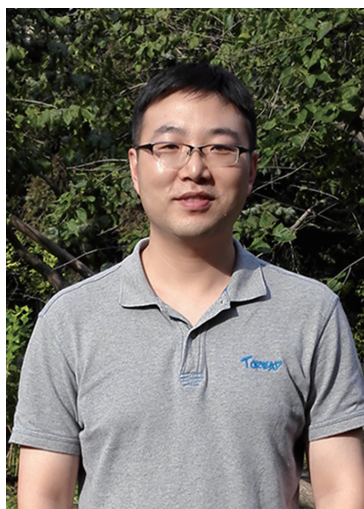
2. 西南交通大学材料科学与工程学院, 成都 611756;

3. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**[摘要]** 基于ABAQUS软件采用有限元方法建立ZL205A铝合金大型复杂构件淬火过程的温度场与应力场模型,分析构件在淬火过程中不同时刻的温度场分布。根据构件结构特征,选择4个特征点获得淬火过程冷却曲线,并对构件厚壁、加强筋与薄壁部分的冷却曲线进行研究,使用有限元模拟方法预报构件变形和残余应力。ZL205A铝合金大型复杂构件淬火变形主要为径向变形,通过比较淬火后残余应力的6个分量可知正应力远大于剪应力。模拟厚壁在不同换热系数下的淬火效果,发现增加换热系数可以提高厚壁淬火冷却速度,但是作用比较有限。

**关键词:** ZL205A 铝合金; 大型复杂构件; 有限元模拟; 变形预报

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2016.20.036



卢琛

哈尔滨工业大学机电工程学院机械制造及其自动化专业博士研究生,主要研究方向为金属材料加工数值模拟。

随着我国航空航天技术的不断发展,越来越多的高强度铸造铝合金被用于制造承受较大载荷的机械构件<sup>[1]</sup>。ZL205A铝合金是Al-Cu合金的一种,因其具有韧性好、强度高、耐腐蚀等特点,已经广泛应用于军工、航空和航天等领域中重要受力件的制造<sup>[2-3]</sup>。而此类铝合金大型薄壁复杂构件经历固溶淬火后,力学性能与形状尺寸控制已成为其制造的难题。此类大型复杂构件在淬火过程中不同部分冷却速度不均引起的热应力及残余应力是导致工件变形甚至报废的主要原因。据此,国内外学者已开展了大量的研究。

Yang等<sup>[4]</sup>使用有限元方法模拟了不同淬火介质以及淬火介质温度对A357铝合金淬火残余应力与变形的影响,阐述了A357铝合金大型薄壁件温度场的计算精确度关键在于不同温度下淬火介质换热系数

的精确计算,实现了对淬火残余应力与变形的预报。该方法同样适用于ZL114A铝合金<sup>[5]</sup>与7075铝合金<sup>[6]</sup>。梁旭坤等<sup>[7-8]</sup>使用有限元方法对7075铝合金大规格厚板的非对称淬火变形过程进行模拟,指出工件的壁厚是影响残余应力的主要原因,而中厚板淬火过程中的支撑方式直接影响其淬火变形程度和趋势,通过增加支撑点,整体变形得以改善,但局部变形点增多。Wang等<sup>[9]</sup>建立了6061铝合金淬火过程温度场和应力场数值模型,分析了工件在淬火不同时刻的温度场分布,并根据工件结构特点选择8个特征点分析其淬火冷却曲线,发现工件薄壁处冷却速度最快,而凸台内侧拐角处冷却速度最慢。Li等<sup>[10-11]</sup>使用自适应方法控制模拟分析的增量时间步长,根据上一增量步和当前增量步零件温差的最大值和最小值来调整时间步长,并且

\* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目-航天先进制造技术研究联合基金(U1537201)。

根据该方法建立淬火过程中温度场和应力场耦合模型。

然而,目前国内外学者对铝合金淬火过程的相关研究基本都以试验为主,其模拟研究所涉及的工件通常使用尺寸较小、壁厚均匀,且结构简单的零件作为试验对象,同时保证其冷却速度和冷却均匀性比较容易实现。但是,对于结构复杂、尺寸较大、不同部分壁厚差异较大的构件来说,在保证冷却速度的同时兼顾冷却均匀性是非常困难的。本文对结构复杂、壁厚差异大、且尺寸较大的铝合金复杂筒体构件淬火过程温度场、应力场等进行多物理场耦合分析,并反映其淬火过程的变形根源,以及实现对大型复杂构件的变形预报。

