

高温合金压气机盘锻件纵断面中铌分布的原位统计分布分析表征

王海舟, 李美玲, 庄景云

(钢铁研究总院, 北京 100081)

[摘要] 采用原位统计分布分析表征技术系统研究了 GH169 高温合金压气机盘纵断面不同部位铌分布的规律。以所得到的与样品原位置相对应的数以万计原始信号系统解析为基础, 进而获得压气机盘锻件的纵断面不同部位铌的定量统计分布信息以及加工工艺过程中铌的迁移规律。准确计算判定了盘纵断面不同部位铌的最大偏析度, 提出了 95 % 置信度时中位值置信扩展率, 即统计偏析度 (S) 新参数, 用以表征铌在压气机盘中分布的均匀度; 提出了所有数据在特定含量区间 ($C_0 \pm R$) 的频度 (权重) 比率, 即统计符合度 (F) 新参数, 用以表征预设质量控制区间铌含量的一致性的概率。采用原位统计分布分析的表征方法, 准确定量地评定了高温合金压气机盘件纵断面不同部位铌的分布均匀度和符合度, 为加工后盘件的质量控制评估提供了参考。

[关键词] 原位统计分布分析表征技术; 高温合金压气机盘; 铌; 统计偏析度; 统计符合度; 质量控制
[中图分类号] TG115 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)10-0019-09

1 前言

原位统计分布分析表征技术 (original position statistic distribution analysis, OPA) 是金属材料研究及质量判据的一项新技术^[1~4]。它不同于现有的宏观分析技术 (平均含量测定) 及微观组织结构分析技术, 以测量信息的原始性、原位性及统计性为特征, 反映了金属材料较大尺度范围内化学组成及组织形态的定量统计分布规律^[5]。采用该项技术可以得到金属材料中化学组成的位置分布统计信息、定量分布信息以及状态分布等一系列材料特性表征的新信息^[6~10]。铌分布的均匀性对 GH169 高温合金压气机盘的性能有很大的影响, 质量控制要求铌分布的波动范围控制在 $\pm 0.1\%$ 之内。文章采用原位统计分布分析表征技术, 研究了 GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面的加工工艺过程中铌的迁移及分布规律, 按质量预设目标区间评价了质量符合一

致性的概率, 为盘件质量控制评估提供了参考。

2 实验部分

2.1 仪器装置

OPA-100 型金属原位分析仪: 钢铁研究总院研制。

2.2 实验方法

2.2.1 试样制备

待测 GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面用铣床加工出一个平面, 然后用适当的砂纸磨出新鲜面, 也可以直接使用经过酸洗的样品表面。

2.2.2 扫描方式

试样扫描方式为线性面扫描, 沿 X 轴方向连续扫描, 扫描速度为 1 mm/s ; Y 轴方向为步进方式, 间隔为 4 mm 。

2.2.3 实验参数

选择金属原位分析仪实验参数如下: 激发频率:

[收稿日期] 2011-08-15

[作者简介] 王海舟 (1940—), 男, 福建福州市人, 教授, 研究方向为冶金材料统计表征及冶金过程控制分析;

E-mail: hzwangnacs@yahoo.com.cn

480 Hz;激发电容:7.0 μ F;激发电阻:6.0 Ω ;火花间隙:2.0 mm;氩气纯度:99.999%;氩气流量:80 mL/s;电极材料:45°顶角纯钨电极,直径3 mm;扫描速度:1 mm/s;充气时间:15 s;Nb 通道:319.5 nm;Fe 参比通道:271.4 nm。

2.2.4 扫描部位及范围

如图1所示,将GH169高温合金压气机盘锻件纵断面按如下5个部位:下模冷模影响区与幅板(1#)、篦齿与幅板过渡区(2#)、篦齿(3#)、轮毂与试样环(4#)以及锻件中心部位(5#)分别进行原位统计分布分析,扫描区尺寸见表1。

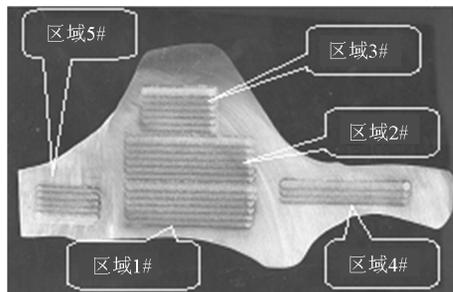


图1 GH169高温合金压气机盘纵断面扫描范围

Fig.1 Five scanned areas on the vertical section of GH169 superalloy compressor disk

