钛合金化铣工艺及生产线

侯世民[1],张锦伟[1],卢相平[1],赵兴建[2],孔德炳[2]
(1. 西安航空发动机(集团)有限公司,陕西 西安 710021;2. 中联西北工程设计研究院,陕西 西安 710082)

[摘 要] 化铣是一种能使表面形状复杂、加工精度要求高的零件达到加工要求的表面处理方法。根据钛合金化铣的反应机理,通过试验与实践相结合,得出了钛合金化铣的工艺参数。并阐述了航空发动机钛合金叶片化铣自动生产线的设计要领和设备配置。

[关键词] 化铣;钛合金化铣;工艺;生产线
[中图分类号]TG176 [文献标识码]B [文章编号]1001-3660(2007)02-0037-02

Chemical Milling Technology for Titanium Alloy & It's Product Line

HOU Shi-min[1], *ZHANG Jin-wei*[1], *LU Xiang-ping*[1], *ZHAO Xing-jian*[2], *KONG De-bing*[2]
(1. Xi'an Aero-engine (Group) Ltd., Xi'an 710021, China;
2. China United Northwest Institute for Engineering Design δ Research, Xi'an 710082, China)

[**Abstract**] Chemical milling is a surface processing method which can fulfill the high processing precision request of the accessory having complicated surface, and can attain the surface roughness request of work-piece which be processed. The technical process, the reactive mechanism, the design essential, and the major configurations of chemical milling for titanium alloy were introduced.

[**Key words**] Chemical milling; Chemical milling technology for titanium alloy; Technology; Product line

0 引 言

在发动机领域里,航空发动机是最复杂、最具有挑战性的,航空技术的核心就体现在发动机上,它代表着一个国家的航空制造水平。

航空发动机叶片是发动机的重要组成零件,一台发动机上要安装几千枚各种规格的叶片,叶片质量的好坏直接影响发动机的性能,除了对叶片的规格、形状、大小、材质等物理化学性能都有严格的规定外,其表面质量也是一项非常重要的指标。

叶片经过铸、锻等多种加工工艺形成毛坯后,需要对合格的毛坯件进行精加工,每一道工序都留有加工余量,前面的工序完成后,将进入最终的表面成型阶段。这一阶段的加工精度要求达到微米级,加之形状较复杂、叶片薄,机械加工性能差,机械加工虽然可以保证加工精度,然而生产效率太低,无法满足生产需求。传统的化学腐蚀方法污染严重,废品率高,表面铣削加工一直是困扰叶片加工的瓶颈问题。因此,在保证加工精度的基础上提高生产效率,成为了一项非常重大的课题。

西安航空发动机(集团)有限公司与中联西北工程设计研究院经过研究、试验,攻克了这一关键技术,并建造了三条全自动化铣生产线,专门用于钛合金叶片、不锈钢叶片、高温合金钢叶片的加工。经过了一年多的生产实践,工艺性能和产品质量稳定、生产线运行状态良好、生产环境整洁,大大改善了工人劳动强度和工作环境。

该生产线的成功运行,为我国的航空发动机叶片高质量、大批量生产提供了可靠的成功经验。

本文以钛合金叶片化铣为主,结合生产工艺、生产设备、生产效率和产品质量等诸多方面展开论述。

[收稿日期] 2006-10-10
[作者简介]侯世民(1962-),男,河南洛阳人,高级工程师,在职工程硕士,研究方向:工程管理。

1 钛合金化铣工艺

1.1 反应机理

钛合金化铣就是采用化学方法对钛合金金属表面进行定量的全面腐蚀,腐蚀速度和腐蚀量均处于可控制状态,达到设定的要求。钛的机械强度很高,密度仅为钢的一半左右,并且具有良好的抗蚀性能,特别是对湿的氯气和海水有良好的抗蚀性能,被广泛用于航空、航海和化工领域。室温下,钛对于空气和水是十分稳定的,在一定温度下,钛与浓硝酸、氢氟酸、浓硫酸和盐酸发生反应而被腐蚀。

经过试验钛以及钛合金在一定浓度的硝酸与氢氟酸的混和酸中,加入一定量添加剂,控制好溶液的温度,我们发现钛不发生局部腐蚀和晶间腐蚀,腐蚀是均匀进行的,而且,腐蚀过程处于可控制状态。试验还发现钛合金的腐蚀速度随着酸的性质、浓度、温度而发生变化。氢氟酸对钛的腐蚀,浓度越高、温度越高,腐蚀速度越快;温度是影响化铣的一项重要参数,当温度过低时,化铣基本上处于停滞状态,而温度过高,则会导致过腐蚀或者局部腐蚀以及晶间腐蚀等现象。

