钛合金叶片数控抛光试验

黄艳松[1]，龙永胜[2]，刘泓利[1]
1．海军装备部驻武汉地区军事代表局　湖北武汉　430006
2．中国航发南方工业有限公司　湖南株洲　412002

摘要：以航空发动机叶片抛光为例进行技术分析，通过TC4钛合金材料试件及叶片的数控砂带抛光试验，研究了工艺参数对试件表面质量以及叶片表面加工硬化、金相组织、残余应力和疲劳性能的影响，验证了抛光工艺参数对零件表面质量完整性的影响，为数控砂带抛光技术的工程应用提供了理论基础。

关键词：航空发动机；钛合金；叶片；数控砂带抛光；表面质量；完整性

1　序言

叶片是航空发动机的核心零件，叶片质量的好坏直接影响发动机的性能和寿命。叶片抛光是提高叶片工作寿命、疲劳强度和气动性能的重要方法，但抛光加工难度大、问题多，其中钛合金叶片在抛光过程中，废料容易粘附和填充在砂粒之间，造成砂带材料去除率降低，磨抛温度提高[1]，引起抛光后表面质量差、容易烧伤等问题[2]。抛光工艺对钛合金叶片表面变质层内的加工硬化、残余应力及金相组织变化等表面质量完整性[3]和疲劳性能也有直接影响[4]。随着钛合金叶片的广泛应用，其对表面抛光技术提出了越来越高的要求[5，6]。某型航空发动机采用了TC4钛合金压气机工作叶片、整流叶片，叶型加工采取数控铣削+手工抛光的方法，存在加工效率低、尺寸精度保证难度大等问题，影响交付进度和产品质量。本文通过对TC4钛合金材料试件、典型叶片开展数控砂带抛光试验和产品试制加工，研究了抛光参数对表面粗糙度、表面纹理、金相、硬度及残余应力的影响规律，为数控砂带抛光在航空发动机TC4钛合金叶片的工程应用提供技术支撑。

2　钛合金试件及叶片数控砂带抛光试验条件

2.1　试件状态及试验条件

用于数控砂带抛光参数评估的TC4钛合金试件尺寸为100mm×50mm×4mm。根据GJB 2505A—2008《航空用钛及钛合金板材和带材规范》推荐的热处理参数，试样经820℃加热，保温0.5h并于炉外空冷，形成符合航空发动机叶片制造的退火态组织。在数控砂带磨床上，分别选用碳化硅砂带和尼龙砂带按照规划的工艺组合开展参数试验，砂带宽度10mm。为避免抛光废料堆积，加工过程使用摩特3135水基切削液对加工区域进行冲洗。

2.2　叶片状态及试验过程

选取100件TC4材料的叶型较复杂的压气机第4级工作叶片，在数控铣削后开展数控砂带抛光试制。该叶片由叶身、榫头组成，属于典型的燕尾型榫头叶片，尺寸为60mm×40mm，叶身采用五轴数控机床精铣至表面粗糙度值Ra=3.2μm左右，抛光留余量0.02～0.05mm。设备采用2MGY5530型数控砂带磨床，砂带采用240目的碳化硅砂带、400目的蓝色尼龙带，分别开展叶身型面粗抛和精抛[7]，砂带如图1所示。抛光走刀轨迹如图2所示，采用沿积叠轴方向往复走刀方式，从叶尖处进刀，砂带加工叶身走刀至叶根R部位附近，由砂带侧面去除叶根R部位刀纹。根据前述参数试验分析结果，结合该叶片叶型特点，制定抛光工艺参数、编制数控程序开展试制，粗抛和精抛工艺参数分别见表1。试制过程中，240目碳化硅砂带每加工3～4件更换一次砂带，400目蓝色尼龙带每加工3～5件更换一次砂带。




a）240目碳化硅砂带　　b）400目蓝色尼龙带

图1　数控砂带磨床的抛光砂带

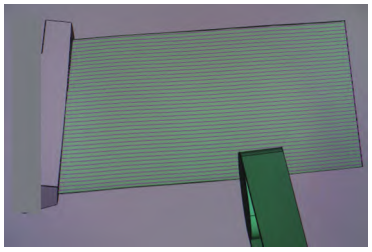


图2　抛光走刀轨迹示意

表1　加工工艺参数

工序	主轴转速/（r/min）	预压量（换算成设备Z轴值）/ mm	进给速度/（mm/min）	刀轨数量/趟
粗抛	1200	−5	1000	40
精抛	1500	−5	400	40