表1 压气机盘纵断面扫描区域

Table 1 Scanned area's sizes in the vertical section of superalloy compressor disk

区域	部位	扫描尺寸/(mm × mm)
1#	下模冷模影响区与幅板	80 × 20
2#	篦齿与幅板过渡区	80 × 20
3#	篦齿	45 × 20
4#	轮毂与试样环	80 × 8
5#	锻件中心	40 × 16

3 实验结果和讨论

3.1 压气机盘纵断面不同部位铌的分布

采用原位统计分布分析表征技术对GH169高温合金压气机盘锻件的5个部位分别进行原位统计分布分析比较。通过对无预燃、连续扫描激发的火花放电所产生的铌单次放电信号进行高速的数据采集和解析,在试样每一扫描区内,可以得到相应的数以万计铌的单次放电信号。这些信号与试样纵断面扫描区内的不同位置相对应,同时每一信号的强度反映了该位置铌元素的原始状态,对这些信号的系统解析,进而获得被测盘件中铌定量统计分布信息。

通过该技术得到GH169高温合金压气机盘锻

件纵断面不同部位铌含量分布,其三维视图(见图2(a))直观地表征了铌元素在扫描区域内分布趋势的差异。

图2(b)是GH169高温合金压气机盘锻件纵断面铌分布的二维等高图,它可以定量表征铌含量在盘件中不同区域内的分布,也可以对盘件中不同区域间铌分布的差异性进行比较。区域1#系压气机盘锻件下模冷模影响区与幅板部位,在该区的左下部($X \approx 0 \sim 20, Y \approx 0 \sim 4$)为富集区,铌含量 $\geq 5.20\%$;区域5#系压气机盘锻件中心部位,在该区的中部($X \approx 11 \sim 27, Y \approx 8 \sim 18$)为富集区,铌含量 $\geq 5.20\%$ 。

铌含量的二维等高图及三维视图均清晰地表征了在加工工艺过程中铌向1#下模冷模影响区与幅板部位及5#锻件中心部位迁移的趋势。

3.2 压气机盘纵断面不同部位铌的最大偏析

常规的铸坯中心偏析的测定方法是采用定点取样,然后进行相应的化学分析,根据不同点得到的化学成分,其最高含量(C_{max})与平均含量(C_0)的比值(C_{max}/C_0)视为最高偏析度。显然,这种方法无法准确判定最大偏析的位置,因此结果的再现性及重复性均很差。即使采集到了中心偏析的点,也还会因为采样点过大而影响分析结果的准确性,因此,其判定结果的准确性和重现性均不理想。

采用原位统计分布表征技术,根据不同压气机盘纵断面不同部位铌元素含量分布的二维等高图,可以得到压气机盘纵断面上任意指定位置(坐标, X, Y)铌的含量,因此可以十分准确地判定含量最高(或最低)点(μ m尺度)的位置坐标(X, Y)及准确含量(C_{max});同时从数以万计的数据中可以更准确地得到其含量的中位值或平均值(C_0);从而十分准确地得到最大偏析点(X, Y)的偏析度:

$$P_{X,Y} = C_{max}/C_0$$

也可以根据要求计算出以最高偏析点为中心的最大偏析区(例如,1 mm × 1 mm 或 $\phi 1$ mm)内的平均含量(C_{max}^A),其与全部结果的中位值(C_0)或平均值(C_A)的比值用以表征最大偏析度,即:

$$P_A = C_{max}^A/C_A$$

表2列出了GH169高温合金压气机盘纵断面不同部位铌分布最大偏析点的准确坐标(X, Y)位置及其最大偏析度的准确数值。在盘件1#区中,铌的最大偏析点位置坐标位于(8.27, 0.00),其最大偏析度为1.125;在盘件2#区中,铌的最大偏析点坐标位于(79.73, 0.007),其最大偏析度为1.028;在盘

件 3#区中, 铌的最大偏析点坐标位于(2.40,4.00), 其最大偏析度为 1.030; 在盘件 4#区中, 铌的最大偏析点坐标位于(76.00,0.03), 其最大偏析度为