1.2　化铣的反应过程

钛原子价层电子构型为 $3d^24s^2$，与热浓硝酸和氢氟酸的混合物发生化学反应，生成 +4 价的二元化合物 TiO_2 和 TiF_4[1]，其反应过程如下：

$$TiO_2 + 4HF \rightarrow TiF_4 + 2H_2O$$

$$Ti + 2NO_3^- + nH_2O \rightarrow TiO_2 \cdot nH_2O\downarrow + 2NO_2 + 2e$$

$$Ti + 4HF \rightarrow TiF_4 + 2H_2\uparrow$$

上述反应均为放热反应，在反应的过程中，溶液温度始终在上升，对于反应过程的速度控制是不利的。钛与硝酸反应生成的 $TiO_2 \cdot nH_2O$ 不溶于水，会造成溶液浑浊和工件表面积灰等，是工业化生产需要解决的问题。

1.3　浓度和温度与化铣速度的关系

溶液浓度和温度的变化对钛的化铣有着明显的影响。随着溶液浓度的降低，反应速度越来越慢，甚至停止；当溶液浓度过大时，反应速度也趋于减缓，甚至被抑制。试验表明，最佳的溶液配制范围是：200～350g/L HNO_3、50～90g/L HF。

温度的影响也是非常显著的。在冷态情况下，反应基本处于停滞状态；当温度达到 32℃时，反应明显，随着溶液温度的提升，反应速度逐渐加快；当溶液温度达到 65℃以上时，不利于控制。因此最合适的温度范围为 40～55℃。

由于被处理工件用途特殊，必须考虑反应过程中产生的氢气对工件的影响。资料表明，在温度低于 80℃时，电化学还原的氢扩散速度非常慢，氢原子将停留在钛合金表面，不会破坏材料。

2　生产工艺

经过试验，采用化学方法能够很好地处理工件，达到预期的效果。把 1.3 中的结果应用于工业化生产，需解决生产中的瓶颈。必须编制工艺流程、工艺参数，还应该经过中试进行验证，才能规模生产。

2.1　工艺流程

化学脱脂→热水洗→冷水洗→钛合金腐蚀→钛合金化铣→冷水洗→冷水洗→除灰→中和→纯水洗→高压清洗→热纯水洗。

2.2　工艺说明

1）化学脱脂　工件经过铸、锻、机加工等工序，在工序间周转过程中，表面会残留有污垢、油渍等，必须清理干净。本工艺采用化学法进行处理，如果工件存在孔隙还应该配超声波等方式进行清洗。

2）水洗　热水洗、冷水洗的目的是洗去工件表面上一道工序的残留液，避免带入下一道工序，污染下一道工序的槽液而降低溶液功能。

3）腐蚀　快速溶解工件加工过程中的加工余量，属于粗加工工序，减少化铣的时间。

4）化铣　铣切工件表面，通过对溶液温度和浓度的监控，达到工件的规定尺寸和性能指标。

5）除灰　去除工件表面灰化残留物。

6）中和　中和表面残余酸。

7）纯水洗　清除工件表面上的杂质离子。

8）高压清洗　采用纯水，以 1.2×10^6Pa 的压力，冲洗工件表面，彻底清洗工件表面的残留物质。

9）热纯水洗　烫干，避免工件表面干燥后留下水印。

2.3　工艺参数

钛合金化铣的工艺参数根据所处理的工件的不同存在着一定的差异。本文只列举我们经过试验后并应用于生产的参数（见表 1）。

表 1　钛合金化铣工艺参数表

Table 1 Parameter list of chemical milling technology for titanium alloy

序号	工序	工艺参数		备注
		主要成份	温度范围	
1	化学除油	40～60g/L NaOH、30～50g/L Na_2CO_3	60～80℃	至油污处理干净
2	热水洗		60～80℃	
3	冷水洗		室温	
4	腐蚀		40～60℃	
5	化铣	HNO_3、HF	45～55℃	
6	冷水洗		室温	
7	冷水洗		室温	
8	除灰	200～350g/L HNO_3	室温	
6	中和	30～50g/L Na_2CO_3	室温	
7	去离子水洗		室温	
8	高压清洗	1.2×10^6Pa，纯水		
9	去离子水洗		70～80℃	

3　钛合金化铣生产线

3.1　概　述

根据生产纲领、年时基数、工艺流程和参数设计生产线，由于钛合金化铣所使用的溶液均为强酸，有很强的腐蚀性，而且污染严重，因此，设备选型的耐蚀性、劳动安全卫生、工作环境是本次设计的重点内容，必须给予解决，符合国家相关标准的规定。

3.2　生产线的形式

本次设计的钛合金化铣生产线采用直线式布置，中轨行车作为生产线上的运输工具，采用全自动控制，能实现自动、半自动和手动控制的转换。

工件采用滚筒装卸，每次最大可处理约 30kg 的工件，在全自动操作方式下，单班 8h 计，年时基数 1920h，生产线的生产节拍 15min，即每 15min 生产出一个滚筒的叶片，每滚筒按 50～100 件计算，该条生产线的年生产能力为 32.6～65.2 万件。

3.3　生产线的布置区域

钛合金化铣生产线最好布置于单独的厂房内，可与其他的前处理生产线一起布置。不宜布置在钢结构的厂房内，地面、墙面、内屋面需做重度防腐蚀处理。

生产线应配置槽边排风和移动式排风，厂房设置全室通风

（下转第 41 页）

3　结　论

1）通过正交试验，对配方及工艺进行优选，得到的最佳柠檬酸钝化配方及工艺为：柠檬酸 3%、双氧水 10%、乙醇 5%，温度 25℃，钝化时间 90min。经该工艺处理的试样耐点蚀性能极佳。