2.3　测试方法与仪器

试件经磨抛加工后，分别开展以下测试，用于分析各组工艺对加工效果的影响。①使用Mahr M300表面粗糙度测量仪，开展垂直于磨抛纹路的表面粗糙度测量，测量评估长度l_t=4mm，截止波长λ_f=0.8mm。②使用Olympus BX53M显微镜对磨削后试件局部表面的形貌及剖面金相进行观测。③使用HVS-1000Z维氏硬度计，在HV0.3的条件下，对磨削后叶片表面及芯部硬度进行测量。④使用Proto iXRD残余应力分析仪，在V靶测量磨削后试件表面的残余应力。

3　抛光参数对试件表面粗糙度的影响

3.1　单个参数对加工效果的影响

基于单因素试验法，在试件上分别对数控砂带抛光线速度、进给速度、预压量和步距开展抛光试验，以验证主要抛光参数对表面粗糙度的影响规律。再采用单一变量试验法，分别开展线速度、进给速度、预压量和步距等抛光参数对表面粗糙度的检测及影响分析，具体抛光参数和相应表面粗糙度测量值见表2～表5。

表2　线速度单值变量及表面粗糙度测量结果

线速度v_s/（m/s）	进给速度v_f/（m/min）	步距/mm	磨头预压量/mm	表面粗糙度值Ra/μm
2.5	1	2	0.05	1.170
5.0	1	2	0.05	1.090
7.5	1	2	0.05	1.019
10.0	1	2	0.05	0.720
12.5	1	2	0.05	0.630
15.0	1	2	0.05	0.612
17.5	1	2	0.05	0.617
20.0	1	2	0.05	0.623

表3　进给速度单值变量及表面粗糙度测量结果

线速度v_s/（m/s）	进给速度v_f/（m/min）	步距/mm	磨头预压量/mm	表面粗糙度值Ra/μm
7	0.6	2	0.1	0.890
7	1.3	2	0.1	0.904
7	2.0	2	0.1	0.898
7	2.6	2	0.1	0.921
7	3.3	2	0.1	0.956
7	4.0	2	0.1	0.998
7	4.6	2	0.1	1.168
7	5.3	2	0.1	1.174

表4　预压量单值变量及表面粗糙度测量结果

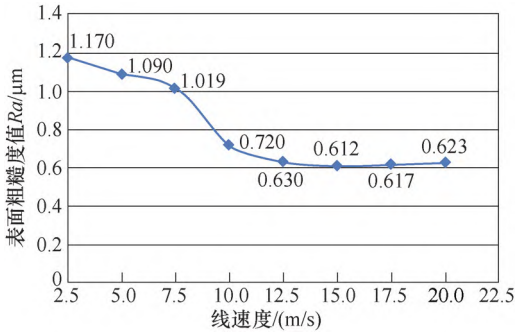
线速度v_s/（m/s）	进给速度v_f/（m/min）	步距/mm	磨头预压量/mm	表面粗糙度值Ra/μm
7	1	2	0.05	1.028
7	1	2	0.10	0.902
7	1	2	0.15	0.860
7	1	2	0.20	0.867
7	1	2	0.25	0.876

表5　步距单值变量及表面粗糙度测量结果

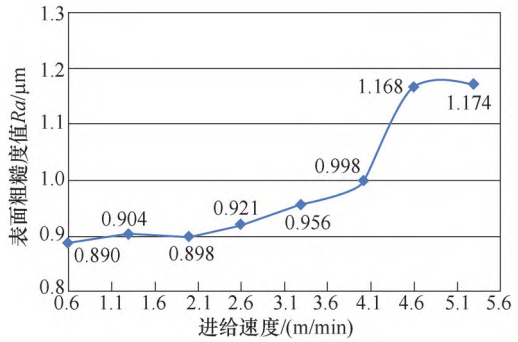
线速度v_s/（m/s）	进给速度v_f/（m/min）	步距/mm	磨头预压量/mm	表面粗糙度值Ra/μm
7	1	0.5	0.1	0.513
7	1	1.0	0.1	0.427
7	1	1.5	0.1	0.421
7	1	2.0	0.1	0.394
7	1	2.5	0.1	0.250

