

# 涡轮盘模锻质量稳定性分析

张权明, 白周建

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 利用质量管理中常用的分析工具和分析技术——工序能力指数和直方图两种方法对涡轮盘模锻过程进行了分析。两种分析结果一致表明: 常温检测项目  $A_k$  和 800℃ 高温检测项目  $\delta_s$ 、 $\psi$  的工序能力不足, 应该从模锻工序过程采取措施提高 800℃ 高温  $\delta_s$ 、 $\psi$  数据, 同时控制常温检测项目  $A_k$  的波动范围。结合材料的理论组织变化探讨了模锻环节应注意的问题, 工艺改进效果明显。

**关键词:** 涡轮盘; 工序能力指数; 直方图

中图分类号: V434.211

文献标识码: B

文章编号: (2009) 04-0044-05

## Analysis on quality stability of turbine disk die forging process

Zhang Quanming, Bai Zhoujian

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Die forging process of turbine disk was analyzed by means of process capability index and histogram which are commonly used in quality management. The results indicated that the process capabilities of  $A_k$  at room temperature and  $\delta_s$  and  $\psi$  at 800℃ were inadequate. Measures were taken during the process to improve  $\delta_s$  and  $\psi$  values at 800℃ and narrow down the standard deviation range of  $A_k$  at room temperature. The paper also discussed microstructure changes of the material and notable problems during die forging process. Remarkable improvement was observed in the process.

**Key words:** turbine disk; process capability index; histogram

收稿日期: 2009-03-04; 修回日期: 2009-07-23。

作者简介: 张权明 (1970—), 男, 高级工程师, 博士生, 研究领域为液体火箭发动机用金属和陶瓷材料。

0 引言

火箭发动机上的涡轮盘由某高温合金材料生产加工而成, 加工工艺经历了由自由锻造到模锻的生产工艺转变过程, 相比较而言, 模锻件产品的力学性能稳定、组织均匀性较好, 整体质量优于自由锻件。模锻工艺控制环节多, 质量影响因素复杂。通过对产品力学性能检测数据的分析, 对生产过程的质量稳定性进行了评价, 以期找到影响质量稳定性的因素。

1 试验数据来源及分析方法

选取产品检测力学性能数据共计 50 组, 通过计算工序能力指数对产品的模锻工序能力进行评价; 通过直方图, 直观掌握影响质量波动的相关信息; 通过对材料微观组织的理论分析, 为工艺改进提供理论依据。

2 计算及讨论

2.1 工序能力指数计算

在制造业中, 过程能力称为工序能力, 是指工序中人 (操作者)、机 (设备)、料 (原材料)、法 (操作方法及规范)、测 (检验和测量)、环 (工作环境) (5M1E) 诸因素均处于规定的条件下, 操作呈稳定状态时所具有的质量水平, 即过程处于稳定状态下的实际加工能力。工程管理中常用过程 (工序) 能力指数来表示过程 (工序) 能力满足公差范围要求的程度。是公差范围与过程 (工序) 能力的比值, 用  $C_p$  表示。

$$C_p = \frac{T}{6\sigma} \approx \frac{T}{6s}$$

(1)

式中,  $T$  为公差范围;  $\sigma$  为总体标准偏差;  $s$  为样本标准偏差。

一般以过程 (工序) 能力指数评定过程 (工序) 等级, 以便有重点、有主次地采取不同措施加以管理和控制, 工序能力等级评定级别见表 1。

表 1 工序能力等级评定表

Tab.1 Process capability grading table

范 围	等 级	判 断
$C_p > 1.67$	特级	工序能力过高
$1.67 \geq C_p > 1.33$	1 级	工序能力充分
$1.33 \geq C_p > 1$	2 级	工序能力尚可
$1 \geq C_p \geq 0.67$	3 级	工序能力不充分
$0.67 > C_p$	4 级	工序能力不足