1.021; 在盘件中心 5#区中, 铌的最大偏析点坐标位于(16.80,11.95), 其最大偏析度为 1.085。

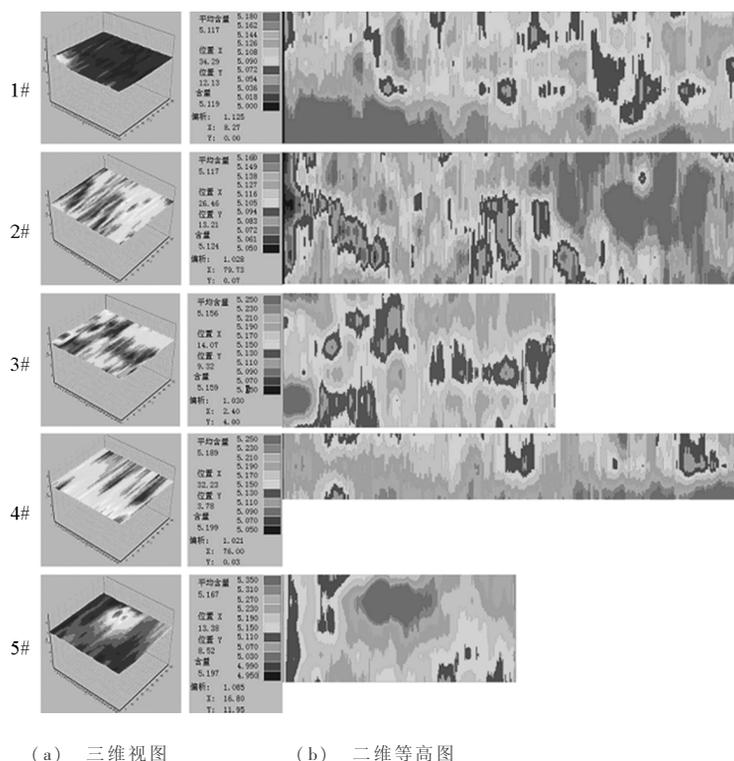


图 2 GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面铌含量分布图

Fig. 2 Distribution maps of niobium content on the vertical section of superalloy compressor disk

显然, GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面的下模冷模影响区与幅板部位(1#区域)和盘件中心部位(5#区域)的铌的最大偏析度较高, 在 1.08 以上; 篦齿与幅板过渡区、篦齿以及轮毂与试样环等其他部位的最大偏析度较低, 小于 1.03。

表 2 GH169 高温合金压气机盘纵断面中的最大偏析

Table 2 Maximum segregation degree of niobium on the vertical section of GH169 superalloy compressor disk

区域号	解析结果		
	Nb 平均含量/%	最大偏析点位置 (X, Y)	最大偏析度 P_A
1#	5.117	(8.27, 0.07)	1.125
2#	5.117	(79.73, 0.007)	1.028
3#	5.156	(2.40, 4.00)	1.030
4#	5.189	(76.00, 0.03)	1.021
5#	5.167	(16.80, 11.95)	1.085

3.3 压气机盘纵断面上指定线段的成分变化

GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面不同部

位通过其最高偏析点 X 轴及 Y 轴方向指定线段的铌含量变化趋势如图 3 所示。GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面的下模冷模影响区与幅板部位(1#区域)和锻件中心部位(5#区域)通过其最大偏析点的铌含量的波动较大; 2#篦齿与幅板过渡区、3#篦齿以及 4#轮毂与试样环等其他部位铌含量的波动较小。

3.4 GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面各原位置铌元素不同含量的频度统计分布

3.4.1 铌各原位置不同含量频度统计分布的峰形分析

对整个压气机盘锻件纵断面各部位(1~5#区域)统计结果的综合解析结果见图 4 和表 3。由于可以同时得到压气机盘纵断面数以万计次放电信号, 这些信号与盘件表面不同位置相对应, 同时每一信号的强度反映了该位置原始状态的铌的信息, 可以计算出不同铌含量所占的权重比率(频度)统计分布。由与各原位置相对应的在压气机盘锻件纵断

