

[文章编号] 1004-0609(2002)05-0950-06

分离 FGH95 合金粉末中陶瓷夹杂物的水淘析法有效性分析^①

胡本芙, 余泉茂, 何承群, 李慧英
(北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

[摘 要] 通过对水淘析法的原理分析, 运用流体力学中的摩擦数群法确定了以陶瓷夹杂物在水中的沉降速度来确定水流速度, 及在确定的水流速度下, 所能淘析出的 FGH95 合金粉末的最大尺寸; 并以比较淘析出的 FGH95 合金粉末的实际最大尺寸与理论最大尺寸, 考察了水淘析法分离 FGH95 合金粉末中的陶瓷夹杂的有效性。

[关键词] FGH95 合金粉末; 陶瓷夹杂; 水淘析; 摩擦数群法

[中图分类号] TF 123.9

[文献标识码] A

FGH95 是一种高合金化的 γ' 相沉淀强化型镍基高温合金, 是制造高推比、高效率发动机的压气机盘、涡轮盘和其他高温航空部件(如涡轮轴、涡轮挡环、高温密封件、冷却板)的优良材料^[1, 2]。合金中存在的各种陶瓷夹杂是导致合金断裂的重大缺陷^[3, 4]。在对合金粉末的制备、处理上采取了相应措施之后, 最终所得的粉末中夹杂含量很低^[5], 难以采用普通的物理、化学分析方法进行测定。而在考察减少夹杂数量及其尺寸的措施和制定相应的夹杂容限标准时, 往往需要夹杂数量和尺寸的绝对数据^[6, 7]。国外研究机构注意到高温合金中各类陶瓷夹杂的密度大大低于粉末高温合金的密度, 借鉴了化工、矿冶分析中的非均相物系分离法——重力沉降法, 建立了专门的水淘析沉降装置, 以分离粉末高温合金中的陶瓷夹杂并检测其含量^[6]。

对于水淘析法的有效性, 一般工作往往通过在合金粉末中人工掺杂一定数目同合金粉末处于相同尺寸范围内的陶瓷夹杂, 通过淘析物中陶瓷夹杂的数目与掺杂的数目的差异来确定水淘析法的有效性^[7]。由于合金粉末的尺寸较小, 很难精确计数人工掺杂的陶瓷夹杂, 使该方法的应用受到限制。

作者通过对水淘析法原理的分析, 得到控制水淘析法中的关键工艺参数——水流速, 并通过比较淘析出的合金粉末尺寸与计算值之间的差异考察水淘析的有效性, 以此完善水淘析法, 使之成为检测、分析我国正在发展的粉末高温合金中的夹杂含量的有效工具。

1 水淘析原理

1.1 合金粉末及陶瓷夹杂颗粒在水中的受力分析

分离 FGH95 合金粉末中陶瓷夹杂的水淘析法装置原理图如图 1 所示。其实质是利用各分散物质 (FGH95 合金粉末、各类陶瓷夹杂) 的密度差异, 在流体介质水中发生相对运动而分离的过程。