2）316L 不锈钢不同部位的耐点蚀性能相差很大，母材区耐点蚀性能最佳，焊缝次之，热影响区最差。经柠檬酸钝化后，母材区和热影响区耐点蚀性能大大提高，焊缝区耐点蚀性能略有改善，从而提高了 316L 不锈钢的整体耐点蚀性能。

[参 考 文 献]

[1] 田丰. 谈谈奥氏体不锈钢压力容器的酸洗钝化[J]. 余热锅炉，2001，(4)：28-29
[2] 陈天玉. 不锈钢表面处理技术[M]. 北京：化学工业出版社，2004. 198-237
[3] 袁秋礼. 化学清洗后的钝化处理[J]. 洗净技术，2004，2(6)：38-41
[4] 林百春. 不锈钢表面处理：酸洗、钝化与抛光[J]. 材料开发与应用，2006，21(3)：36-39
[5] 任凤英. 不锈钢钝化处理技术的应用和试验方法[J]. 五金技术，2005，33(3)：22-24
[6] 于元春，李宁，胡会利，等. 无铬钝化与三价铬钝化的研究进展[J]. 表面技术，2005，34(10)：6-9
[7] 马正飞，殷翔. 数学计算方法与软件的工程应用[M]. 北京：化学工业出版社，2002. 215-223

(上接第 38 页)

换气，配置送风系统，送风量应与排风量匹配。内部照明不低于 300lux。应留有纯水机组、冷水机组、废水处理系统、排风与废气处理系统的场地。

3.4　生产线配置

3.4.1　生产线线体

根据溶液性质选择槽体材质，化学除油槽、热水槽等应采用不锈钢材质并做保温；化铣槽、冷水槽等宜采用 PP 材质。生产过程中会产生大量的沉淀物，因此，所有的槽底均应作特殊处理，便于清理，保证寿命。

槽液温度自动控制，配有加热、冷却装置。化铣过程中对槽液的温度要求比较严格，温度波动应≤±1.5℃。反应过程为放热反应，因此必须配套冷却装置。

生产过程中，槽液消耗量较大，为保证生产、保护加热装置，在槽体内设液位显示报警装置，设有高位、低位显示，当槽液处于低位时，报警并停止加热器。

为防止槽液的挥发，减少溶液浓度波动，保护设备，配制活动式槽盖。

生产线设置槽边排风，收集生产过程中产生的废气，集中处理。采用内置式排风罩，提高排风效果，并且线体外型美观。

3.4.2　行车

生产线上的工件运输工具，采用中低轨式龙门行车，行车应具有很好的耐蚀性能，运行平稳、刹车灵活可靠，运行和提升均采用变频调速，速度应满足工艺需求。

行车的运行、停止均按照设定的程序自动操作，设置机械和电器双重保护。

3.4.3　冷水机组

由于腐蚀会产生大量的热量，需配置冷水机组进行降温。采用间接换热的方式，冷水机组的蒸发器不与槽液直接接触，在槽液与冷冻机组之间利用循环冷却液进行热量交换，循环冷却液的温度控制在 7～12℃。

3.4.4　管路系统

生产线主水管道和支水管道、压缩空气管、纯水管、排水管及阀门是生产线的重要组成部分，所有管道和阀门的选型非常重要，直接影响生产线的使用效果。

3.4.5　排风及废气治理

生产线应设置槽边排风和移动排风。槽边排风用于控制槽体液面风速，收集槽液挥发的废气；移动排风跟随工件运行，收集工件入槽、出槽和反应时产生的大量废气。

移动排风是本生产线的一项创新技术，解决了重腐蚀时工件入槽、出槽的废气收集难题，经过实际使用，效果良好。

本生产线产生的废气主要有氮氧化物、氟化氢等，瞬间浓度可达 800～1000mg/m^3，因此，必须采用两级处理的方式，保证废气的达标排放。

4　应　用

发动机钛合金叶片化铣自动生产线的成功使用，使化铣叶片的质量和生产效率得到了进一步的提高。

以往由于化铣工艺采用大量的强酸，而且温度较高，在加工工序中产生大量的酸雾，严重影响工人的身心健康，并造成厂房设备严重锈蚀。而化铣自动生产线的实现改善了工人的劳动强度和工作环境。

化学铣切工艺方法的采用，目前可以取代传统机械铣削加工方法，实现批量生产，解决了航空发动机叶片复杂零件的精加工，开创了复杂零件加工的先例，该技术的推广应用前途广阔。

[参 考 文 献]

[1] 赵树萍，吕双坤，郝文杰. 钛合金及其表面处理[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2003. 11-23

《表面技术》　双月刊
欢迎订阅
邮发代号：78－31　　订价：8.00 元/册
全年订价：48.00 元，共 6 期
电话/传真：023－68793154