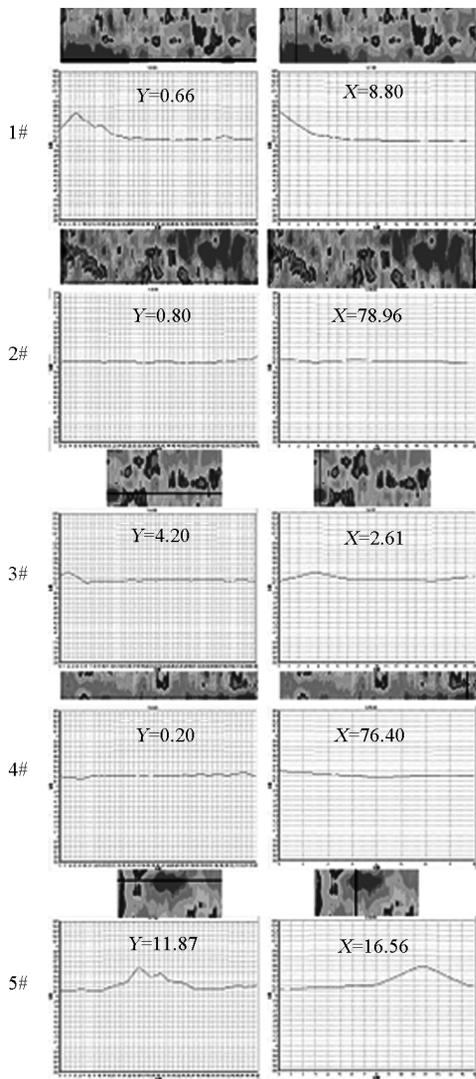


图3 压气机盘纵断面上指定线段的含量的变化

Fig. 3 Variations of niobium content along the specified line-segment on the vertical section of compressor disk

面中不同含量铌所占的比率,可以定量表征压气机盘锻件铌元素的均匀性。从不同含量所占权重比率分布图的峰形可直观地评价元素分布的均匀性。

在整个 GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面上,铌含量频度(权重比率)统计分布图的峰形较窄;铌含量分布为 4.992%~5.640%,其极差为 0.648%。可以直观地判断在整个压气机盘锻

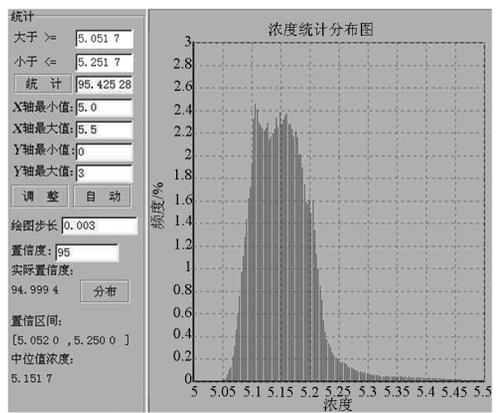


图4 GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面各原位置元素含量的频度统计分布

Fig. 4 Content-frequency distribution of niobium at corresponding original position on the vertical section of compressor disk

件纵断面上铌元素的含量频度分布较为集中,即表示铌元素在压气机盘锻件中的分布比较均匀。

3.4.2 盘件中铌分布的统计偏析度

对各原位置成分含量的权重比率统计分布进一步解析,可以得到所占权重比率特定置信度的含量置信区间(C_1-C_2)的95%置信度中位值(C_0)置信扩展幅度 $[Z=(C_2-C_1)/2]$,即95%置信度时涵盖的含量范围为 $(C_0 \pm Z)$ 。中位值(C_0)置信扩展区间(Z)与中位值(C_0)的比率——中位值置信扩展率($S=Z/C_0$)可用于表征材料中铌元素的偏析,称之为统计偏析度。当某元素含量相同时,含量置信区间越小,表明该元素在材料中的分布越均匀。考虑到试样中元素含量的差异的影响,采用中位值置信扩展率(S)作为某元素在材料中的偏析度的表征更为合理。统计偏析度(S)越小,表明该元素在材料中的分布越均匀。

表3列出了整个 GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面范围内频度(权重比率)分布的解析结果。由表3可见,加工前,95%置信度时,铌的含量置信区间为 5.052%~5.250%,其中位值为 5.152%,中位值扩展率即统计偏析度为 1.96%。说明铌元素在整个 GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面范围内总体来说具有较好的均匀性。

表3 GH169 高温合金压气机盘纵断面各原位置铌元素含量的
频度(权重比率)统计分布解析

Table 3 Analysis of frequency distribution of niobium content at corresponding original position
on the vertical section of GH169 superalloy compressor disk

项目	解析结果/%	
	加工前	加工后
含量分布范围	4.992 ~ 5.640	5.040 ~ 5.322
含量极差	0.648	0.322
95 % 置信度含量置信区间	5.052 ~ 5.250	5.116 ~ 5.206
含量置信区间幅宽($C_2 - C_1$)	0.198	0.090
中位值置信扩展幅度(Z)	0.099	0.045 2
中位值(C_0)	5.152	5.158
统计偏析度(中位值置信扩展率, S)	1.96	0.877
质量控制指定范围	5.052 ~ 5.252	5.058 ~ 5.258
统计符合度(质量控制指定范围权重比率, H)	95.43	99.53