假设分散物质均为球形颗粒, 并假设流体介质水静止, 颗粒作沉降, 则球形颗粒在流体介质水中的受力及运动情况如图 2 所示。依据牛顿第二定律

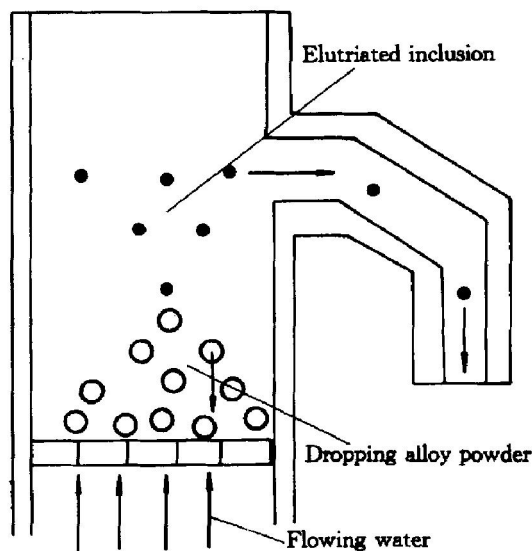


图 1 水淘析装置示意图

Fig. 1 Schematic of water elutriation apparatus

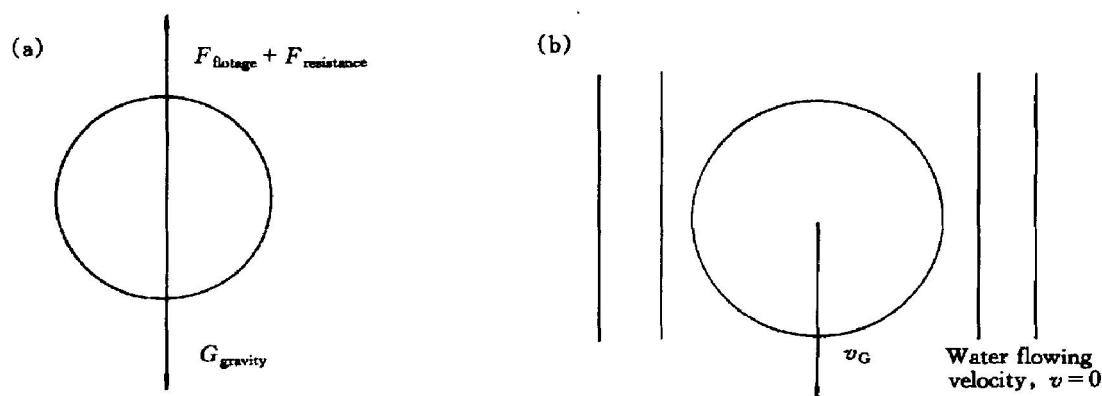


图 2 水中颗粒的受力分析及运动状况

Fig. 2 Analyzing forces on particle and motive state of particle in water

(a) —Analyzing forces on sphere particle in water; (b) —Dropping particle in motionless water

定律及最终颗粒在流体水中保持受力平衡, 则最终颗粒的沉降速度为

$$v_G = [4gd(\rho_s - \rho)/(3\xi)]^{1/2} \quad (1)$$

式中 v_G 为颗粒沉降速度; g 为重力加速度; d 为球形颗粒粒径; ρ_s 为颗粒密度; ρ 为流体介质水的密度; ξ 为阻力系数。

很显然, 在阻力系数相同的条件下, 颗粒沉降速度由颗粒密度和球形颗粒粒径决定, 颗粒密度和球形颗粒粒径大的优先沉降。

1.2 淘析过程中流体介质与颗粒的相对运动关系

由于颗粒沉降速度 v_G 表示颗粒与流体介质水之间的相对速度, 因此颗粒在静止不动的流体介质水中的运动, 可以通过改变流体介质水的运动状态(静止或运动)及其运动速度的大小而等效为: 流体介质水运动而颗粒静止(图 3(a)) 或者二者逆向运动(图 3(b)) 或者二者同向运动但存在速度差异(图 3(c))。实现上述颗粒与流体介质水相对运动关系的关键是选择适宜的水流速度 v : 在图 3(a) 中, $v = v_G$; 在图 3(b) 中, $v < v_G$; 在图 3(c) 中, $v > v_G$ 。

当尺寸相近的 FGH95 合金粉末与夹杂共存时, 由式(1)可知, 密度较大的合金粉末的沉降速度 v'_G 大于密度较小的夹杂的沉降速度 v''_G 。因此在图 1 所示的结构装置中, 选择适宜的水流速度 v , 使得 $v'_G > v > v''_G$

即可实现合金粉末与流体介质水发生如图 3(b)、夹杂与流体介质水发生如图 3(c) 的运动关系; 这样就可以实现合金粉末与陶瓷的成功分离。

1.3 淘析水流速度 v 的确定

在实际水淘析过程中, 所要淘析的 FGH95 合

金粉末与夹杂往往处于某一尺寸范围之内, 并有几类不同密度的夹杂颗粒(Al_2O_3 , MgO , CaO , SiO_2 等) 共存。由式(1)及图 3(c) 不难分析, 当以最大密度、最大尺寸夹杂的沉降速度作为水流速度, 则所有夹杂颗粒都将淘析出。

