

新型铝锂合金 2060T8 板材铣削试验研究<sup>\*</sup>

## Experimental Study on Milling of New Al-Li Alloy 2060T8 Sheet

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 张兴振 李小强 李东升 宋楠  
上海飞机制造有限公司 孙中刚

[摘要] 设计开发了一种可用于薄板材铣削夹持固定的真空吸附系统,并通过一种新型铝锂合金 2060T8 的铣削试验,对该系统的实用性进行了验证;然后基于该系统,通过正交试验,进行了 2060T8 的铣削性能试验研究,主要进行了铣削加工参数对零件加工表面粗糙度的影响研究。结果表明,影响表面粗糙度的因素主次关系是:铣削深度>每齿进给量>铣削宽度>主轴转速;表面粗糙度随铣削深度、每齿进给量、主轴转速的增加而增大,随铣削宽度的增加先减小后增大。

关键词:真空吸附系统 新型铝锂合金 2060T8 铣削加工参数 表面粗糙度

[ABSTRACT] The vacuum absorption system which can be used to hold and fix thin sheet during milling is designed and developed, and its practicality is verified through milling experiments on new AL-Li alloy 2060T8. Then based on the system, the study on the milling performance of 2060T8, mainly the effect of milling parameters on part surface roughness is conducted by orthogonal experiments. The research results indicate that milling depth has the greatest effect on the surface roughness, followed by feed rate per tooth, then milling width and finally spindle speed. The surface roughness increases with the increasing of milling depth, feed rate per tooth, spindle speed and decreases, then increases with the increasing of milling width.

Keywords: Vacuum absorption system New Al-Li alloy 2060T8 Milling parameter Surface roughness

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.03.046

铝锂合金作为一种低密度、高比强度、高比刚度的合金材料,在航空制造领域显示出了广阔的应用前景,特别是新型的第三代铝锂合金,在国外飞机上都已经有了大量的应用。庞巴迪 C 系列客机中,铝锂合金材料部件已经占到飞机材料使用总量的 23%<sup>[1]</sup>。铝锂合金在飞机上

的应用主要是机身蒙皮、梁、腹板、隔框、长桁等结构。国内对于第三代铝锂合金的研究才刚刚起步。

为了减轻重量,现代飞机结构设计中大量使用带台阶薄壁结构。通过局部减薄,可使蒙皮壁板重量减轻 40% 以上。对于这种台阶结构,一般采用化学铣切的方法进行加工,该工艺已在航空业应用多年,对其研究已相对成熟。

毛大恒、易慧芝等<sup>[2-4]</sup>研究了 2197 铝锂合金化学铣切工艺,得出了化铣液组成、温度对铣切加工速度、表面粗糙度等的影响规律,并讨论了原始表面粗糙度对化铣加工质量的影响。但由于化学铣切存在零件尺寸和厚度精度难以控制,零件疲劳性能降低,加工效率低,污染环境等问题,采用机械铣削加工代替化学铣切是近年来国外研究的重点。刘维伟等<sup>[5]</sup>采用正交试验法,使用整体硬质合金刀具进行了 GH4169 高温合金的高速铣削试验,分析了各切削参数对表面粗糙度的影响规律,建立了表面粗糙度的预测模型。姚倡锋<sup>[6]</sup>等面向高速铣削中表面粗糙度的工艺控制,通过高速端面铣削正交试验,研究并分析了高速铣削参数对表面粗糙度及三位表面形貌的影响。Ammula、Tang 等<sup>[7-10]</sup>研究了 6061-T651 和 7050-T7451 两种常规铝合金高速铣削残余应力与铣削加工参数之间的关系。

本文基于自主设计开发的一种可用于薄板材铣削夹持固定的真空吸附系统,对新型铝锂合金 2060T8 薄板材的机械铣削性能展开了研究。通过正交试验,研究并分析了铣削加工参数,如铣削深度、铣削宽度、每齿进给量、主轴转速对零件加工表面粗糙度的影响规律,为新材料和新工艺的推广应用提供了一定依据。

## 1 真空吸附系统设计与开发

铝锂合金薄板材厚度只有 2.2mm,质量轻,刚性差,在机械铣削加工过程中,容易发生加工变形,从而影响零件的加工精度和加工质量。引起加工变形的影响因素很多,其中之一就是工件的装夹变形。对于这种弱刚性薄板件,传统的铣床夹具已不再适用。沈则亮<sup>[11]</sup>介绍了一种通用性较强的真空吸附铣削夹具,该夹具采用真空吸附的方法,使零件受到均匀分布的夹紧力,有效提高了零