对 50 组数据中各检测项目分别进行工序能力指数计算, 确定工序能力等级, 对工序过程进行判断, 计算结果分别见表 2 和表 3。

表 2 涡轮盘常温检测项目工序能力等级评定表

Tab.2 Process capability grading table of parameters tested at room temperature

检测项目	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_s$ /(%)	$\psi$ (%)	$A_k$ /J
标准值	1275	1035	12	15	39
平均值	1374.43	1231.31	19.36	40.03	54.16
标准偏差	41.56	52.59	2.09	3.36	8.96
$C_{pk}$	0.80	1.24	1.17	2.49	0.56
等级	3	2	2	特级	4
判断	能力不充分	能力尚可	能力尚可	能力过高	能力不足

表 3 涡轮盘 800℃检测项目工序能力等级评定表

Tab.3 Process capability grading table of parameters tested at 800℃

检测项目	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_s$ /(%)	$\psi$ /(%)
标准值	540	440	15	25
平均值	720.03	632.29	26.65	54.90
标准偏差	33.78	58.28	9.13	18.60
$C_{pk}$	1.78	1.10	0.43	0.54
等级	特级	2	4	4
判断	能力过高	能力尚可	能力不足	能力不足

以上均为材料的力学性能检测指标，其中， $\sigma_b$  和  $\sigma_{0.2}$  分别为材料的抗拉强度和屈服强度，表示材料抵抗破坏的能力。 $\delta_5$  和  $\psi$  分别为材料的延伸率和断面收缩率，表示材料的塑性性能。 $A_k$  为冲击韧性，表示材料的韧性性能。

从表 2 和表 3 的计算结果可以看出，常温检测项目  $A_k$  和 800℃高温检测项目  $\delta_5$ 、 $\psi$  的工序能力指数等级均为 4 级，工序能力不足。从工序能力指数的定义可以看出主要原因在于：一，标准偏差太大，相当于测试结果的散差范围太宽，对于常温检测项目  $A_k$  而言，其标准偏差范围 3 等于 27J，远大于下限公差范围 15.2J；二，单向公差的下限公差较小，样本的均值较低，800℃高温检测项目  $\delta_5$ 、 $\psi$  中个别批次的检测数据甚至低于下限标准要求。当然，在质量控制方面也应当从以上两方面采取措施予以控制，即减小标准偏差，增大公差范围。在生产过程中应加强对以上三个项目的关注，工艺改进以提高这三项指标为重点。

总体分析，共九项检测项目中有五项的工序能力指数等级高于 2 级，也就是说有大约 56% 的指标处于质量控制之中，其他的则处于质量控制的边缘，需要进行重点改进和监控。

2.2 直方图

直方图也是质量分析常用的分析方法，可以显示质量波动分布的状态，较直观地传递有关过程质量状况的信息，当研究了直方图表示的质量数据波动状况之后，就能掌握过程的状况，从而确定在什么地方进行质量改进工作。

将 50 组数据分成 5 组，分别计算数据的频数，最后绘成直方图。部分检测项目的直方图见图 1~图 6。

从直方图可以看出，常温检测项目  $\sigma_b$ 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\delta_5$ 、 $\psi$ 、 $A_k$  和 800℃高温检测项目  $\sigma_b$ 、 $\sigma_{0.2}$  七项指标均属于偏向型直方图，这种形状主要是由于单向公差要求引起的，单向公差下限即为标准要求值，这几种形状对于下限单向公差来说，属于正常图形，只不过各自的标准偏差变化不同。同各自的均值相比较，常温检测项目  $A_k$  的标准偏差占到均值的 17%，误差范围太大；其他六项标准

偏差占到均值的 10% 以下。800℃检测项目  $\delta_5$ 、 $\psi$  属于异常直方图，不仅存在双峰形状，而且存在低于下限标准要求的峰值（图 5、6 中左边的第一条直方图数值均低于标准要求）。

