

航空厂热处理现状与问题

赵志国¹, 华程², 李黎¹, 谷云峰¹, 虞文军²

(1. 航空工业成都飞机设计研究所, 成都 610091;

2. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

[摘要] 航空厂用钢、铝合金、钛合金等金属材料的热处理具有牌号品种规格多、质量要求高、工艺类型复杂等特点, 随着热处理在航空厂中的被重视程度得到提升, 一些长期存在的问题也逐步得到解决。与以往的高度关注热处理结果和合格率相比, 航空厂应更加注重对热处理过程参数的控制以及对现有数据潜力的挖掘。简要讨论了几类金属材料的热处理, 列举了几点问题并做了简要分析, 提出的改进建议供有关人员参考。

关键词: 航空厂; 金属材料; 热处理; 质量控制; 过程控制

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.23/24.059



赵志国

现任成都飞机设计研究所材料室副主任。长期从事航空材料应用研究、材料及热工艺制造技术研究工作。在金属热锻造成形、铝合金加工技术等方面有一定经验。先后获国防科技进步奖、航空工业科技进步奖等奖项。

由于飞行器对寿命、可靠性、安全性及其他战技指标的苛刻要求, 航空制造技术一直被视为工业制造领域的先进代表, 引领着新材料、新工

艺的应用和发展趋势^[1]。热处理技术作为飞机制造中的重要环节, 对改变材料组织、提升材料性能和满足材料使用要求方面起到至关重要的作用。

在我国各大航空主机厂, 热处理仅是飞机制造诸多工艺环节中的一个特殊过程, 且不易直观体现, 长期以来没有得到足够重视^[2]。近年来, 随着我国航空工业的迅猛发展, 为满足大量新材料、新工艺的应用需求, 热处理技术的重要性日益凸显, 且受军机民机制造中对关键过程控制理念的影响, 热处理质量控制及检测技术在航空厂的重视程度正逐步得到提升。

航空厂热处理的主要特点

航空主机厂的材料热处理技术除本身具有不够显性、过程特殊等特征以外, 还具有以下特点:

(1) 由于飞机结构设计对轻量化和高性能的双重要求, 使得制造过程中既要满足零件性能、又要满足尺寸精度和表面质量, 因此必须对热处

理质量加以精确控制确保满足设计要求。

(2) 与其他制造领域的大规模生产相比, 飞机零件用材具有牌号品种繁多、批量小的特点, 造成热处理工艺及设备复杂多样、组批和检测困难等诸多难题。

(3) 航空材料一般价格昂贵、生产周期长, 控制零件热处理合格率成为影响制造成本和周期的重要因素, 因此热处理环节的质量检测和控制显得极为关键。

航空厂热处理的应用现状

1 钢零件的热处理

随着先进飞机对钛合金、复合材料等用量大幅提升, 钢在飞机结构中的比例有所减少。由于钢具有高强度和高模量优势, 在结构空间受限、局部刚度要求高的部位仍有重要用途, 例如, 飞机起落架支柱、重要部位连接螺栓等。在航空厂, 由于钢材的采购状态一般为预备热处理状态, 需在粗加工或精加工后进行最终热处理, 或进行工序间除氢、消除应

力等热处理,因此钢目前仍然是航空主机厂中热处理种类最多、热处理工作量最大的材料。

目前航空主机厂热处理的钢主要涉及优质碳素结构钢(如 45A)、低合金结构钢(如 30CrMnSiA)、低合金超高强度结构钢(如 30CrMnSiNi2A、40CrNi2Si2MoVA)、高合金超高强度结构钢(如 23Co14Ni12Cr3MoE)、高强或超高强度不锈钢(如 0Cr16Ni6、0Cr13Ni8Mo2Al)等。涉及的热处理工艺类型有淬火(或固溶)、回火(或时效)、正火、退火、冷处理、消除应力等。钢制零件的热处理一般控制材料的力学性能(拉伸强度、冲击、断裂韧度等)和冶金性能(脱碳、晶间氧化等)。

钢制零件热处理设备一般有真空炉、空气炉、保护气氛炉和盐浴炉等。随着热处理设备的发展,零件淬火逐步以真空炉为主,以满足绝大部分带有精加工面的零件热处理需求,逐步淘汰高污染的盐浴炉。与盐浴炉、空气炉热处理技术相比,真空炉热处理的零件氧化(脱碳)危害小、热处理变形程度低,综合性能特别是疲劳性能更佳。