在式(1)中, 由于阻力系数 ξ 是颗粒沉降速度 v_G 的不确定函数, 即 $\xi = f(v_G)$ 在不同的流型下(滞流、湍流、过渡情况), $f(v_G)$ 的形式不一样, 而颗粒与流体间的运动流型是由雷诺数 Re 决定的, 雷诺数

$$Re = dv_G \rho / \mu \quad (2)$$

式中 μ 为流体粘度。

当 $1 \times 10^{-4} < Re < 1$ (滞流区):

$$\xi = 24 / Re \quad (3)$$

当 $1 < Re < 1 \times 10^3$ (过渡区):

$$\xi = 18.5 / Re^{0.6} \quad (4)$$

当 $1 \times 10^3 < Re < 1 \times 10^5$ (湍流区):

$$\xi = 0.44 \quad (5)$$

这样, 从理论上分析, 运用上述公式是能够确定沉降速度 v_G 的, 但是必须采用试差法, 即先假定颗粒与流体间为一确定的流型(如滞流), 联立式(1)、式(2)和式(3)可得沉降速度 v_G , 而后将沉降速度 v_G 代入公式(2)反算雷诺数 Re , 如雷诺数 Re 在设定的流型范围内(滞流区), 则假定有效, 否则需重新试差。

在确定沉降速度 v_G 时, 国内外文献报道均采用 Stokes 公式(即联立公式(1)、(2)和式(3)的结果), 由上述分析, 是存在偏颇之处的^[6, 7]。

为避免繁琐的试差法确定沉降速度 v_G , 可利用避免试差的摩擦数群法求解沉降速度 v_G , 由公式(1)得

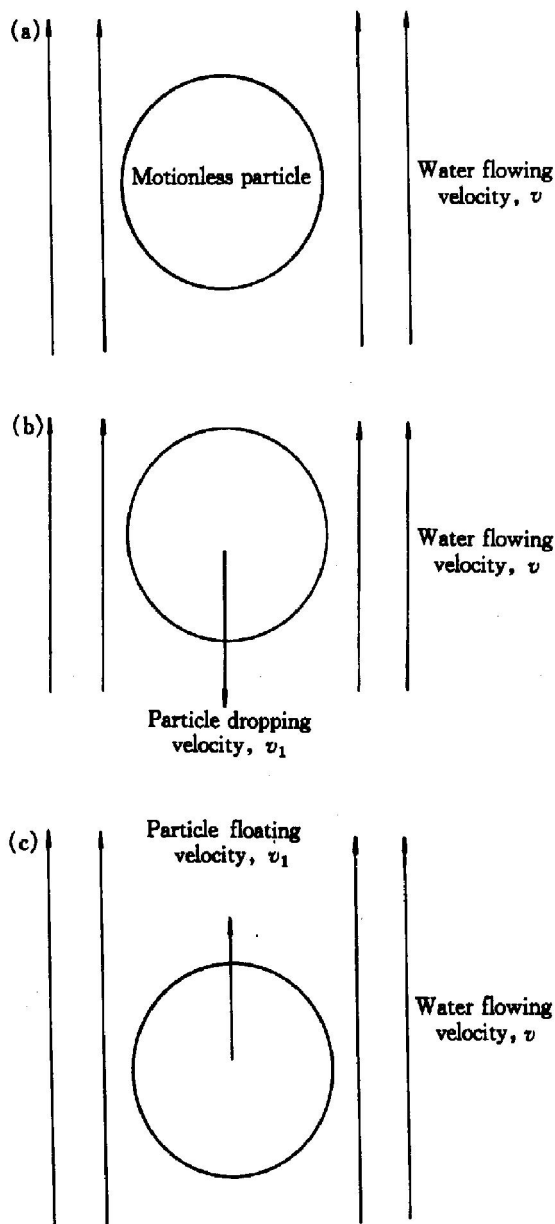


图3 水流速度的差异导致颗粒与水发生相对运动状态的变化

Fig. 3 Changes of relative movement position between particle and water induced by different water flowing velocity
(a) $v = v_G$; (b) $v_G = v_1 + v$; (c) $v_G = v - v_1$