3.4.3 盘件中铌分布质量控制限区间的统计符合度

对各原位置成分含量的频度比率统计分布进行解析,可得到某元素特定含量区间(如质量控制限区间范围内)所占的权重比率(%) (或称出现频度),用以定量表征其符合性,称之为统计符合度。统计符合度越大,表明在此材料中该元素分布的均匀性好,与预设质量控制目标具有较好的一致性。

如表3所示,在整个高温合金压气机盘件纵断面上,铌含量的中位值为5.152%;铌含量在质量控制指定含量区间(5.152 ± 0.100)%范围内所占频度比率,即统计符合度为95.43%。说明铌在整个GH169高温合金压气机盘纵断面范围内与质量控制要求基本符合。

3.5 GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面不同部位各原位置铌含量的频度统计分布

3.5.1 各部位频度统计分布的峰形分析

对GH169高温合金压气机盘锻件纵断面不同部位的铌元素含量分别进行频度(权重比率)统计分布解析。其结果如图5及表4所示,GH169高温合金压气机盘纵断面的篦齿与幅板过渡部位(2#区

域):铌元素含量分布在5.040% ~ 5.273%,铌含量极差为0.233%;篦齿部位(3#区域):铌元素含量分布在5.084% ~ 5.322%,铌含量极差为0.238%;轮毂与试样环部位(4#区域):铌元素含量分布在5.121% ~ 5.310%,铌含量极差为0.189%。上述3个区域中铌元素的含量权重比率统计分布图其峰形较窄,铌含量极差较小,均小于0.25%,说明这三个区域中铌元素的含量权重比率分布较为集中,即表示铌元素在压气机盘锻件的上述区域中分布比较均匀。

但其下模冷模影响区与幅板部位(1#区域):铌元素含量分布在4.992% ~ 5.796%,铌含量极差为0.804%;中心部位(5#区域):铌元素含量分布在5.026% ~ 5.640%,铌含量极差为0.614%。上述两个区域铌元素的含量权重比率(频度)统计分布图的峰形相对较宽,呈非对称性,铌含量极差较大,均大于0.6%,说明在这两个区域内铌元素的含量分布较其他区域分散,即表示在压气机盘的上述区域中,特别是中心部位,铌元素的分布相对比较不均匀。

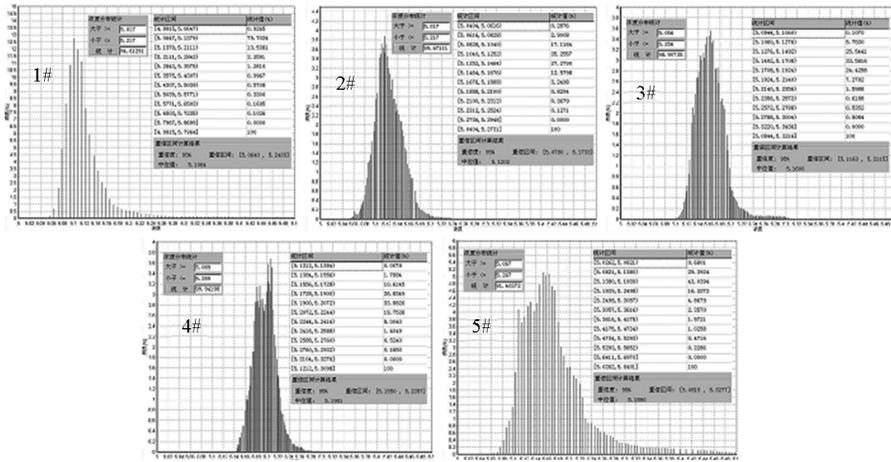


图5 GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面不同部位铌含量的频度(权重比率)统计分布
 Fig. 5 Frequency distributions of niobium content in different regions of vertical section of GH169 superalloy compressor disk

表4 压气机盘锻件纵断面不同部位铌含量分布范围

Table 4 Intervals of niobium content in different regions of superalloy compressor disk