值得注意的是,钢制零件的热处理制度选择时不仅应保证达到零件所需要的强度或硬度,还应注意避免产生回火脆性,以及高强钢零件需要在表面处理后增加除氢处理。使用中由回火脆性、氢脆等导致的失效还时有发生。

2 钛合金零件的热处理

目前飞机用钛合金结构件大部分采用退火态和固溶时效态使用,例如飞机上广泛应用的 Ti6-Al4-V 结构件几乎都在退火态使用。航空厂可直接采购最终热处理状态的毛坯料进行机械加工,一般不再做提升性能为目的的退火热处理。

但是,考虑到钛合金零件加工过程中应力释放导致的变形,航空厂往往需要在钛合金加工过程中或加工

完成后进行消除残余应力退火处理,钛合金零件消除残余应力退火主要控制 3 方面内容:

(1) 控制内应力。选择正确的热处理参数,最大限度地控制和平衡钛合金零件的内应力。

(2) 控制变形。钛合金零件经锻造、热处理、机加、焊接等工艺产生和叠加应力,在最终消除残余应力退火过程中容易造成零件的翘曲变形,大型长梁类零件尤为突出。为控制这类钛合金零件变形,需定制专用工装夹具,对零件易变形方向进行约束,一起进行热处理,有时还需采用其他辅助手段,如控制原材料残余应力水平、安排预留加工余量、增加消除应力次数或采用“矫枉需过正”等办法。

(3) 控制表面质量。图 1 是 TC4-DT 钛合金试片在空气炉中不同温度下加热 1h 后表面颜色变化情况,随着加热温度的升高,表面颜色不断加深,由银白色变为淡黄色、深黄色、蓝色直到棕褐色。为保证零件表面质量,一般采用真空消除应力热处理。经真空消除应力的钛合金精加工零件要求表面不允许出现超过淡黄色的颜色。

钛合金零件消除应力退火一般采用真空炉进行热处理。随着大型整体化钛合金结构件的大量应用,对设备尺寸要求逐步增加。目前采用的设备尺寸已超过 1500mm(直径)×5000m(长度)。

3 铝合金零件的热处理

航空厂进行热处理的铝合金零件主要以钣金类为主,例如 LY12、2024 等主要用于蒙皮或钣金框的零件。其余大尺寸的铝合金机加件几乎都采用最终状态供货并直接加工,例如 7050-T7451 预拉伸厚板、2124-T851 预拉伸厚板等。受铝合金淬透性的影响,存在少量的特大截面的零件,需要航空厂在粗加工后进行固溶时效处理,但这类零件并不很多,原

因是铝合金在机械加工后很难像钛合金或钢那样通过去应力退火或回火来消除零件残余应力,这是由于铝合金对低温(100~200℃)长时间保温较敏感,这会改变其强化相的析出状态从而影响机械性能和腐蚀,所以设计及制造中应尽量减少这种情况出现。

目前航空厂铝合金的热处理工艺类型主要有固溶、退火、时效。设备主要以空气炉和硝酸盐炉进行热处理居多。一般需要在热处理后测试硬度、电导率以检测热处理状态。通过热处理来控制铝合金的力学性能(拉伸等)和冶金性能(晶间腐蚀敏感性等)。但有些问题无法单独通过热处理工艺办法来解决,如在钣金成型中,铝合金零件局部经过度变形,变形所积蓄的能量在正常的固溶或完全退火工艺下,提供晶粒长大的能量,使零件局部的晶粒度异常长大,在后续检查中表现为晶粒度或表面质量不合格,这类问题需要结合成形工艺或设计优化加以解决。

铝合金热处理正逐步以空气循环炉代替硝酸盐炉,来解决硝酸盐炉的环境污染、淬火介质污染等问题^[1]。

4 其他材料的热处理

除了上述材料以外,需在航空厂热处理的还有铜合金和高温合金等,但涉及到的零件数量和热处理类型都较少。其中铜合金主要以消除应力热处理为主,高温合金主要以固溶加时效热处理为主,所采用的热处理设备也能被前述材料覆盖。

此外,需要在航空厂进行热处理的还有焊接类零件。由于早期飞机采用的焊接件较多,这类零件的热处理工作量大、工序较繁琐。焊接件的热处理分为焊前热处理和焊后热处理,焊前热处理往往是在焊接件尺寸过大、热处理不方便或热处理后变形过大时才被采用。由于焊接不可避免地对接缝热影响区域的强度和疲劳性能造成损失,所以在条件允许的