$$\xi = 4d(\rho_s - \rho)g / (3v_G^2 \rho) \quad (6)$$

联立式(2), 消去 v_G 项, 得

$$\xi Re^2 = 4d^3 \rho (\rho_s - \rho) g / (3\mu^2) \quad (7)$$

再将 $\mu = 1.0 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$, $\rho(\text{H}_2\text{O}) = 1.0 \times 10^3 \text{ kg} / \text{m}^3$ 及夹杂物中最大密度的 $\rho(\text{Al}_2\text{O}_3) = 4.0 \times 10^3 \text{ kg} / \text{m}^3$ 代入得

$$\xi Re^2 = 4 \times 10^{-5} \times d^3 \quad (8)$$

该关系示于图4。

在图4中, 可由夹杂物尺寸 d 确定 ξRe^2 , 再利

用图5^[8]中的 $\xi Re^2 - Re$ 关系确定由夹杂尺寸决定的 Re 值, 并将有关数据代入式(2)得

$$v_G = Re / d \quad (9)$$

式中 v_G 为最大密度、最大尺寸的夹杂物的沉降速度, m / s ; d 为夹杂物尺寸, μm 。

令 $v = v_G$, 这样就确定了淘析一定尺寸范围内合金粉末中的陶瓷夹杂所需的水流速。

1.4 淘析出的合金粉末最大尺寸的确定

当由最大密度、最大尺寸的夹杂物沉降速度 v_G 确定为水流速度 v 之后, 尽管与夹杂尺寸相当的合金粉末由于密度大 ($8.25 \times 10^3 \text{ kg} / \text{m}^3$), 由式(1)合金粉末的沉降速度 $v'_G > v$, 不会发生如图3(c)的淘出。但由式(1)小尺寸合金粉末的沉降速度 v'_G 较小, 当 $v'_G < v$, 则小尺寸合金粉末将随同夹杂一起淘出。

仿前分析, 采用类似的方法, 联立公式(5)与

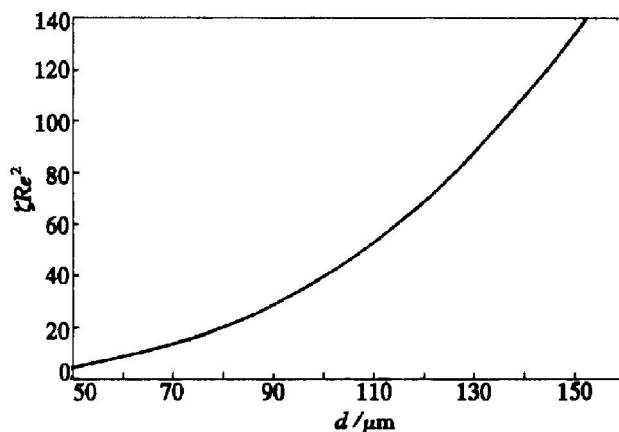


图4 $\xi Re^2 - d$ 关系曲线

Fig. 4 Curve of ξRe^2 vs d

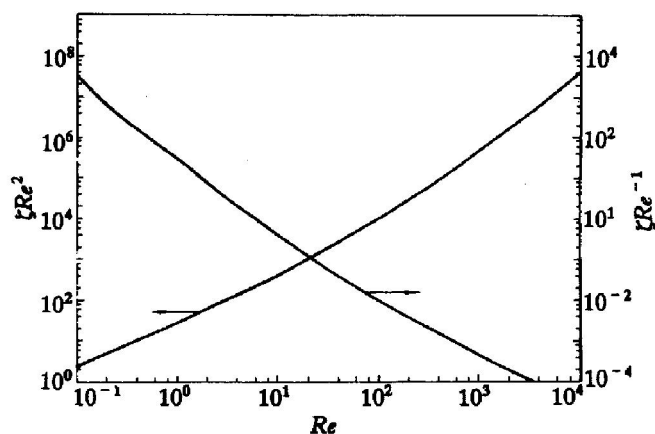


图5 $\xi Re^2 - Re$ 及 $\xi Re^{-1} - Re$ 关系曲线

Fig. 5 Curves of ξRe^2 vs Re and ξRe^{-1} vs Re

式(1), 消去 d 项得

$$\xi Re^{-1} = 4\mu(\rho_s - \rho)g / (3v^3 \rho^2) \tag{10}$$

式中 ρ_s 为合金粉末的密度; v 为数值上等于最大尺寸、最大密度夹杂的沉降速度 v_G 。

将有关数据代入得

$$\xi Re^{-1} = 9.7 \times 10^{-5} \times v^{-3} \tag{11}$$

该关系示于图 6。

图 6 的用途: 已知水流速度 v , 由图 6 确定 ξRe^{-1} ; 再利用图 5 中 $\xi Re^{-1}-Re$ 关系读出合金粉末尺寸决定的 Re 值, 由公式(2), 并将有关数据代入得