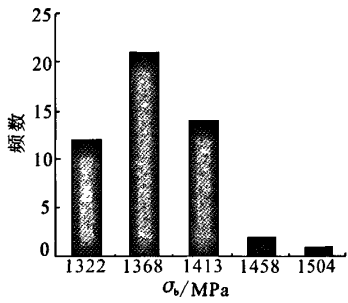


图 1 常温  $\sigma_b$  直方图

Fig.1  $\sigma_b$  histogram at room temperature

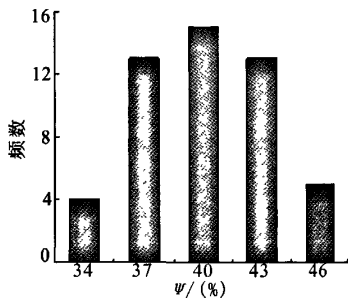


图 2 常温  $\psi$  直方图

Fig.2  $\psi$  histogram at room temperature

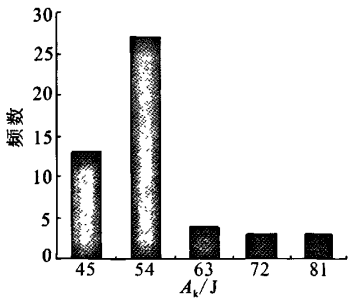
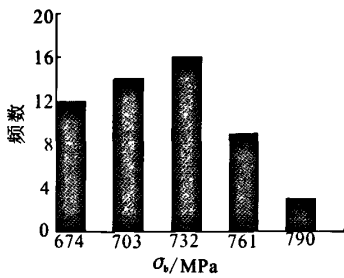
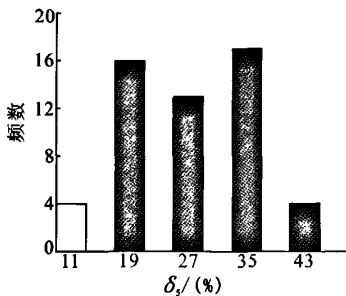
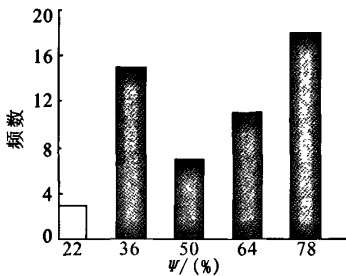


图 3 常温  $A_k$  直方图

Fig.3  $A_k$  histogram at room temperature

图4 高温 800°C  $\sigma_b$  直方图Fig.4  $\sigma_b$  histogram at 800°C图5 高温 800°C  $\delta_5$  直方图Fig.5  $\delta_5$  histogram at 800°C图6 高温 800°C  $\psi$  直方图Fig.6  $\psi$  histogram at 800°C

因此,从直方图显示出的结果来看,800°C高温检测项目 $\delta_5$ 、 $\psi$ 属于需要特别采取措施控制的项目,应该从模锻工序过程采取措施提高800°C高温 $\delta_5$ 、 $\psi$ 数据,同时应兼顾控制 $A_k$ 的标准偏差范围。

以上直方图分析结果与工序能力指数计算得到的分析结果完全一致。

### 2.3 材料理论分析及工艺改进建议

涡轮盘用高温合金属于Ni-Cr-Fe基时效硬化型合金,其成分特点是含Nb量较高,达5%,含较多的Cr和Fe,含少量Al、Ti以形成 $\gamma'$ 和 $\gamma''$ 相,在合金中起主要强化作用。