情况下,往往采用焊后热处理获得所需性能的同时,恢复焊缝热影响区的抗蚀性并消除应力^[3]。

虽然焊接技术在不断进步,例如真空电子束焊接技术等对焊缝区域

的质量改善明显,但由于焊接件普遍存在的质量控制要求较高、焊缝热影响区性能有所损失、焊接残余应力和变形控制难度大等特点,所以对焊接件的热处理提出的要求也更高。目

前航空厂焊接件的热处理主要有钛合金真空电子束焊接或氩弧焊、部分钢零件的焊接等,它们所采用的热处理设备与基体材料大体相似,涉及钢零件的回火、钛零件的焊后去应力退

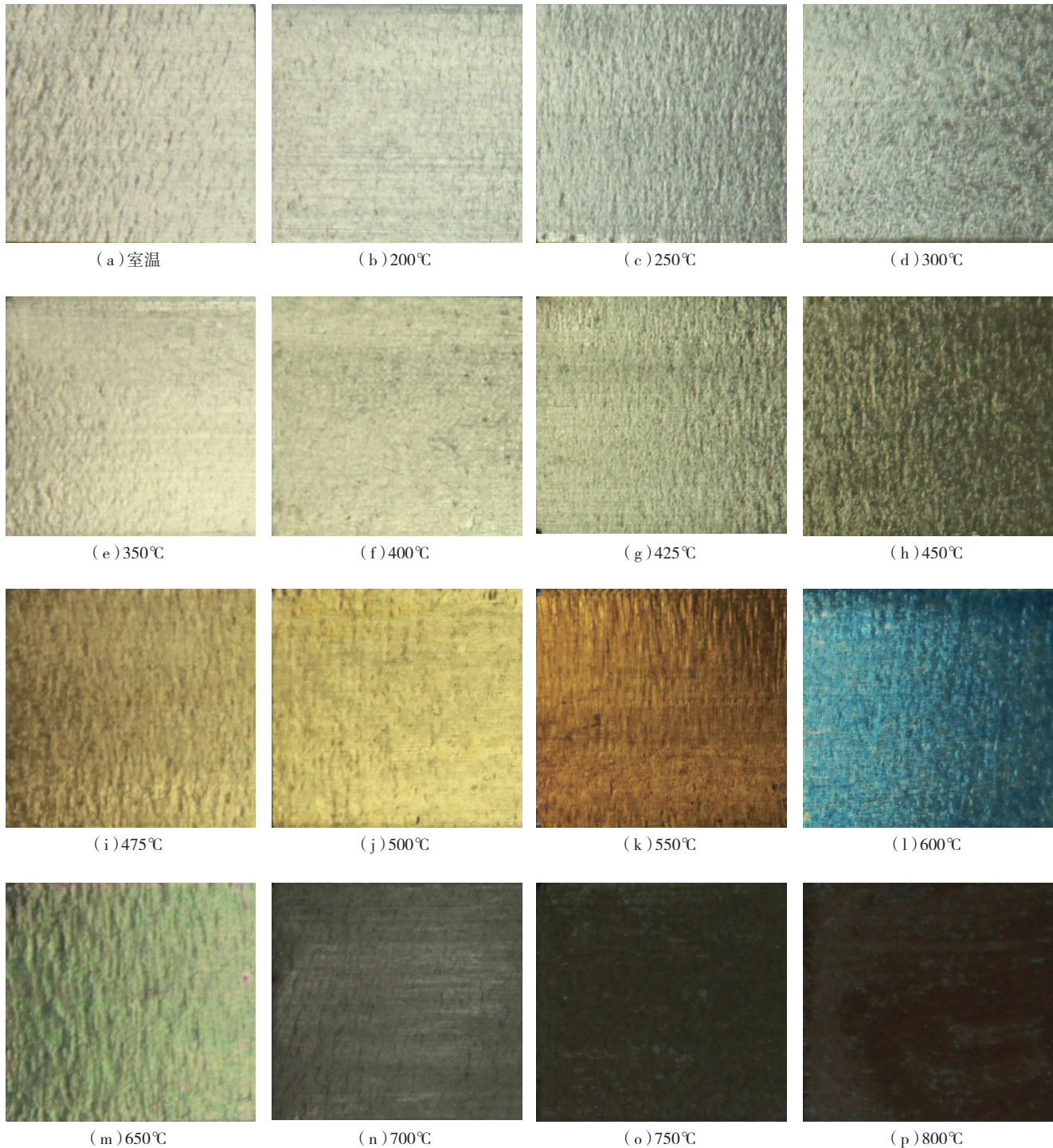


图1 不同加热温度下保温1h后TC4-DT钛合金表面颜色变化

Fig.1 Effect of 1h heat with different temperature preservation on the surface color of TC4-DT titanium