## 有限元模型

本文采用有限元方法对 ZL205A 铝合金大型复杂构件淬火过程的温度场与应力场进行计算。通过 ABAQUS 软件建立的复杂工件三维模型、网格划分以及待分析的特征区域如图 1 所示。图 1(a) 是根据实际工件建立起来的三维模型,此种铝合金大型复杂构件外圆直径 2000mm,高 794mm,并具有如下结构特点:在轴向和径向均有加强筋,并且壁厚差异大。加强筋厚度 6mm,壁厚最小值为 10mm,壁厚最大值为 60mm。图 1(b) 是 ABAQUS 软件划分的网格,节点总数 100800 个,单元总数 67680 个,DC3D8 类型的单元应用于热量传输模拟中,C3D8R 类型的单元应用于应力分析中。后续分析中所用的特征位置放大图和特征点分布如图 1(c) 所示,特征点 A 是厚壁心部、B 点是厚壁表面、C 点是加强筋中部、D 点是薄壁中间位置。

## 数学模型

导热微分方程是描述导热物体

内部温度分布的微分方程,其建立的理论依据是能量守恒定律和傅里叶定律<sup>[2]</sup>。ZL205A 铝合金热处理的目的是为了抑制相变,因此,忽略淬火过程的相变潜热后得到非稳态导热微分方程数学表达式:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

其中, $\rho$ 、 $c$ 、 $T$ 、 $t$ 和 $\lambda_i$ 分别表示密度、比热容、温度、时间和热传导系数。

在本研究中,初始条件是 ZL205A 铝合金大型复杂构件的起始温度,时间 $t=0$ 时的数学表达式为:

$$T|_{t=0} = T_0(x, y, z) \quad (2)$$

铝合金大型复杂构件与淬火介质的对流换热系数及环境温度已知时,边界条件的关系式为:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = H_k (T_w - T_c) \quad (3)$$

$n$ 为温度梯度方向, $H_k$ 、 $T_w$ 和 $T_c$ 分

别表示对流换热系数、边界温度和淬火介质温度。使用 ABAQUS 软件对温度场和应力场进行顺序耦合分析。在模拟计算时假设 ZL205A 铝合金材料传导性各向同性、淬火槽无限大、淬火介质温度恒定。由于铝合金大型构件淬火变形而产生的热量较少,因此在分析时不考虑淬火变形对温度场的影响。

## 有限元模拟结果与分析

### 1 温度场分析

ZL205A 铝合金大型复杂构件在 25℃ 水中淬火时不同时刻的温度场分布如图 2 所示,特征点 A-D 的冷却曲线如图 3 所示。由图 2 可见,从工件淬火开始厚壁与薄壁部分的温差不断增大,到 1.5s 时温差超过 400℃,随着淬火过程的继续,温差逐渐减小,到 132s 时各部分温度基本一致。由图 3 可知,加强筋中部 C 点的冷却速度最快,薄壁中间位置 D 点与加强筋中部冷却速度相近,冷却