$$d' = Re/v \tag{12}$$

式中 d' 为淘析出的合金粉末的最大尺寸, μm 。

这样, 当水流速为 v , 尺寸小于 d' 的合金粉末将随同夹杂一起淘出。

2 水淘析法的有效性检验

由于夹杂多为不规则状, 很难确定其实际尺寸^[4~7], 而 FGH95 合金粉末多呈球状, 尺寸易于测量。因此可以比较不同水流速淘析出的实际合金粉末的尺寸, 考察水淘析法的有效性。

这样, 利用图 4、5 及式(9), 在已知夹杂尺寸 d 的情况下, 确定水淘析流速 v ; 利用图 5、6 及式(12), 在已确定的淘析水流速 v 下, 确定出所能淘析的合金粉末的最大尺寸 d' 。如果实际淘出的合金粉末尺寸 $d'' \geq d'$, 表明水淘析法可靠。这里分别以不同尺寸 d 的 Al_2O_3 (各种夹杂物中, 以 Al_2O_3 的密度最大) 确定水流速度 v , 并计算各水流速度 v 下所能淘出合金粉末的最大尺寸 d' , 计算结果见表 1。各水流速度 v 下所能淘出合金粉末的最大实际尺寸 d'' 如图 7 所示。

对比表 1 中理论值, 可以发现不同水流速淘析出的合金粉末实际最大尺寸均大于理论值。在前述理论分析中, 实际上是假设颗粒在流体中作“自由

沉降”, 即每个颗粒的运动并未受到其他颗粒的干扰; 而在实际的沉降过程中, 每个颗粒的运动还受到其他颗粒的影响, 即属于干扰沉降。因此图 1 中的流动阻力 $F_{\text{流动阻力}}$ 更大, 即式(1)中的阻力系数 ξ 更大, 使较大合金粉末的沉降速度 v'_G 变小, 若该较大粉末沉降速度 $v'_G < \text{水流速度 } v$, 即会发生较大尺寸的合金粉末同时被淘出。

此外表 1 中的水流速度值均为淘析管内的平均值。事实上在垂直于水流方向的管截面上, 由于管内的水流方式仍为粘性流动, 在管壁与管轴之间存在水流速度梯度, 管轴处水流速度最大, 管壁处最小。这样, 在以管轴为中心线的一定区域内的水流速度 $v' > \text{平均水流速度 } v$, 且 $v' > \text{较大尺寸的合金粉末的沉降速度 } v'_G$ 。因此在该区域内, 会发生部分超出理论计算值的较大尺寸的合金粉末的淘出。

这样, 在确定的水流速度下, 由淘析出的实际合金粉末尺寸 $d'' > \text{计算合金粉末尺寸 } d'$, (亦即证明以最大尺寸、最大密度的夹杂在水中的沉降速度作为水淘析中的水流速度, 可以确保所有夹杂的淘出。

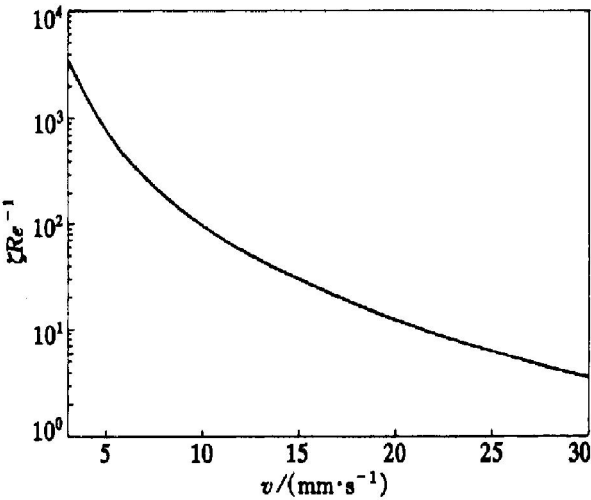


图 6 $\xi Re^{-1}-v$ 关系曲线

Fig. 6 Curve of ξRe^{-1} vs v

表 1 不同夹杂物尺寸确定的理论水流速度及该水流速度所淘出的合金粉末的理论最大尺寸

Table 1 Maximum theoretical size of FGH95 powder elutriated at different water flowing velocity determined by different size of inclusion