根据试验结果，统计分析形成的砂带抛光参数对表面粗糙度的影响规律曲线如图3所示。由图3a可知，表面粗糙度值Ra随着砂带线速度的增加而不断降低，但在线速度达到12m/s后，Ra趋于稳定，线速度增加未对表面粗糙度产生很大的影响。由图3b

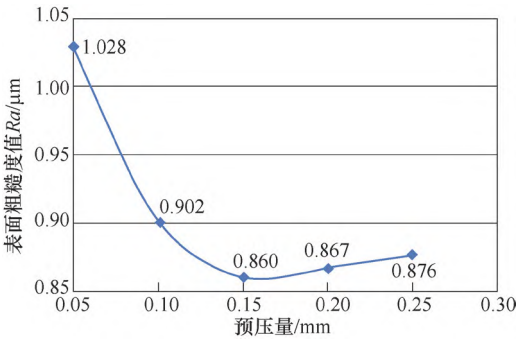
可知，*Ra*随着砂带进给速度的增加而不断升高。由图3c可知，*Ra*随着磨头预压量的增大而降低，但在预压量达到0.15mm之后，*Ra*随着磨头预压量的增大而升高。由图3d可知，*Ra*随着砂带步距的增加而不断降低。



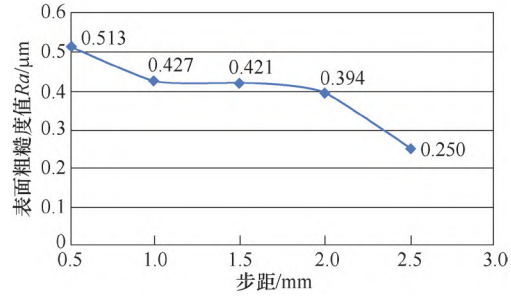
a）线速度对表面粗糙度的影响曲线



b）进给速度对表面粗糙度的影响曲线



c）预压量对表面粗糙度的影响曲线



d）步距对表面粗糙度的影响曲线

图3　砂带抛光参数对表面粗糙度的影响规律

因选取的参数是离散化数值，故存在一定的差异性，综合加工质量和效率分析认为，后期工程应用的参数选择范围为：线速度9m/s以上；在保证效率的情况下，精抛尽量选择较低进给速度；磨头预压量取0.10～0.20mm；步距取1.0～3.0mm。同时，须注意各参数的耦合作用，如当选择较大砂带线速度、较低进给速度和一定预压量时，加工后表面质量不一定好；又如在磨削压力一定的情况下，选择较小的线速度、进给速度，也可得到较小的表面粗糙度值。

3.2　抛光参数对表面粗糙度及残余应力影响的主次分析

为进一步验证步距、线速度、进给速度和预压量等抛光参数对加工后零件表面粗糙度、残余应力的影响程度，综合上述试验结果，制定四因素三水平的正交试验方案见表6。

表6　四因素三水平正交试验方案

编号	步距/mm	砂带线速度/(m/s)	进给速度/(mm/s)	预压量/mm
1	1	11	1	0.05
2	1	13	4	0.10
3	1	15	2	0.15
4	2	11	4	0.15
5	2	13	2	0.05
6	2	15	1	0.10
7	3	11	2	0.10
8	3	13	1	0.15
9	3	15	4	0.05

按表6规定的抛光参数，分别采用400目的碳化硅砂带抛光至表面粗糙度值*Ra*=0.4μm，随后再采用800目的尼龙带精抛光至表面粗糙度值*Ra*=0.2μm，各组正交试验结果数据统计分别见表7、表8，其中表面粗糙度和残余应力数值为在检测试件上相同位置所得。采用极差法分别对数据进行分析，结果如图4所示，其中因素极差值（*R*值）的大小反映了各因素对于试验结果的影响程度大小。