<sup>\*</sup> 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(SAMC12-JS-15-008)资助。

件的加工质量与生产效率。

基于上述思想,结合实际情况,自主设计了一种如图1所示的真空吸附系统。该系统由真空平台、底座、橡胶密封条、管路、过滤器、真空泵、定位块等部分组成,核心部分是真空平台和底座,其结构示意图分别如图2和图3所示。真空平台和底座都是由铝合金6061-T6加工而成,尺寸大约为500mm×300mm×30mm;真空平台整体形状为倒凹字形,底座整体形状为凸字形,便于两者之间的对正安装。使用时,真空平台置于底座之上,两者之间用沉头螺栓连接,用橡胶密封条密封。真空平台顶面是一系列纵横交叉的密封槽,槽与槽之间是一个个凸台,这样设计的目的是为了保证真空平台的顶面与零件能有较多的接触面积,起到更好的支撑作用,减小零件的刚性变形。零件与真空平台之间也是用橡胶密封条密封,橡胶密封条分布在密封槽里。真空平台上面还分布着一些气孔,利用真空泵对该系统进行抽气时,板料与真空平台之间的气体从气孔流出,沿底座上的“几”字形气流通道不断地被抽走,从而在系统内部形成一个低于大气压力的气体状态,利用其与大气环境之间的压力差,将放置于平台上的薄板零件紧密、均匀地吸附。再利用压板或其他



图1 真空吸附系统  
Fig.1 Vacuum adsorption system

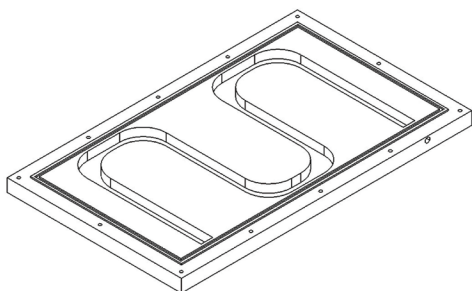


图2 真空平台结构示意图  
Fig.2 Structural diagram of vacuum platform

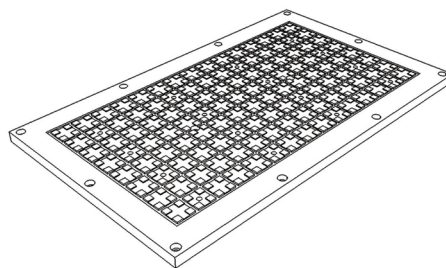


图3 底座结构示意图  
Fig.3 Structural diagram of base

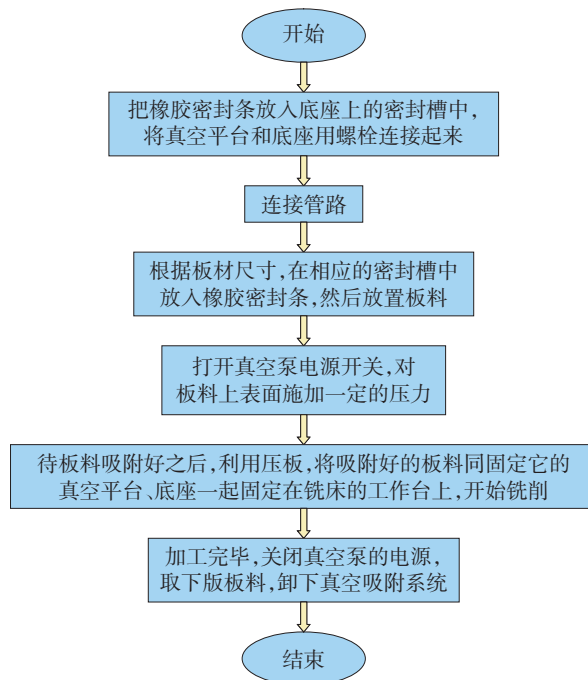
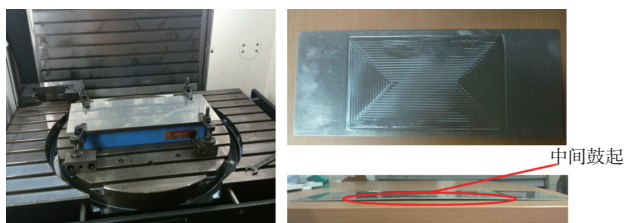