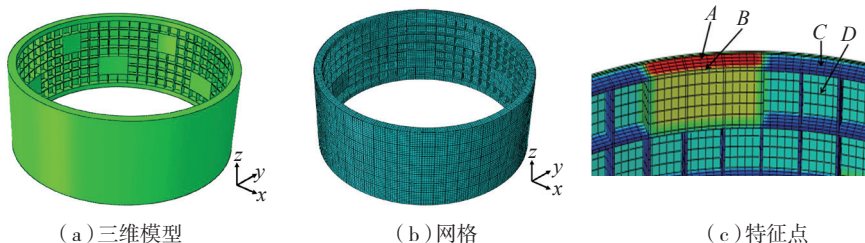


图1 ZL205A铝合金大型复杂构件有限元模型

Fig.1 Finite element model of ZL205A aluminum alloy large complicated workpiece

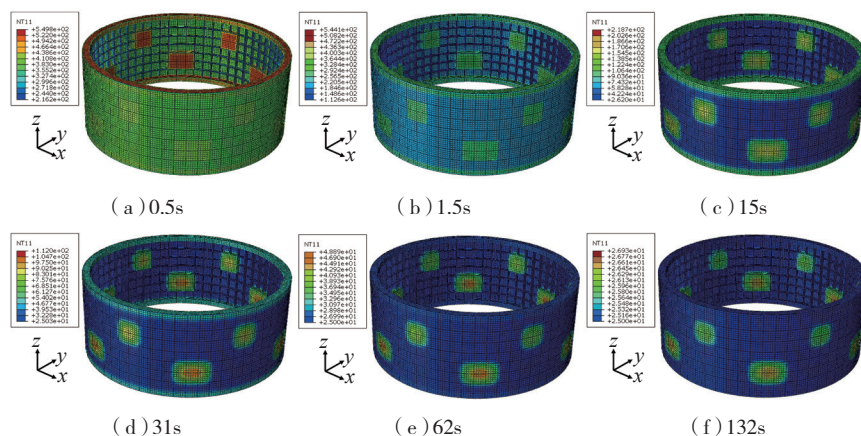


图2 ZL205A铝合金大型复杂构件淬火过程的温度场

Fig.2 Temperature fields of ZL205A aluminum alloy large complicated workpiece during quenching process

速度最慢的是厚壁心部 A 点,厚壁表面中间位置 B 点的冷却速度介于厚壁心部与薄壁中间位置之间。

## 2 残余应力与变形

对于热处理过程中无相变的金属而言,热应力是其热处理变形的主要原因<sup>[13]</sup>。在 ZL205A 铝合金大型复杂构件淬火冷却的开始阶段,构件的差异在壁厚之间,以及厚壁的心部和表面之间温差都不大,此时构件不同部分之间温差引起的瞬时热应力没有达到构件在这个温度下的屈服强度。但是,随着淬火过程的推进,由于构件壁厚之间差异,以及厚壁心部与表面之间的冷却速度相差较大,导致构件不同部分间的温差逐渐增大,热应力也随之不断增大。同一时刻,构件薄壁和加强筋处比厚壁部分温度低,屈服强度比厚壁高;厚壁表面比心部温度低,屈服强度比心部高。在构件薄壁和加强筋部分瞬时拉伸热应力还未达到 ZL205A 铝合金屈服点时,厚壁部分的瞬时压缩热应力先达到材料的屈服点,并使厚壁开始发生压缩变形,工件淬火后在  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向最大变形量如图 4 所示,从图中可以看出,此类铝合金大型复杂构件的淬火变形主要是径向变形。

在淬火冷却过程继续进行的过程中,构件厚壁部分的塑性变形量随着热应力的增大而增大,直到淬火过程末期,构件厚壁部分和薄壁部分的温差变小,塑性变形结束,同时残余应力形成,构件残余应力 6 个分量的分布及其最大值分别如图 5 和图 6 所示,残余正应力的 3 个分量均大于残余剪应力的 3 个分量,且残余正应力的最大值 319.7MPa 远大于残余剪应力的最大值 138.4MPa。

## 3 换热系数对冷却速度的影响

根据本文之前对铝合金大型复杂构件淬火变形的分析,此类构件淬火时厚壁与薄壁和加强筋之间的冷却速度不均导致的热应力是其变形的主要原因。因此,提高构件厚壁部

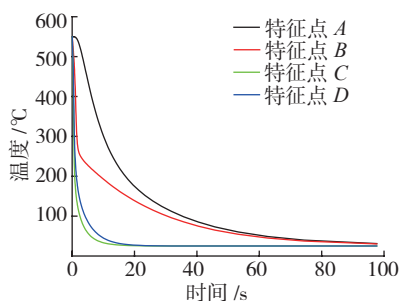


图3 ZL205A铝合金大型复杂构件特征点 A-D冷却曲线

Fig.3 Cooling curves of key points A-D of ZL205A aluminum alloy large complicated workpiece

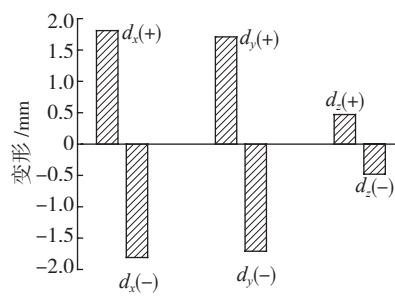


图4 ZL205A铝合金大型复杂构件淬火最大变形

Fig.4 Maximum distortion of quenched ZL205A aluminum alloy large complicated workpiece