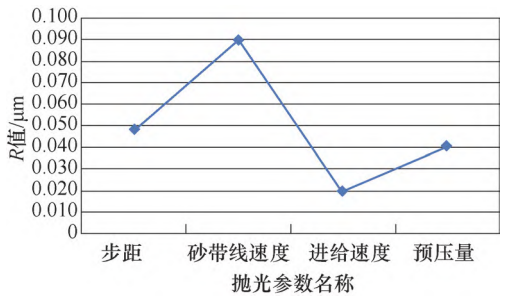
由图4a、图4b分析可知，TC4钛合金试件数控砂带抛光至表面粗糙度值*Ra*为0.2～0.4μm时，影响表面粗糙度的主次参数顺序为砂带线速度、步距、预压量和进给速度，影响表面残余应力的主次参数顺序为砂带线速度、进给速度、预压量和步距。

表7　砂带抛光至表面粗糙度值*Ra*=0.4μm的正交试验结果

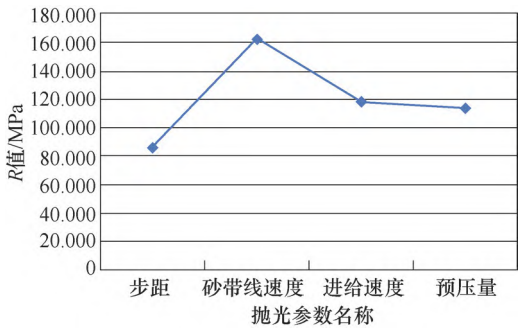
编号	步距/mm	砂带线速度/（m/s）	进给速度/（mm/s）	预压量/mm	试验后实测表面粗糙度值*Ra*/μm	残余应力/MPa
1	1	11	1	0.05	0.219	−185.26
2	1	13	4	0.10	0.338	−190.36
3	1	15	2	0.15	0.319	−140.85
4	2	11	4	0.15	0.239	−150.11
5	2	13	2	0.05	0.307	−131.16
6	2	15	1	0.10	0.302	−87.80
7	3	11	2	0.10	0.220	−453.82
8	3	13	1	0.15	0.300	−97.93
9	3	15	4	0.05	0.211	−75.58

表8　尼龙带抛光至表面粗糙度值*Ra*=0.2μm的正交试验结果

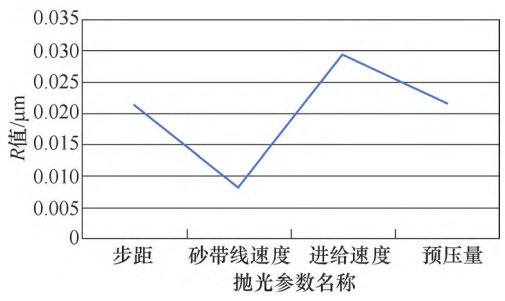
编号	步距/mm	砂带线速度/（m/s）	进给速度/（mm/s）	预压量/mm	试验后实测表面粗糙度值*Ra*/μm	残余应力/MPa
1	1	11	1	0.05	0.152	−202.45
2	1	13	4	0.10	0.161	−186.66
3	1	15	2	0.15	0.160	−202.80
4	2	11	4	0.15	0.197	−190.01
5	2	13	2	0.05	0.180	−134.37
6	2	15	1	0.10	0.160	−184.02
7	3	11	2	0.10	0.138	−184.63
8	3	13	1	0.15	0.150	−173.68
9	3	15	4	0.05	0.192	−176.02