Selected size of inclusion $d/\mu\text{m}$	ξRe^2 Determined by Fig. 4	Re (inclusion) Determined by Fig. 5	$v/(m \cdot s^{-1})$ Calculated by formula (9)	ξRe^{-1} Determined by Fig. 6	Re (alloy powder) Determined by Fig. 5	$d'/\mu\text{m}$ Calculated by formula(12)
80	20.48	0.77	0.009 6	111.5	0.48	50.0
90	29.16	1.05	0.010 0	94.4	0.51	51.0
100	40.00	1.42	0.014 2	34.0	0.92	64.0
110	53.24	1.81	0.016 0	23.0	1.13	70.6

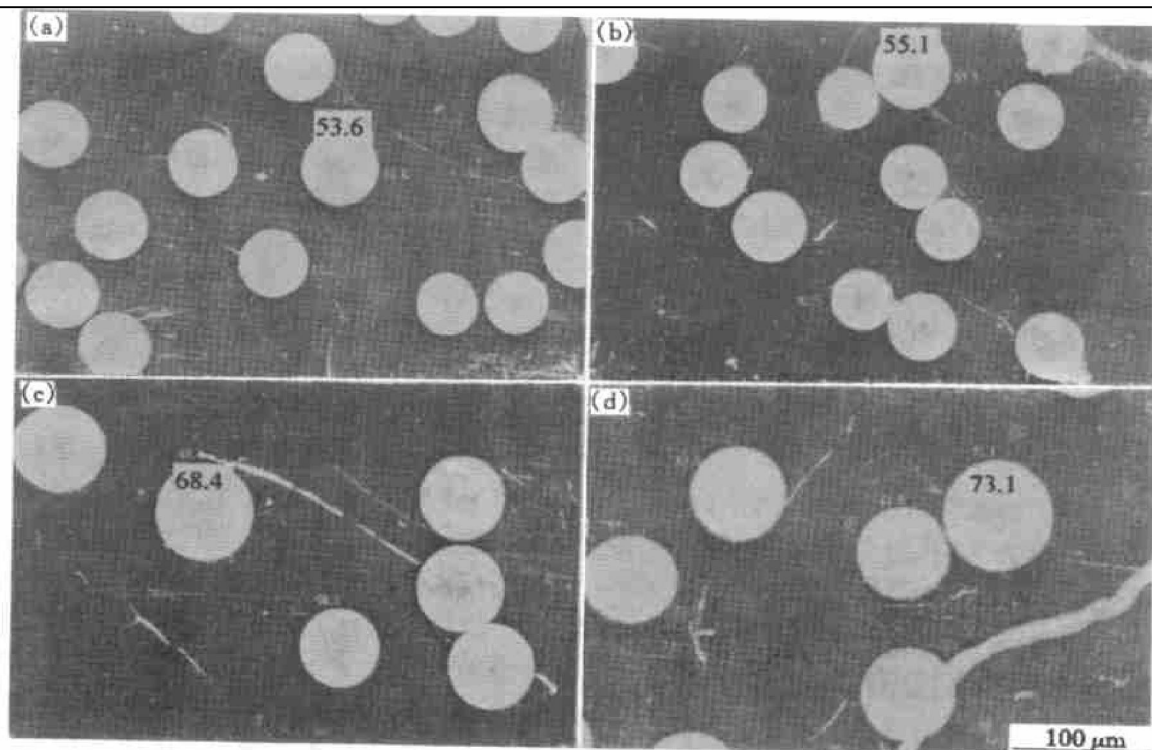


图 7 不同水流速度淘出的最大合金粉末尺寸

Fig. 7 Maximum experimental size of FGH95 powder elutriated at different water flowing velocity
 v : (a) $-0.009\ 6\ \text{m/s}$; (b) $-0.010\ 0\ \text{m/s}$; (c) $-0.014\ 2\ \text{m/s}$; (d) $-0.016\ 0\ \text{m/s}$