火等工艺类型。

几点问题及建议措施

1 毛坯热处理与零件热处理的差异

一般来说,对材料进行的出厂、入厂检验是在毛坯料上切取少量的理化料进行,其热处理制度依据材料标准规定的制度或强度等级要求进行。而零件(或制件)热处理时需要再度在零件本体上检验或随炉试样上检测,其热处理制度是依据零件热处理工艺标准,例如,HB/Z 136《航空结构钢热处理工艺》和HB/Z 80《航空用不锈钢热处理》等。

材料标准规定的性能和出入厂检测性能,被用于判定原材料是否满足要求以及设计对零件强度分析所使用(有些情况使用A基准值或B基准值)。而零件热处理工艺标准则被作为零件实际热处理执行的依据。二者理论上应保持一致,但在实际操作中发现,二者对某些材料热处理要求范围不完全一致,可能造成零件的实际性能与设计不符的情况出现。例如,Cr16Ni6最终热处理在 $\sigma_b=1080\sim 1370\text{MPa}$ 的强度范围内,材料规范要求回火温度为 420°C ,而工艺标准要求回火温度为 $350\sim 380^\circ\text{C}$ 。由于在航空厂材料入厂复验和零件热处理检测往往归属不同部门负责,这种不一致很难被发现,除非出现零件故障问题进行反查。

对于这类问题,一方面,建议设计要关注和评估这些差异对零件性能带来的影响是否可接受;另一方面,建议标准制定机构研究并对这些不一致加以修订,确保达成一致;难以达成一致时,需要航空厂在制定热处理工艺时对二者的要求予以兼顾,确保零件实际性能与设计要求性能相符。

2 热处理检测数据潜力未被充分利用

由于热处理过程是一个特殊过程,其执行的各项参数与结果密切相

关,建立受监控的热处理参数与材料性能之间的关系非常重要。通过统计分析可以得出特定工艺或特定设备条件下影响零件各项性能的特征参数及其影响规律,不仅可用于优化工艺参数、分析热处理故障、预测设备故障等等诸多方面,还可为设计提供零件的多批次性能值,为设计优化和发掘材料潜力提供有力支撑。

由于航空厂对材料或零件的热处理工序是执行层,大量热处理性能检测的目的是为了判定是否合格,不合格时的数据会被用于原因分析或提交技术部门处理超差使用,合格的数据则会被存档,很少被拿来统计分析。且这些数据往往都是以纸质形式保存,因此对数据的分析和利用变得非常困难。实际上,这些基于生产条件下统计的性能数据与研制阶段工艺试验所获得的数据同等重要,其数据往往更具有代表性、样本量更大,这一点往往被航空厂技术部门忽视。

要做好这一点,需要开展以下3方面的工作:

(1)通过建立工艺参数记录与采集系统,构建企业热处理工艺资源库。目前航空厂的数据采集仅是单个设备的自动记录,例如热处理炉时间与温度曲线记录,这些记录的数据与结果的关联性往往较差,不便于分析与利用。如何实现工艺参数与检测结果关联是该系统的关键。

(2)充分运用基于统计的分析手段,确定热处理特征参数的影响规律,建立热处理工艺决策资源库。目前大部分航空厂只对产品合格率进行统计分析,这种方式比较粗放。而运用质量分析手段的较少,例如采用工序能力指数(CPK)、西格玛水平等质量方法^[4]对热处理关键特性进行分析,查找热处理工艺关键要素和影响规律,从而建立企业热处理工艺决策资源库,是企业热处理工艺研究的核心所在。

(3)基于以上两点,建立基于计算机辅助工艺设计(CAPP)的仿真系统。国内学者对此已有相关研究和建议^[5]。

对热处理检测数据潜力的利用是一项系统工程,涵盖了数据的有效监控、统计分析与改进优化等方面,需要顶层设计、工艺层策划、并在执行层得到有效实施。

3 热处理性能的保证

热处理为特殊过程,需要从人、机、料、法、环、测6方面进行控制。人员需要具备相应的资质,设备按周期进行高温测量,材料复验合格并具有相应的合格证,使用批准的工艺标准进行生产,相关的测试设备均满足相关要求。同时进行一些周期控制要求,比如真空炉需要周期进行脱碳的控制,铝合金需要进行周期力学性能试验,以确保用于生产的设备满足零件生产要求。

零件要求的强度指标通过硬度来检验,但对于一些关键零件不仅要控制硬度,还需要控制其他指标,如拉伸性能、冲击性能、断裂韧度要求以及脱碳要求等。因此,对于零件提出热处理检验要求,并且建立与之相关的检验指标要求。