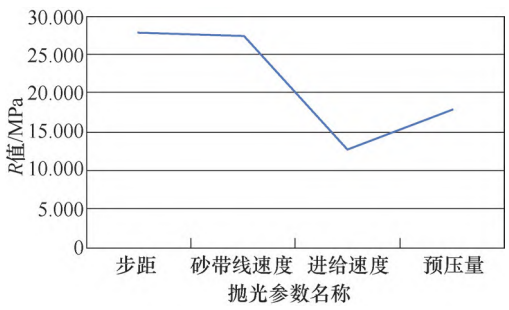
a）各参数对*Ra*=0.4μm表面的表面粗糙度的影响权重示意



b）各参数对*Ra*=0.4μm表面的残余应力的影响权重示意



c）各参数对*Ra*=0.2μm表面的表面粗糙度的影响权重示意



d）各参数对*Ra*=0.2μm表面的残余应力的影响权重示意

图4　极差法分析结果

由图4c、图4d分析可知，TC4钛合金试件数控砂带抛光至表面粗糙度值Ra≤0.2μm时，影响表面粗糙度的主次参数顺序为进给速度、预压量、步距和砂带线速度，影响表面残余应力的主次参数顺序为步距、砂带线速度、预压量和进给速度。可见，当数控砂带抛光到不同的表面状态时，各参数对TC4钛合金试件表面粗糙度及残余应力的影响权重不尽相同。此外，即使抛光到相同的表面状态时，各参数对表面粗糙度和残余应力的影响权重也不相同。

4　钛合金叶片数控砂带抛光效果

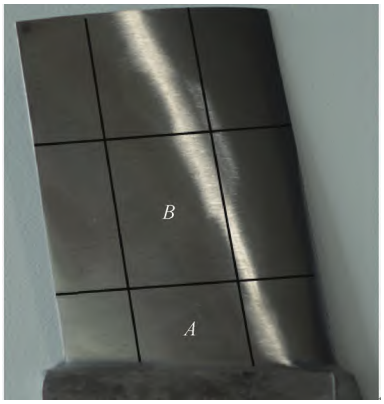
试制后，产品按现行检验规程进行外观、尺寸、频率及烧伤等检查，结果均满足设计图样规定。经统计计算表明，采用数控砂带抛光的生产效率较手工抛光综合提高10%左右，劳动强度大幅下降，且叶型尺寸、产品质量及频率一致性好。为进一步评估数控砂带抛光对产品质量的影响，增加了以下对比检测分析。

4.1　表面粗糙度对比

随机抽取1件数控砂带抛光、1件手工抛光的该叶片，测量叶背、叶盆中间位置的表面粗糙度。数控砂带抛光的叶片测量结果为叶背表面粗糙度值Ra=0.33μm、叶盆表面粗糙度值Ra=0.27μm，手工抛光的叶片测量结果为叶背表面粗糙度值Ra=0.45μm、叶盆表面粗糙度值Ra=0.40μm，均满足图样规定的表面粗糙度值Ra＜0.8μm的要求。

4.2　表面纹理对比

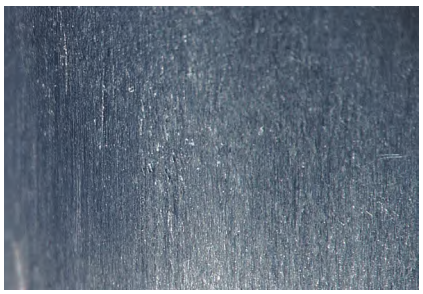
随机抽取1件数控砂带抛光、1件手工抛光的该叶片进行表面纹理检测，结果如图5所示。在观察范围内，数控砂带抛光的沟槽大部分是完整的，不存在断续情况；而手工打磨的叶片在观测范围内，条纹存在打断情况。另外，数控砂带抛光与手工抛光形成的都是沿着积叠轴方向的纵向纹理，纵向纹理相较于横向纹理更有益于提高叶片疲劳寿命。



a）叶片纹理检测区域示意



b）手工抛光（*A*区域）



c）手工抛光（*B*区域）



d）数控抛光（*A*区域）

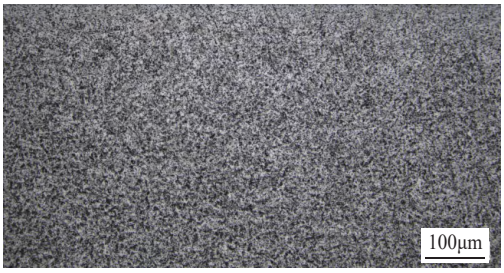


e）数控抛光（*B*区域）

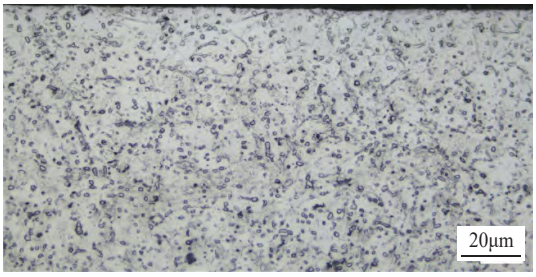
图5　表面纹理检测结果

4.3　金相、硬度对比

随机抽取数控砂带抛光、手工抛光的该叶片各1件进行理化试验，叶片剖面金相组织如图6、图7所示。对比两种方案加工的叶片剖面，可发现表层组织均未出现塑性流动现象，表明表层组织依旧维持原有退火状态。在0.3kgf（1kgf≈9.8N）作用下测量叶片表面及芯部硬度，检测结果见表9。数据显示表面硬度、芯部硬度相当，均符合设计图样要求。由此