图4 真空吸附系统使用流程图  
Fig.4 Flow chart of vacuum adsorption system application

方式,将吸附好的零件同整个真空吸附平台一同固定在铣床的工作台上,然后进行铣削加工。真空吸附系统的使用流程如图4所示。

## 2 真空吸附系统实用性验证试验

图5所示为在数控铣床上,采用传统铣床夹具装夹



(a) 传统铣床夹具与试件 (b) 加工后的试件

图5 传统铣床夹具试验与加工出的试件  
Fig.5 Experiment using traditional milling fixture and test sheet after machining

试件及加工完成后的试件。试件是中间带槽的平板件,材料是 2024T3,厚度为 2mm,槽深度 0.6mm。可看出,试件中间部位发生了鼓起现象,且加工深度不均匀,铣削表面质量非常差,边缘毛刺严重。这是因为分散的夹紧力使试件中间部分产生了挠曲,导致加工过程中产生颤振。

图 6 所示为在数控机床上,采用设计的真空吸附系统进行的铣削试验及加工完成后的试件。试件材料是 2060T8,厚度为 2.2mm,槽深 0.6mm。加工完成后,采用超声波测厚仪 PX-7DL,沿图 6 中所示的测量点位置对 16 个槽底部进行板料厚度的测量。槽底部的理论板料厚度应为 1.6mm,从测量结果可以发现最外一圈的槽深度普遍偏大。这是由于在靠近试件边缘处,试件与真空平台之间的密封橡皮条并没有完全被压进密封槽里,板料四周边缘处于翘起的状态,而对刀时又是以板料中间比较低的区域为基准。除此之外,其他区域的厚度公差



图6 真空吸附系统试验与加工出的试件

Fig.6 Experiment using vacuum adsorption system and test sheet after machining

均在  $\pm 0.1\text{mm}$  以内。

试验结果证明:所设计开发的真空吸附系统具有较好的实用性,零件的加工精度和加工质量较传统铣床夹具有了明显的改善。

### 3 铣削参数对表面粗糙度的影响

基于自主设计开发的真空吸附系统,通过正交铣削试验,研究了铣削加工参数,包括铣削深度、铣削宽度、每齿进给量、主轴转速对零件加工表面粗糙度的影响。

#### 3.1 试验过程

试验机床为北京精雕科技有限公司生产的睿雕系列 Carver S400。X/Y/Z 轴的工作行程是  $400\text{mm}\times 400\text{mm}\times 260\text{mm}$ ,主轴转速  $2000\sim 28000\text{r}/\text{min}$ ,最高切削进给速度  $6\text{m}/\text{min}$ ;刀具为钨钢圆鼻刀,刀具直径  $d=12\text{mm}$ ,4 齿,螺旋角  $35^\circ$ ,圆角半径  $R=2\text{mm}$ ;铣削方式为内环铣削。试验材料为 2060T8,厚度为 2.2mm,槽深度为 0.6mm,试件形状如图 6 所示。

正交试验设计是通过安排多因素试验寻求最优水平组合的一种高效率试验设计方法。包含 4 个因素(铣削深度  $a_p$ 、铣削宽度  $a_w$ 、每齿进给量  $f_z$ 、主轴转速  $n$ ),每个因

表1 正交试验方案

试验编号	铣削深度 $a_p/\text{mm}$	铣削宽度 $a_w/\text{mm}$	每齿进给量 $f_z/(\text{mm}\cdot z^{-1})$	主轴转速 $n/(\text{r}\cdot \text{min}^{-1})$
1	0.1	1	0.01	4000
2	0.1	2	0.025	6000
3	0.1	4	0.05	8000
4	0.1	6	0.1	10000
5	0.2	1	0.025	8000
6	0.2	2	0.01	10000
7	0.2	4	0.1	4000
8	0.2	6	0.05	6000
9	0.3	1	0.05	10000
10	0.3	2	0.1	8000
11	0.3	4	0.01	6000
12	0.3	6	0.025	4000
13	0.6	1	0.1	6000
14	0.6	2	0.05	4000
15	0.6	4	0.025	10000
16	0.6	6	0.01	8000