元素	项目	解析结果				
		1#	2#	3#	4#	5#
Nb	铌含量分布范围/%	4.992 ~ 5.796	5.040 ~ 5.273	5.084 ~ 5.322	5.121 ~ 5.310	5.026 ~ 5.640
	铌含量极差/%	0.804	0.233	0.238	0.189	0.614

3.5.2 盘件各部位铌分布的统计偏析度

如表5及图5所示,GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面的1#区域;95%置信度时铌分布的统计偏析度(S)为1.756%;2#区域;95%置信度时铌分布的统计偏析度(S)为0.931%;3#区域;95%置

信度时分布的统计偏析度(S)为0.922%;4#区域;95%置信度时分布的统计偏析度(S)为0.792%;5#区域;95%置信度时分布的统计偏析度为(S)为2.386%。

表5 不同部位95%置信度时铌分布的统计偏析度

Table 5 Statistic segregation degree of different regions at 95% of confidence degree

元素	项目	解析结果				
		1#	2#	3#	4#	5#
Nb	95% 频度含量置信区间(C_1, C_2)/%	5.064 0, 5.243 3	5.078 0, 5.173 3	5.116 3, 5.211 0	5.155 0, 5.235 7	5.081 5, 5.327 7
	含量置信区间幅宽($C_2 - C_1$)/%	0.179 3	0.095 3	0.095 2	0.080 7	0.246 2
	中位值置信扩展幅度(Z)/%	0.089 65	0.047 65	0.047 6	0.040 35	0.123 1
	中位值(C_0)/%	5.106	5.120	5.160	5.195	5.159
	统计偏析度(中位值置信扩展率S)/%	1.756	0.931	0.922	0.792	2.386

显然,GH169 高温合金压气机盘锻件纵断面的原位统计分布解析结果表明:盘件的2#篦齿与幅板过渡区、3#篦齿与轮毂与4#试样环等部位,95%置信度时铌元素分布的统计偏析度(S)较低,均小于

1%,说明在压气机盘锻件的上述区域中铌的含量分布较为集中,表示铌在压气机盘的上述区域中分布比较均匀。

但其下模冷模影响区与幅板部位(1#区域)和

中心部位(5#区域),95 %置信度时铍分布的统计偏析度(S)较高,均大于1 %,特别是中心部位,95 %置信度时铍分布的统计偏析度(S)大于2 %,为2.386 %,说明在这两个区域内铍的含量分布较其他区域分散,表示在压气机盘锻件的上述区域中,铍的分布相对比较不均匀。

3.5.3 各部位铍分布在质量控制限区间的统计符合度

如表5及图5所示:高温合金压气机盘件纵断面的2#区域,铍的平均含量为5.117 %,铍含量在质量控制限区间(5.117 ± 0.100)%范围内所占权重比率,即统计符合度为99.67 %;3#区域,铍的平均含量为5.156 %,铍含量在质量控制限区间(5.156 ± 0.100)%范围内所占权重比率,即统计符合度为98.91 %;4#区域,铍的平均含量为5.189 %,铍含量在质量控制限区间(5.189 ± 0.100)%范围内所占权重比率,即统计符合度为99.94 %;但1#区域,铍的平均含量为5.117 %,铍含量在质量控制限区间(5.117 ± 0.100)%范围内所占权重比率,即统计符合度为94.61 %;5#区域,铍的平均含量为5.167 %,铍含量在质量控制限区间(5.167 ± 0.100)%范围内所占权重比率,即统计符合度为91.40 %。

显然,高温合金压气机盘锻件纵断面的原位统计分布解析结果表明:在2#篦齿与幅板过渡区、3#篦齿以及轮毂以及4#试样环等部位,铍分布的统计均匀度较高(均大于98 %),说明铍的含量分布较为集中,表示铍在压气机盘锻件的上述区域中分布比较均匀。

但是其下模冷模影响区与幅板部位(1#区域)和中心部位(5#区域),铍的含量在质量控制区间(铍含量平均值 ± 0.100 %)范围内的统计符合度相对较低(均小于95 %),特别是中心部位,铍的含量在质量控制限区间(铍含量平均值 ± 0.100 %)范围内的统计符合度仅为91.40 %。说明在这两个区域内铍元素的含量分布较其他区域分散,表示在压气机盘锻件的上述区域中,尤其中心部位,铍元素的分布相对比较不均匀,不符合质量控制要求,存在风险。