3 结论

1) 采用摩擦数群法, 确定了数群 ξRe^2 与夹杂尺寸 d 的关系, 并作出 ξRe^2-d 关系曲线, 结合 ξRe^2-Re 关系图及式(9), 可以由夹杂尺寸 d 来确定水淘析过程中的理论水流速度 v ; 在理论水流速度 v 确定之后, 利用数群 ξRe^{-1} 与水流速度 v 的关系曲线, 结合 $\xi Re^{-1}-Re$ 关系图及式(12), 可以确定特定水流速度下能淘出的合金粉末的理论最大尺寸 d' 。

2) 鉴于人工掺杂陶瓷夹杂计数上的困难及夹杂物的不规则形状, 采用通过比较不同水流速度淘析出的 FGH95 合金粉末的实际最大尺寸与理论最大尺寸之间的差异考察水淘析法的有效性。结果表明所淘析出的合金粉末的尺寸 d'' 均大于合金粉末的计算值 d' , 即为保证淘析出合金粉末中的所有陶瓷夹杂物, 以最大尺寸、最大密度的夹杂物在水中的沉降速度作为水淘析速度是完全有效的。

[REFERENCES]

[1] 汪武祥, 周瑞发. Rene95 粉末高温合金的缺陷与粉末盘的可靠性[A]. Rene95 粉末高温合金论文集[C]. 北

京: 北京航空材料研究所, 1990. 16- 23.

WANG Wu-xiang, ZHOU Ru-fa. The defects of Rene95 P/M disk alloy and the dependability of P/M disk[A]. Symposium on Rene95 P/M Disk Alloy[C]. Beijing: Beijing Academy of Aeronautic Material. 1990: 16- 23.

[2] 杨士仲, 李 力. 粉末冶金高温合金[A]. 高温合金四十年[C]. 北京: 冶金工业出版社, 1996. 65- 72.

YANG Shi-zhong, LI Li. The P/M alloy [A]. The Forty Years on High Temperature Alloy [C]. Beijing: Metallurgical Industrial Press, 1996. 65- 72.

[3] Menon M N, Reimann W H. Low-cycle fatigue crack initiation study in Rene95 [J]. Journal of Materials Science, 1975, 10: 1571- 1581.

[4] Hyzak J M, Bernstein I M. The effect of defects on the fatigue crack initiation process in two P/M superalloys: part I - fatigue origins [J]. Metallurgical Transactions A, 1982, 13A: 33- 43.

[5] Uskokovic D P. Synthesis of advanced materials by powder processing [J]. Materials Science Forum, 1996, 214: 189- 196.

[6] Janine, Borofka C, Tien K J. Superalloys, Supercomposites and Superceramics [M]. Academic Press, Inc: 1989. 237- 284.

[7] 王盘鑫. Rene95 及 FGH95 合金粉末中陶瓷夹杂的分

析[J]. 北京钢铁学院学报, 1987(粉末高温合金专辑): 59– 66.

WANG P X. The analysis of ceramic inclusions in Rene95 alloy powder and FGH95 alloy powder[J]. Journal of Beijing Institute of Iron and Steel, 1987(special of P/M alloy): 59– 66.

[8] 天津大学化工系. 化工原理[M]. 天津: 天津科技出版社, 1983. 155– 158.

Department of Chemistry of Tianjing University. The Chemical Principle [M]. Tianjin: Tianjin Science & Technology Press, 1983. 155– 158.

Analysis of efficient during water elutriation process of separating ceramic inclusions from FGH95 alloy powder

HU Ben-fu, YU Quan-mao, HE Cheng-qun, LI Hu-ying

(School of Materials Science and Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

[Abstract] The principle of water elutriation process was discussed. The water flowing velocity was calculated by ceramic dropping velocity in the water by means of the frictional numeral groups method, and the maximum size of FGH95 alloy powder elutriated was determined under certain water flowing velocity. In order to justify the efficiency during the water elutriation process of separating ceramic inclusions from FGH95 alloy powder, the maximum theoretical and experimental size of FGH95 powder elutriated was compared at different water flowing velocity.

[Key words] FGH95 alloy powder; ceramic inclusions; water elutriation; frictional numeral groups method

(编辑 陈爱华)