素取 4 个水平,因此根据正交试验表  $L_{16}(4^4)$  设计如下正交试验方案,如表 1 所示。每组试验对应一个槽,总共 16 个槽,因此需要两块试件。

#### 3.2 试验结果及分析

##### 3.2.1 表面粗糙度测量结果

表面粗糙度的测量采用英国泰勒公司的便携式粗糙度仪 surtronic N25,测量点选择每个槽的底面和四壁中间区域共 5 个位置,采样长度为 12.5mm,测量结果如表 2 所示。

##### 3.2.2 表面粗糙度的极差统计

正交试验极差分析法是一种直观分析法,简单直观,计算量小。采用极差分析法得到的统计分析结果如表 3 所示。

可以得出如下结论:影响表面粗糙度的因素主次关系是:铣削深度 > 每齿进给量 > 铣削宽度 > 主轴转速,即对表面粗糙度影响最大的因素是铣削深度,其次是每齿进给量,然后是铣削宽度,最后是主轴转速。

##### 3.2.3 单个铣削参数对表面粗糙度的影响规律

根据表 3 做出单个铣削参数对表面粗糙度的影响直观分析图,如图 7~10 所示。

如图 7 所示,随着铣削深度的增加,表面粗糙度呈现增大的趋势。这是因为:一方面,随着铣削深度的增加,铣削力增大,刀具与切屑及工件之间的挤压和摩擦增大,

表2 表面粗糙度测量结果  $\mu\text{m}$ 

试验编号	槽壁粗糙度值				槽底粗糙度值	槽壁平均值
1	0.4	0.4	0.6	0.4	0.4	0.45
2	0.4	0.8	0.4	0.4	0.2	0.50
3	3.0	3.0	2.2	3.2	0.8	2.85
4	4.2	4	5.2	5.6	2.0	4.75
5	3.4	4.2	2.6	2.8	0.6	3.25
6	2.4	3.6	3.2	2.2	0.6	2.85
7	1.8	1.6	2.4	2.4	2.6	2.05
8	2.8	1.2	2.4	2.0	2.2	2.10
9	2.4	3	3.4	4.8	0.8	3.40
10	3.2	1.8	3.2	2.6	2.2	2.70
11	1.0	0.6	1.4	0.8	0.4	0.95
12	0.6	0.6	1.0	0.8	0.4	0.75
13	7.0	7.8	10.4	4.4	3.6	7.40
14	6.2	7.2	8.0	4.8	3.8	6.55
15	1.6	4.6	2.2	2.8	1.4	2.80
16	3.0	3.2	2.0	3.2	1.6	2.85

表3 极差统计分析结果

因素	铣削深度 $a_p/\text{mm}$	铣削宽度 $a_w/\text{mm}$	每齿进给量 $f_z/(\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	主轴转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
水平1	2.14	3.63	1.78	2.45
水平2	2.56	3.15	1.83	2.74
水平3	1.95	2.16	3.73	2.91
水平4	4.90	2.61	4.23	3.45
极差	2.95	1.47	2.45	1.00

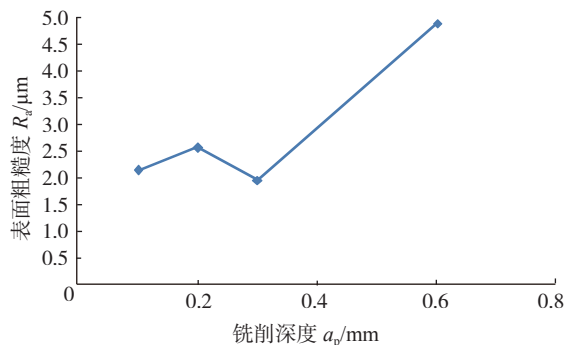


图7 铣削深度对表面粗糙度的影响

Fig.7 Effect of milling depth on surface roughness

材料的塑性变形增大,从而使表面粗糙度增大,同时挤压和摩擦促进了积屑瘤的形成和长大,积屑瘤层积在切削

刃上,部分积屑瘤碎屑还会嵌入工件表面,严重影响工件的表面粗糙度;另一方面,铣削深度越大,加工过程中越容易产生振动,从而影响加工的表面粗糙度。

如图8所示,随着铣削宽度的增加,表面粗糙度先减小,当铣削宽度增加到一定数值时,表面粗糙度增大。这是因为当铣削宽度增加时,切削温度增加,温度的增加一定程度上可以抑制积屑瘤的产生,而当铣削宽度增加到一定程度时,铣削力的增加将占主导地位。但总体来看,铣削宽度对表面粗糙度影响较小。