3.6 加工后GH169高温合金压气机盘锻件纵断面铍含量的频度统计分布解析

高温合金压气机盘件的下模冷模影响区(1#)和中心部位(5#),加工成品过程中基本去除,加工后GH169高温合金压气机盘锻件纵断面,铍含量的频度(权重比率)统计分布图的峰形对称。如表3

所示,铍含量分布区间由4.992 %~5.640 %缩小到5.040 %~5.322 %,铍含量极差由0.648 %大幅度降为0.322 %。

加工后GH169高温合金压气机锻件盘纵断面,在权重比率为95 %置信度时,铍的含量分布的置信区间为5.116 %~5.206 %;其中位值为5.158 %,中位值扩展率,即统计偏析度由加工前的1.96 %大幅度降为0.877 %。说明加工后的GH169高温合金压气机盘件成品中铍分布的均匀度大大提高。

此外,加工后GH169高温合金压气机盘件纵断面铍含量的中位值改变为5.158 %,此时,铍含量在质量控制限区间(5.158 ± 0.100)%范围内所占频度比率,即统计符合度由加工前的95.43 %大幅度提高到99.53 %。

铍的原位统计分布分析技术表征说明:加工后GH169高温合金压气机盘完全符合质量控制的要求。

4 结语

1)采用原位统计分布分析技术系统研究了GH169高温合金压气机盘纵断面不同部位铍分布的规律。以所得到的与样品原位置相对应的数以万计原始信号系统解析为基础,获得压气机盘锻件的纵断面不同部位铍的定量统计分布信息以及加工过程中铍的迁移规律。准确计算判定了机盘纵断面不同部位铍的最大偏析度,提出95 %置信度时中位值置信扩展率,即统计偏析度(S)的新参数,用以表征铍在压气机盘中分布的均匀度;提出了所有数据在特定质量控制限区间($C_0 \pm R$)的频度(权重比率),即统计符合度(F)的新参数,用以表征预设质量控制区间铍含量的一致性概率。采用原位统计分布分析的表征方法,可准确定量地判定高温合金压气机盘件纵断面不同部位铍的分布均匀度和符合度,为加工后盘件的质量控制评估提供了参考。

2)采用原位统计分布表征技术判定了GH169高温合金压气机盘锻件纵断面各部位的最大偏析点坐标(X, Y)及最大偏析度: $P_{(X, Y)} = C_{\max} / C_0$ 。其下模冷模影响区与幅板部位(1#区域)和中心部位(5#区域)的铍的最大偏析较高,在1.08以上;2#篦齿与幅板过渡区、3#篦齿与轮毂以及4#试样环等其他部位的最大偏析较低,小于1.03。

3)GH169高温合金压气机盘锻件纵断面的原位统计分布解析结果表明:盘件的篦齿与幅板过渡区(2#区域)、篦齿(3#区域)以及轮毂与试样环(4#

区域)等部位,95 %置信度时铌分布的统计偏析度(S)较低,均小于1 %,说明在压气机盘锻件的上述区域中铌的含量分布较为集中,表示铌在压气机盘的上述区域中分布比较均匀。但其下模冷模影响区与幅板部位(1#区域)和锻件中心部位(5#区域),95 %置信度时铌分布的统计偏析度(S)较高,均大于1 %,特别是中心部位,其元素95 %置信度时铌元素分布的统计偏析度(S)大于2 %,为2.386 %,说明在这两个区域内铌的分布较其他区域分散,表示在压气机盘锻件的上述区域中,铌的分布相对比较不均匀。

4)高温合金压气机盘锻件纵断面的原位统计分布解析结果表明:篦齿与幅板过渡区、篦齿以及轮毂与试样环等部位铌分布的统计符合度(F)较高(均大于98 %)。但是其下模冷模影响区与幅板部位(1#区域)和锻件中心部位(5#区域),铌的含量在质量控制限区间(铌含量平均值 ± 0.100 %)范围内的统计符合度(F)相对较低(均小于95 %),特别是锻件中心部位,铌的含量在质量控制限区间(铌含量平均值 ± 0.100 %)范围内的统计符合度(F)仅为91.40 %。说明在这两个区域内元素的含量分布较其他区域分散,尤其中心部位,铌的分布不符合质量控制要求,存在风险。

5)高温合金压气机盘件的下模冷模影响区(1#)和中心部位(5#),加工成品过程中基本去除,加工后GH169高温合金压气机盘锻件纵断面上,铌的含量频度(权重比率)统计分布图的峰形对称。铌含量分布区间由4.992 % ~ 5.640 %缩小到5.040 % ~ 5.322 %范围内,铌含量极差由为0.648 %降为0.322 %;95 %置信度时,元素的含