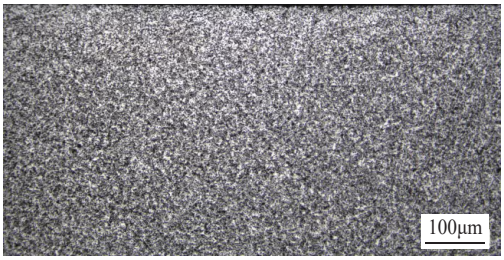


a）手工抛光叶身表面金相1

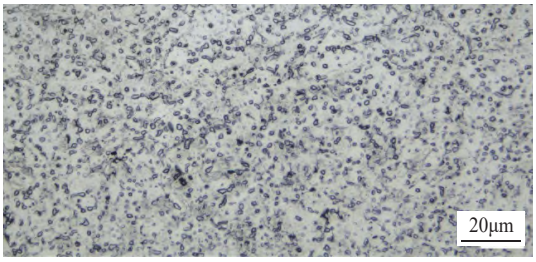


b）手工抛光叶身表面金相2

图6　手工抛光叶片叶身表面金相组织



a）数控砂带抛光叶身表面金相1



b）数控砂带抛光叶身表面金相2

图7　数控砂带抛光叶片叶身表面金相组织

表9　叶片表面及芯部硬度检测结果

距表面位置/mm		0.05	0.15	0.25	0.35	0.45	芯部硬度
手工加工	叶背面硬度HV	222	230	228	230	220	231、226、228
	叶盆面硬度HV	228	224	231	230	227	
数控加工	叶背面硬度HV	221	231	223	231	228	230、230、225
	叶盆面硬度HV	220	230	222	226	226	

表明，数控砂带抛光工艺参数对产品组织无影响。

4.4　残余应力对比

选取数控砂带抛光、手工抛光的叶片各5件进行应力测试对比试验，选取叶片的叶盆、叶背各4个点（见图8）进行测量。

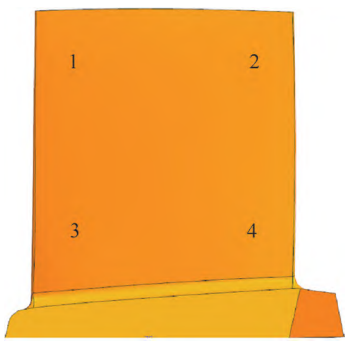


图8　应力点位置示意（叶背面对应位置为5、6、7和8）

对数控砂带抛光及手工抛光叶片零件各随机抽取5件，对其叶盆、叶背各4点处的残余应力进行测量，结果如图9所示。

由图9可以看出，数控砂带抛光及手工抛光残余应力类型都为对疲劳寿命有益的压应力，且同一位置点的压应力值在一定范围内波动，压应力能使疲劳裂纹扩展速率降低，零件疲劳服役寿命增加。

5　结束语

本文针对钛合金叶片数控砂带抛光过程中产生的切屑易粘附、填充于砂带砂粒空隙引发的表面质量差及烧伤等问题，进行技术革新和工艺试验，采用单因素试验法研究了工艺参数对表面粗糙度的影响规律，采用正交试验法研究了工艺参数对表面粗糙度、残余应力的主次影响关系，获得了可指导生