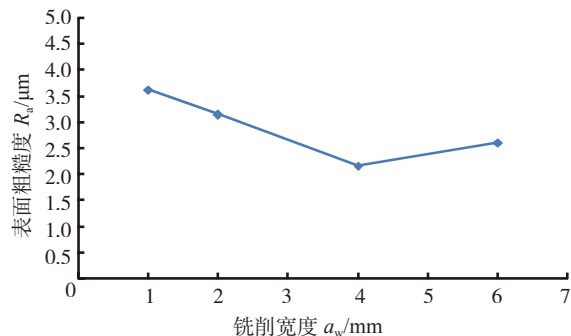


图8 铣削宽度对表面粗糙度的影响

Fig.8 Effect of milling width on surface roughness

如图9所示,随着每齿进给量的增加,表面粗糙度增大。原因是铣削加工属于多齿断续切削,断续切削可产生周期性振动,从而使已加工表面出现条痕或波纹痕迹,增加表面粗糙度。每齿进给量越大,这种周期性振动越明显。另一方面,每齿进给量越大,工件加工表面的切削层残留面积越大,表面粗糙度越大。

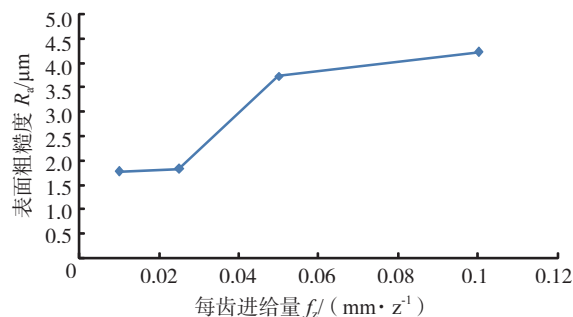


图9 每齿进给量对表面粗糙度的影响

Fig.9 Effect of feed rate per tooth on surface roughness

如图10所示,随着主轴转速的增加,表面粗糙度增大。这是因为本文所选的主轴转速较低,在低速范围内时,随着切削速度的提高,积屑瘤的高度增加,表面粗糙度增加。但是总体来看,主轴转速对表面粗糙度影响最小,可以忽略。

## 4 结论

(1) 本文设计开发的真空吸附系统具有较好的实用

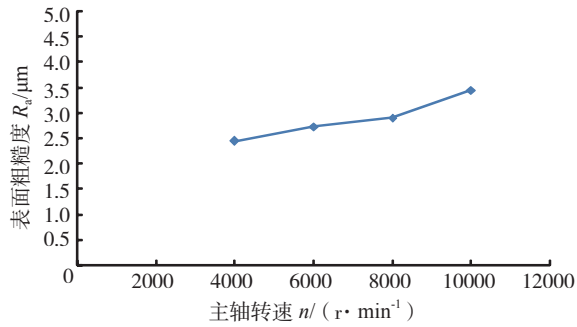


图10 主轴转速对表面粗糙度的影响

Fig.10 Effect of spindle speed on surface roughness

性,与传统铣床夹具相比,零件的加工精度和加工质量有了明显的提高。

(2)影响表面粗糙度的因素主次关系是:铣削深度 > 每齿进给量 > 铣削宽度 > 主轴转速,其中铣削宽度、主轴转速对表面粗糙度的影响可以忽略。

(3)随着铣削深度、每齿进给量、主轴转速的增加,表面粗糙度增大;随着铣削宽度的增加,表面粗糙度减小,当铣削宽度增加到一定数值时,表面粗糙度增大。

### 参考文献

[1] 陈建. 铝锂合金的性能特点及其在飞机中的应用研究. 民用飞机设计与研究, 2010(1):39-41.

[2] 毛大恒, 韩德夫, 周亚军, 等. 2197 铝锂合金的化学铣切工艺. 机械工程材料, 2011(5):77-79.

[3] 毛大恒, 张灿, 周亚军, 等. 2197 铝锂合金化学铣切工艺的探讨. 材料保护, 2010(10): 33-35.