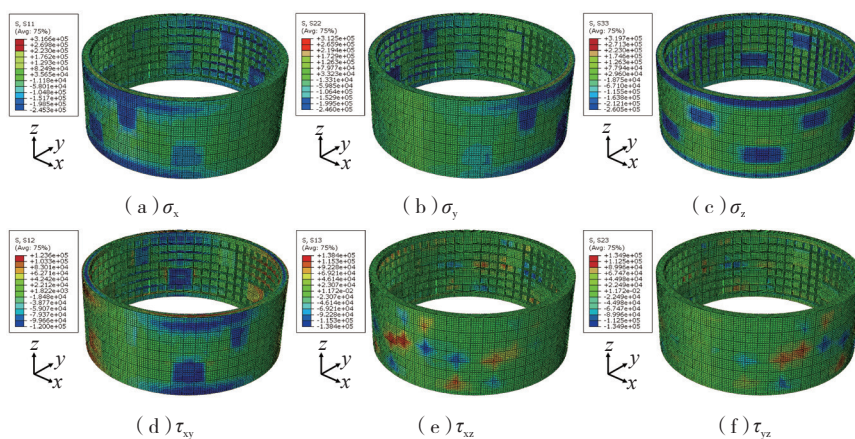


图5 ZL205A铝合金大型复杂构件淬火后残余应力

Fig.5 Residual stresses of ZL205A aluminum alloy large complicated workpiece after quenching

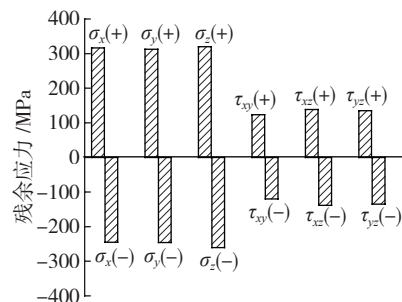


图6 ZL205A铝合金大型复杂构件淬火后残余应力6个分量的最大值

Fig.6 Maximum residual stresses of six component stresses of ZL205A aluminum alloy large complicated workpiece

分的淬火冷却速度可以改善构件变形。当零件在淬火过程中与淬火介质之间的相对运动状态不同时,换热系数最大可以增加到常规状态时的 5 倍<sup>[14-15]</sup>。提取本文图 1 (a) 铝合金大型复杂构件的厚壁和薄壁扇形区域部分作为单独零件分别建立模

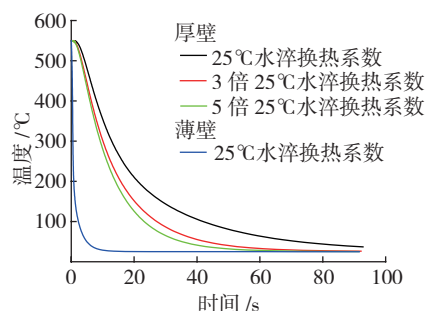


图7 厚壁不同换热系数淬火冷却曲线

Fig.7 Cooling curve of thick-wall workpiece with different heat transfer coefficients

型,使用 25℃水淬 1~5 倍的换热系数进行有限元分析,如图 7 所示增大换热系数可以改善厚壁零件的淬火冷却速度,但是淬火初期的前 15s 内厚壁心部与薄壁之间温差仍然较大,并且随着换热系数的增加厚壁零件心部冷却曲线变化的幅值变小,这说明通过增加换热系数来提高厚壁心

部冷却速度的方法有一定作用,但是效果并不明显。

## 结论

(1) 使用有限元模拟方法,可以有效预报 ZL205A 铝合金大型复杂筒体构件淬火后的变形和残余应力。

(2) ZL205A 铝合金大型复杂筒体构件,在淬火过程中热应力随着厚壁与薄壁和加强筋之间温差的增加而增大,厚壁部分的瞬时热应力先达到材料屈服点,使构件发生径向变形。

(3) 增加厚壁的换热系数对提高其淬火冷却速度有一定作用,但是依然无法改变淬火初期厚壁与薄壁温差较大的情况,并且随着换热系数的增加,厚壁心部的冷却速度的提升效果减小。