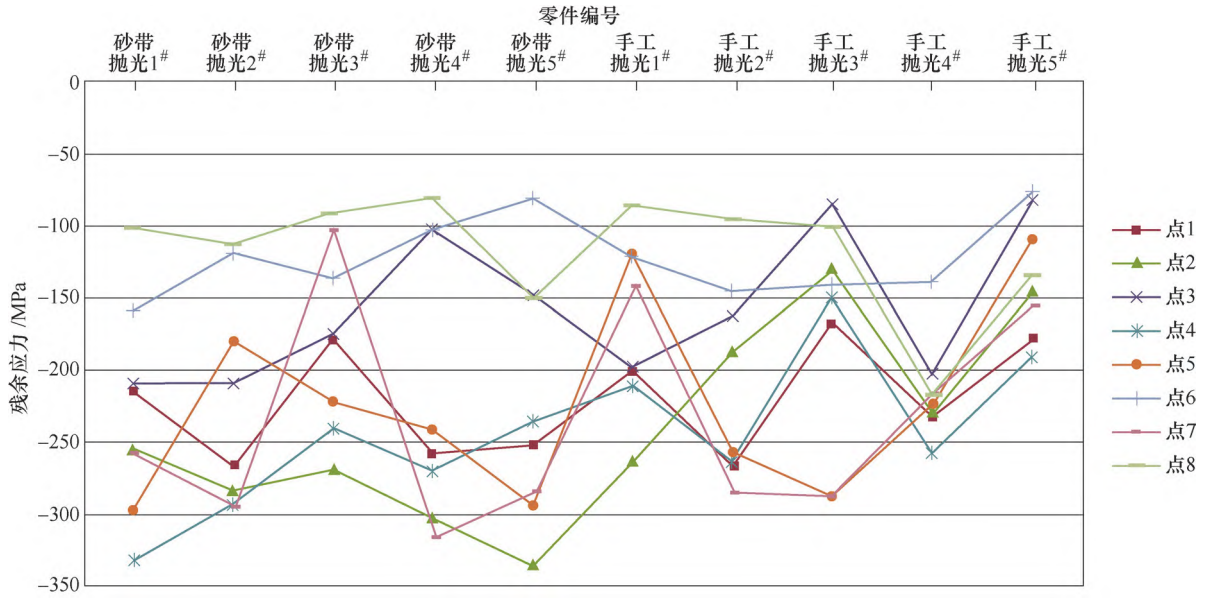


图9　数控砂带抛光与手工抛光零件叶盆叶背8点处的残余应力测量结果

产工艺参数编制的经验数据。通过复杂型面的TC4钛合金叶片试制验证表明，数控砂带抛光能有效提升产品质量和生产效率，解决了手工抛光劳动强度大、粉尘污染重和产品质量一致性差等问题，在航空发动机叶片表面抛光中具有很好的技术优势和应用前景。

参考文献：

[1] 胥军，卢文壮，王晗，等. TC4-DT钛合金磨削表面特性及其摩擦磨损性能[J]. 航空学报，2014（2）：567-573.

[2] 徐鸿钧，傅玉灿，孙方宏，等. 高效磨削时弧区热作用机理与强化弧区换热的基础研究[J].中国科学（E辑），2002（3）：296-307.

[3] 刘伟，邓朝晖，黄宇岑. TC4钛合金高速外圆磨削表面完整性实验[J]. 宇航材料工艺，2017（4）：66-70.

[4] 黄云，李少川，肖贵坚，等. 航空发动机叶片材料及抗疲劳磨削技术现状[J]. 航空材料学报， 2021（4）：17-35.

[5] 毛洋洋，赵欢，韩世博，等. 面向复杂曲面的机器人砂带磨抛路径规划及后处理研究[J]. 机电工程，2017（8）：829-834.

[6] 陈巍，严思杰，张家军，等. 叶片机器人砂带磨抛点云匹配算法优化[J]. 机电工程，2014（6）：711-715.

[7] 罗戈山，邹莱，黄云，等. 氧化铝空心球砂带磨削钛合金的材料去除及表面质量研究[J]. 中国机械工程，2020（19）：2363-2370.

MW 20240822

专家点评



文章的亮点是数控砂带抛光技术在钛合金叶片加工中的应用。通过试验过程获得所需的实践经验和理论数据，并采用单因素试验法和正交试验法，进一步验证了各项抛光工艺参数对表面粗糙度的影响规律和主次顺序，提高了抛光效率和叶片表面精度，为数控砂带抛光技术的应用提供了技术支撑，具有很好的工艺革新和生产指导作用。