这样做的最终目的,是为了严格控制产品质量的同时,减少目前大量的理化随炉试样工作量。

4 环保问题

热处理引起的环保问题应得到重视,经全国热处理学会数百位专家制定的《中国热处理与表层改型技术路线图》中明确了“精密-高效-经济-清洁-产业”十字发展目标,其中将绿色化作为一项重要的发展方向^[6]。

航空厂目前也正积极结合发展需要,逐步淘汰一些高污染、高能耗的热处理装备和技术。例如,热处理用盐浴炉逐步在淘汰^[7],盐浴炉特点是加热速度快,零件均匀受热,淬火转移时间较快;缺点是盐腐蚀性强,

稍有不慎零件表面腐蚀严重,同时盐炉环境较差。从工艺角度淘汰这些盐炉,如等温淬火工艺可以使用真空淬火替代。有些超高强度钢制造的螺纹类零件热处理后因强度较高,螺纹缺口敏感性较大,一般要求对螺纹部分进行局部回火,以降低缺口敏感性,这类零件目前大部分仍采用铅浴回火工艺,可以被高频回火工艺代替。

航空厂目前正积极开展相关研究,探索新的替代工艺并确保产品的质量稳定。

5 加强热处理模拟仿真

加强零件热处理数值模拟仿真能力建设,可以提升工艺设计能力和水平,特别是为大型零件热处理变形控制方面提供有力支撑。

结论

航空厂热处理工作正逐步得到重视,基于热处理工艺的重要性和严谨性,对新技术的采用以及现有技术的优化更改都应建立在充分试验验证和分析的基础上。

面对迅速发展的新型热处理技术,航空厂在密切跟踪的同时,应建立企业自身的热处理资源系统和决策系统,满足快速增长的航空制造需要。

参考文献

[1] 孙枫,王广生,佟小军. 航空工业中热处理现状和发展[J]. 金属热处理, 2014, 3(1): 58-66.

SUN Feng, WANG Guangsheng, TONG Xiaojun. Development and current status for aviation industry heat treatment[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 3(1): 58-66.

[2] 丁雪苇. 热处理行业面临的问题及对策[J]. 机械设计与制造工程, 2001, 30(3): 85.

DING Xuewei. The issue and strategy on heating treatment process[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2001, 30(3): 85.

[3] 王宝忠. 飞机设计手册结构设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.

WANG Baozhong. Aircraft design manual: structural design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000.

[4] 张公绪,孙静. 新编质量管理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.

ZHANG Gongxu, SUN Jing. New quality

management[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.

[5] 张长英. 航空结构件热处理 CAPP 系统中的工艺决策[J]. 热加工工艺, 2011, 40(22): 149-150.

ZHANG Changying. Selections of process in heat treatment CAPP system for aircraft structures[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(22): 149-150.

[6] 赵振业,潘健生.《中国热处理与表层改性技术路线图》建议书[C]//第10届中国热处理活动周暨中国热处理技术路线图论坛论文集. 青岛, 2014.

ZHAO Zhenye, PAN Jiansheng. The proposal for the road map of China's heat treatment and surface modification[C]// Proceedings of the 10th China Heat Treatment Activity Week and China Heat Treatment Technology Roadmap Forum. Qingdao, 2014.

[7] 王广生. 2008年中国热处理市场及未来发展趋势[J]. 热处理技术与装备, 2009, 30(3): 1-2, 59.

WANG Guangsheng. The 2008' situation and developing trend of chinese heat treatment market [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2009, 30(3): 1-2, 59.

通讯作者: 赵志国, E-mail: zhaottb@126.com.

Status and Existing Problems of Heat Treatment in Aviation Manufacture Factorys

ZHAO Zhiguo¹, HUA Cheng², LI Li¹, GU Yunfeng¹, YU Wenjun²

(1. AVIC Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610091, China;

2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] Due to multiple specifications and variety of metallic materials of aviation industry such as steel, aluminum alloy and titanium alloy etc, heat treatment process of metallic materials has high quality requirement and is complex. With increasing attention on heat treatment in aviation manufacture factories, many long existing problems have been resolved gradually. Compared with emphasis on results and qualification rate of heat treatment previously, more importance should be attached to process parameter control and existing data potentiality exploitation. This thesis briefly describes heat treatment of a few types of metallic materials, puts forward some problems and simple analysis, and proposes some improvement suggestions for the reference of related personnel.

Keywords: Aviation industry; Metallic material; Heat treatment; Quality control; Process control

(责编 海山 大漠)