## 参考文献

- [1] 武晓枫. ZL205A 合金的热处理工艺的探讨[J]. 甘肃科技, 2014,30(6):71-72.  
WU Xiaofeng. Research heat treatment process of ZL205A aluminum alloy[J]. Gansu Science and Technology, 2014,30(6):71-72.
- [2] JIA P J, WANG Q. The key technology of a stand casting of high strength Al2Cu alloy ZL205A[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 1999,23(2):153-156.
- [3] 贾洋江,陈邦峰. ZL205A 合金高强度优质铸件在大飞机上的应用[J]. 材料工程, 2009(1):77-80.
- JIA Panjiang, CHEN Bangfeng. Application of ZL205A high strength and high-quality casting in large aircraft[J]. Material Engineering, 2009(1):77-80.
- [4] YANG X W, ZHU J C, LAI Z H, et al. Finite element analysis of quenching temperature field, residual stress and distortion in A357 aluminum alloy large complicated thin-wall workpieces[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013,23:1751-1760.
- [5] 肖远伦,赵强,黄志伟,等. 淬火介质对 ZL114A 铝合金性能、变形和组织的影响[J]. 精密成形工程, 2013,5(5):13-17.
- XIAO Yuanlun, ZHAO Qiang, HUANG Zhiwei, et al. Effects of quenching medium on mechanical properties, deformation and microstructure of ZL114A aluminum alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013,5(5):13-17.
- [6] 李大峰,丁华锋,刘立斌,等. 7075 铝合金板淬火残余应力模拟及实验研究[J]. 机械研究与应用, 2012,119(3):92-95.
- LI Dafeng, DING Huaifeng, LIU Libin, et al. Numerical simulation and experimental study of quenching-induced residual stress in 7075 aluminum alloy plates[J]. Mechanical Research & Application, 2012,119(3):92-95.
- [7] 梁旭坤,陈磊,胡永会. 厚板非对称淬火变形的仿真研究[J]. 热加工工艺, 2013,42(20):202-203.
- LIANG Xukun, CHEN Lei, HU Yonghui. Simulation study on asymmetrical quenching deformation of thick plate[J]. Hot Working Technology, 2013,42(20):202-203.
- [8] 梁旭坤,陈磊,胡永会. 中厚板淬火变形的试验研究[J]. 热加工工艺, 2013,42(24):207-208.
- LIANG Xukun, CHEN Lei, HU Yonghui. Experimental study on quenching deformation of medium-thickness plate[J]. Hot Working Technology, 2013,42(24):207-208.
- [9] WANG M J, YANG G, HUANG C Q, et al. Simulation of temperature and stress in 6061 aluminum alloy during online quenching process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014,24(7):2168-2173.
- [10] LI H P, ZHAO G Q, HE L F, et al. Solution of non-linear thermal transient problems by a new adaptive time-step method in quenching process[J]. Applied Mathematical Modelling, 2009,33(1):329-342.
- [11] LI H P, ZHAO G Q, NIU S T, et al. FEM simulation of quenching process and experimental verification of simulation results[J]. Materials Science and Engineering A, 2007,452-453:705-714.
- [12] 吉泽升,朱荣凯,李丹. 传输原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.
- JI Zesheng, ZHU Rongkai, LI Dan. Transfer principle[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005.
- [13] SILVA A D D, PEDROSA T A, GONZALEZ-MENDEZ J L, et al. Distortion in quenching an AISI 4140 C-ring-predictions and experiments[J]. Materials and Design, 2012, 42: 55-61.
- [14] 夏丽芳. 金属热处理工艺学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2008.
- XIA Lifang. Metal heat treatment technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2008.
- [15] 李书常. 热处理使用淬火介质精选[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- LI Shuchang. Selected quenchants for heat treatment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.

# Quenching Process Simulation and Deformation Prediction of ZL205A Aluminum Alloy Large Complicated Cylinder Workpiece

LU Chen<sup>1</sup>, ZHANG Chengsong<sup>2</sup>, FU Hongya<sup>1</sup>, YAN Mufu<sup>3</sup>

- (1. School of Mechatronics and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;  
3. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**[ABSTRACT]** The temperature field and stress field of quenching processes of ZL205A aluminum alloy large complicated workpiece are simulated by finite element method based on ABAQUS software. The temperature field distribution of the workpiece at different times is analyzed. Four key points based on the structure characteristic of the workpiece are chosen for the cooling curves. The cooling curves of the thick-wall, strengthening rib and thin-wall of workpiece are investigated.

The maximum deformation and residual stress after quenching are predicted by finite element simulation. The maximum of quenching deformation at radial direction of ZL205A aluminum alloy large complicated workpiece. The six components of quenching residual stress are compared, the normal stress is greater than the shear stress. The quenching processes of thick-wall workpiece with different heat transfer coefficients are investigated. The cooling rate of thick-wall workpiece increase with the increase of the heat transfer coefficient, but the amplitude isn't obvious.