[4] 易慧芝, 邓飞跃, 张忠亭. 2197 铝锂合金化学铣切工艺研究. 表面技术, 2010(4): 73-76.

[5] 刘维伟, 李锋, 姚倡锋, 等. GH4169 高速铣削参数对表面粗糙度影响研究. 航空制造技术, 2012(12): 87-90.

[6] 姚倡锋, 武导侠, 靳淇超, 等. TB6 钛合金高速铣削表面粗糙度与表面形貌研究. 航空制造技术, 2012(21): 90-93.

[7] Ammula S C, Guo Y B, Barkey M E. A finite element analysis based compliance method coupled with wet etching to determine residual stress in high speed milling//American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, MED. Orlando, FL, United states: 2005:1257-1265.

[8] Guo Y B, Ammula S C, Barkey M E. A wet etching method coupled with finite element analysis-based compliance function to determine residual stress in high-speed milling. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 2006,128(3): 792-801.

[9] Tang Z T, Liu Z Q, Wan Y, et al. Study on residual stresses in milling aluminium alloy 7050-T7451. Advanced Design and Manufacture to Gain a Competitive Edge: New Manufacturing Techniques and their Role in Improving Enterprise Performance, 2008:169-178.

[10] Ammula S C. Surface Integrity of Al 7050-T7451 and Al 6061-T651 Induced By High Speed Milling. SAE Document, 2005-01-3346.

[11] 沈则亮. 真空吸附铣削夹具的设计及其应用. 机床与液压, 2011,39(16):43-44.

(责编 谷雨)

(上接第 45 页)

(5)组件翻转及安装芯轴轴向定位。将组件翻转前将装配车上安装芯轴并调整好位置后进行轴向定位,保证分解装配工艺机匣时的轴向径向位置;(6)换装前平衡工艺机匣。前平衡工艺机匣为平衡以及轴、径向定心用的多用途机匣,与芯轴及后平衡工艺机匣组合用;(7)换装后平衡工艺机匣。换装后平衡工艺机匣并将后支点工艺轴承装配至相应位置,组件完成平衡工装的装配;(8)吊装翻转并进行组件平衡。将组件装配用翻转吊具吊装至平衡机上,并用传动轴连接驱动;(9)组件分解。组件按装配方式分解完成至前后装配工艺机匣定位状态;(10)组件分解及其他装配。采用多功能装配车,撤去芯轴以及外部承力支架,装配止口定位环后为单元体组件装配机构,车架中心更换为另外一组轴径向定位芯棒;(11)完成单元体装配。最终以组件状态完成单元体装配,组件装配车也为组件运输车。

该设计方案采用装配定位、定心以及平衡定位、定心工装,并将相关的装配运输车多功能集成,最终以单元体完整状态交付,为下一工序做好吊装运输准备。

### 4 结论

该装配平衡技术基于大涵道比涡扇发动机风扇/增压级组件结构特点,依托装配、平衡技术基础,提出装配平衡一体化的设计理念,形成无轴颈转子带静子机匣动平衡的技术创新点,技术难度大,其主要技术特点为:(1)采用垂直装配技术结合双向装配方案;设计了多功能芯轴结合框架式平衡工艺技术方案,突破了无轴颈风扇/增压级转静子单元体装配平衡的技术关键;采用辅助机匣结合静子机匣的联合设计方式解决了框架式平衡的技术难题。(2)多功能芯轴、双套前后工艺机匣及用途装配车技术方案满足了装配、平衡、翻转及运输时转静子定位、定心要求,使装配平衡实现合理衔接。

该项工艺技术成熟,可广泛应用于该类型的风扇/增压级组件动平衡工艺中,对进一步提高国内装配平衡技术能力提供技术经验,并为将来进一步拓展和应用提供技术依据。

### 参考文献

[1] 韩志斌. 动平衡转子的分类及其应用. 上海汽轮机, 2000(9):38-39.

[2] 哈托·施奈德. 平衡技术理论与实践. 达姆斯塔特: 机械工业出版社, 1981:53-60.

[3] 于文怀, 宋宝玉, 高鸽, 等. 装配试车技术. 北京: 科学出版社, 2002:81-8.

[4] 陈炳贻. 航空发动机平衡技术发展. 推进技术, 1998,1(4):105-109.

(责编 一帆)