零件最终的使用状态为固溶、时效、固溶处理的目的是得到均匀的过饱和固溶体,控制一定的晶粒度。时效的目的是均匀地析出 $\gamma'$ 和 $\gamma''$ 强化相。热处理后组织中含有 $\gamma'$ 、 $\gamma''$ 、 $\delta$ 相以及NbC、TiN等相。 $\delta$ 相一般在晶界和晶内析出。 $\delta$ 相在合金中不起强化作用,从消耗了沉淀强化元素Nb来看,存在过多的 $\delta$ 相对合金是不利的,特别是密集成堆的魏氏状态。 $\delta$ 相会降低室温塑性及冲击韧性,但是在晶界析出适量 $\delta$ 相有利于改善合金的高温塑性,消除缺口敏感。 $\delta$ 相溶解温度约为1000°C,析出峰约为920°C。采取950°C固溶可以使晶界获得适量的 $\delta$ 相析出,以利合金的高温塑性;但应避免 $\delta$ 相过量析出,以利合金室温塑性、冲击韧性。热处理的720°C/8小时时效析出强化相最多,主要析出 $\gamma''$ 强化相,其强化效果比 $\gamma'$ 强,它是形成该合金高强度的主要强化相。

从工艺过程分析,影响组织以及力学性能指标的主要原因是模锻工艺过程变形不均匀引起的,针对以上原因,采取了相应的改进和控制措施。主要包括:对制坯及模锻时的变形量进行分析和计算,减小模锻过程的打击力、打击能量、打击锤数,以避免第一和第二锤的变形过大;增加欠压板来控制调整模锻件各变形区域金属的流动和变形量;进一步控制加热温度、保温时间、转移及操作时间、打击力(打击能量)、打击次数、终锻温度等工艺参数。

采取以上工艺控制措施后生产的产品零件检测结果表明,材料的微观组织均匀性较好,析出相适量,力学性能检测项目满足技术标准要求,检测结果证明工艺改进措施效果明显。

## 3 结论

利用工序能力指数和直方图两种方法对涡轮盘模锻过程进行了分析。分析结果表明:应该从

模锻工序过程采取措施提高 800℃高温  $\delta_s$ 、 $\psi$  数据，同时控制常温检测项目  $A_k$  的波动范围。探讨了模锻环节应注意的问题，工艺改进效果明显。

参考文献：

[1] 中国质量协会 编著. 全面质量管理基本知识（第一版）  
[M]. 中国经济出版社. 2002, 4.

(编辑：王建喜)

(上接第 37 页)

3 结论

- (1) 现有液膜流量下，推力室最大壁温处于材料许用温度范围之内。
- (2) 计算得到壁温沿轴向分布以及液膜长度与地面热试车红外测量结果基本一致。

参考文献：

[1] Glenn L A, McFarland B L. Advanced Experimental Thrust Chamber Program (Phase I and II), Final Report [R]. Rocketdyne, Canoga Park, California. Report No. R06857, December 1966.

[2] 邢文英. QC 小组基础教程 [M]. 北京：原子能出版社，1998.

[3] 冶军. 美国镍基高温合金[M]. 北京：科学出版社，1978.

[4] 高温合金金相图谱 编写组. 高温合金金相图谱[M]. 北京：冶金工业出版社，1979.

[5] 锻件质量分析 编写组. 锻件质量分析 [M]. 北京：机械工业出版社，1983.

[2] Bartz D R. A Simple Equation for Rapid Estimation of Rocket Nozzle Convective Heat Transfer Coefficients [J]. ARS Journal, Jan 1957: 49-51.

[3] Stechman R C. Film Cooling Design Criteria For Small Rocket Engines[R]. AIAA 68-617.

[4] Ko Shaoyen, Liu Dengying. Experimental Investigations on Effectiveness, Heat Transfer Coefficient and Turbulence of Film Cooling[J]. AIAA Journal, 18(8).

[5] Grisson W M. Liquid Film Cooling in Rocket Engines[R]. AD-A234 288.

[6] 刘国球. 液体火箭发动机原理[M]. 北京：中国宇航出版社，1993.

[7] 方磊，刘伟. 姿控用再生冷却推力室传热特性研究[J]. 火箭推进，2008，34(6)：6-13.

(编辑：陈红霞)