量置信区间为5.116 % ~ 5.206 %;其中位值为5.158 %,统计偏析度(S)由1.96 %大幅度降为0.877 %。铌含量在质量控制限区间(5.158 \pm 0.100) %范围内的统计符合度由加工前95.43 %大幅度提高到99.53 %。铌的原位统计分布分析技术表征说明:GH169高温合金压气机盘锻件的下模冷模影响区和中心部位等铌分布不均匀部位在加工盘件时,可通过机械加工去除。加工后GH169高温合金压气机盘件中铌的分布其均匀度大幅提高,完全符合质量控制的要求。

参考文献

- [1] 王海舟. 21世纪冶金分析的若干问题[J]. 钢铁,2000,35(1):73-78.
- [2] 王海舟. 面向新世纪的冶金材料分析[J]. 理化检验(化学分册),2001(2):49-52.
- [3] 王海舟. 金属原位分析系统[J]. 中国冶金,2002(6):20-22.
- [4] Wang Haizhou. Original position statistic distribution analysis (OPA) - novel statistic characterization method of different chemical compositions and its states of the materials [J]. Materials Science Forum, 2007, 539-543: 4446-4451.
- [5] 王海舟. 原位统计分布分析——材料研究及质量判据的新技术[J]. 中国科学(B辑),2002,32(6):481-484.
- [6] 王海舟,赵沛,陈吉文,等. 低合金钢连铸坯的原位统计分布分析研究[J]. 中国科学(E辑),2005,35(3):260-270.
- [7] 王海舟,李美玲,陈吉文,等. 连铸钢坯质量的原位统计分布分析研究[J]. 中国工程科学,2003,5(10):34-42.
- [8] 王海舟,李美玲,张秀鑫,等. 热铸模具钢的原位统计分布分析[J]. 中国工程科学,2009,11(10):39-47.
- [9] 杨志军,王海舟. 火花光谱原位分析技术对连铸方坯质量分析的应用研究[J]. 钢铁,2002,37(增刊):189-193.
- [10] 杨志军,王海舟. 用原位分析方法研究连铸板坯的偏析和夹杂[J]. 钢铁,2003,38(3):61-63.

Original position statistic distribution analysis characterization of niobium on the vertical section of casting of superalloy pneumatic plate wheel

Wang Haizhou, Li Meiling, Zhuang Jingyun
(Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

[Abstract] The distribution of niobium on the vertical section of casting of GH169 superalloy pneumatic

plate wheel was studied by original position statistic distribution analysis technique in the present paper. On the basis of analysis to ten thousands of primary signals at the corresponding original positions of the sample systematically, the quantitative statistic distribution information was obtained. The biggest segregation degrees of niobium in different areas of pneumatic plate wheel vertical section were calculated accurately. Two new models — the total weight ratio of niobium contents within the permissive content range ($C_0 \pm R$) and the confidence extension ratio of median value (K) at 95 % of confidence limit of weight ratio, were also presented. All these above methods have been used to determine the homogeneity and statistic fitting degree of niobium in the vertical section of casting of GH169 superalloy pneumatic plate wheel accurately for quality control.

[**Key words**] original position statistic distribution analysis; superalloy pneumatic plate wheel; niobium; statistic segregation degree; statistic fitting degree; quality control

(上接 12 页)

Mechanism of hot-deformation and magnetic domains of anisotropic die-upset rare earth permanent magnets

Li Wei , Zhu Minggang

(Division of Functional Materials Research, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

[**Abstract**] In this paper, high performance of anisotropic die-upset nanoscale Nd-Fe-B magnets is obtained: intrinsic coercivity $H_{cj} = 1\ 157$ kA/m, remanence $B_r = 1.465$ T and maximum energy product $(BH)_{\max} = 426$ kJ/m³. The fabrication procedure dependence, deformation mechanism and magnetic domains of these materials are discussed. It is found that the strain activation energy of the die-upset Nd-Fe-B magnets is about 380 kJ/mol based on the Arrhenius Model. The interaction domains are the typical characteristics of the magnetic structures of the magnets. And these domains play an important role in the coercivity mechanism and the corresponding maximum application temperature for the die-upset Nd-Fe-B magnets.

[**Key words**] nanoscale Nd-Fe-B magnets; hot press-hot deformation; anisotropy; magnetic domains