**Keywords:** ZL205A aluminum alloy; Large complicated workpiece; Finite element simulation; Deformation prediction

(责编 李丹)

(上接第 35 页)

Metallurgical Industry Press, 2007.

[21] 邹金文, 汪武祥. 粉末高温合金研究进展与应用[J]. 航空材料学报, 2006,26(3):244-250.

ZOU Jinwen, WANG Wuxiang. Development and application of P/M superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006,26(3):244-250.

[22] 张家锋, 邹金文, 康进武, 等. FGH96 粉末高温合金涡轮盘淬火过程界面换热系数的研究[J]. 航空材料学报, 2010,30(1):26-29.

ZHANG Jiafeng, ZOU Jinwen, KANG Jinwu, et al. Study on surface heat transfer coefficients of FGH96 P/M superalloy disk during heat-treatment process[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010,30(1):26-29.

[23] 邹金文, 刘东, 柳百成, 等. 涡轮盘风冷过程数值模拟研究[J]. 材料工程, 2009(10):7-10.

ZOU Jinwen, LIU Dong, LIU Baicheng, et al. Simulation of wind chill process for turbine disk[J]. Journal of Materials Engineering,

2009(10):7-10.

[24] 汪煜, 邹金文, 王仁智, 等. 一种粉末冶金高温合金涡轮盘热处理残余应力分析[C]// 第十届中国高温合金年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2007.

WANG Yu, ZOU Jinwen, WANG Renzhi, et al. Analysis of residual stress caused by heat treatment for a P/M superalloy turbine disk[C]// China Eleventh Annual Meeting of Superalloy. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.

[25] 张善庆, 莫卫红, 王广生, 等. Fe-Co 软磁合金真空磁场热处理工艺研究[J]. 航空材料学报, 2003,23(S):58-65.

ZHANG Shanqing, MO Weihong, WANG Guangsheng, et al. Study on Fe-Co magnetically soft alloy vacuum magnetic heat treatment process[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003,23(S):58-65.

[26] 韩劲, 倪志铭, 燕绍九. 高强度 Fe-Co 软磁合金热处理工艺研究[J]. 金属热处理, 2015,40(3):126-128.

HAN Jin, NI Zhiming, YAN Shaojiu.

Heat treatment of high strength Fe-Co soft magnetic alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2015,40(3):126-128.

[27] 韩劲, 倪志铭, 杨根林. 高温高强度 Fe-Co 软磁合金研制[J]. 功能材料, 2015,46(21):21076-21080.

HAN Jin, NI Zhiming, YANG Genlin. Study on soft magnetic Fe-Co alloys with high strength and high temperature resistant[J]. Journal of Functional Materials, 2015,46(21):21076-21080.

[28] 韩劲, 倪志铭, 杨根林. 高强度 Fe-Co 软磁合金研制[J]. 金属功能材料, 2010,17(1):13-16.

HAN Jin, NI Zhiming, YANG Genlin. Study on Fe-Co soft magnetic alloys with high strength[J]. Metallic Functional Materials, 2010,17(1):13-16.

[29] SU Y F, SU H, ZHU Y J. Effects of magnetic field heat treatment on Sm-Co/ $\alpha$ -Fe nanocomposite permanent magnetic materials prepared by high energy ball milling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015,647:375-379.

## Development of Advanced Heat Treatment Technology for Aero-Engine Components

SUN Feng, HE Ruijun, JIANG Zhihua, WANG Lin, TONG Xiaojun, HAN Jin, ZHOU Ge

(AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**[ABSTRACT]** Heat treatment, as the basis and generic technology in the research of advanced aero-engine, is a critical factor in the serviceability of the aero-engine components. Based on the researches and practices of heat treatment in the field in recent years, this paper first gives a general review of the status of advanced heat treatment, and then puts emphasis on the analysis and discussion of the appliance of vacuum heat-treatment, chemical heat-treatment and special heat-treatment on the manufacturing of key components on blade, disk, gear, bearing and rotor. At the end of the paper, it looks forward into the future research and development of heat treatment in the field of aero-engine in our country.

**Keywords:** Aero-engine components; Vacuum heat treatment; Chemical heat treatment; Special heat treatment

(责编 李丹)