

反向挤压铸造大型轮毂杂质元素偏析行为研究

邢书明¹ 王永生² 刘鑫² 侯景路³

(1.北京交通大学机械与电子控制工程学院; 2.北京北方车辆集团有限公司热加工分厂;
3.天津金汇通自行车有限公司)

摘 要 杂质元素的偏析是导致大型关键结构件异常失效破坏的重要因素。针对反向挤压铸造 A356.2 铝合金大型轮毂,研究了 P、Ca、Zn、Pb、Cu、Fe、Zr、Mn 等杂质元素的偏析程度、偏析位置和偏析类型。结果表明,挤压铸造过程中持压凝固阶段的流变行为对杂质元素的偏析会产生重要影响。发现了 3 种偏析:沿流变补缩通道分布的“通道偏析”、在变形死区的“零流变偏析”以及 Ca 和 Cu 的“密度偏析”。这些杂质元素的偏析程度依偏情况为:Zn、Pb、P 是严重偏析元素,偏析比高于 0.3,偏析级别达 4 级;Ca 属于偏析较重的元素,偏析比为 0.2~0.3,偏析级别为 3 级;Fe、Cu、Mn、Zr 等杂质元素都属于偏析较轻的元素,偏析比为 0.1~0.2,偏析级别为 1~2 级。各杂质元素的偏析位置受凝固顺序、流变状态和空间位置所控制,凸模(压头)下方的中心位置(零流变区)和反向充填的局部热节位置是 $k_0 < 1$ 杂质元素的集聚区,反向充填的最远位置反而是杂质元素贫乏的位置。

关键词 铝合金;轮毂;挤压铸造;杂质元素;偏析

中图分类号 TH142.3;TG292 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.001 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Segregation Behavior of Impurity Elements in Large Wheel Hub by Reverse Squeeze Casting

Xing Shuming¹, Wang Yongsheng², Liu Xin², Hou Jinglu³

(1.School of Mechanical and Electronic Control Engineering, Beijing Jiaotong University;
2.Hot Processing Branch, Beijing North Vehicle Group Co., Ltd.; 3.Tianjin Jinhuitong Bicycle Co., Ltd.)

Abstract: The segregation of impurity elements is known as an important factor leading to abnormal failure of large-scale key structural parts. The segregation degree, segregation position and segregation type of impurity elements such as P, Ca, Zn, Pb, Cu, Fe, Zr and Mn were analyzed for A356.2 aluminum alloy wheel hub by reverse squeeze casting. The results reveal that the rheological behavior of squeeze casting has an important influence on the segregation of impurity elements. Three kinds of interesting segregation are presented as follows: the “channel segregation” along the rheological feeding channel, the “zero rheological segregation” in the non-deformation zone, and the “specific gravity segregation” of calcium and copper. The degree of segregation of these impurity elements can be divided into four grades according to the segregation ratio from low to high. Zinc, plumbum and phosphorus belong to serious segregation elements with the segregation ratio higher than 0.3, which reaches grade 4, while calcium belongs to the heavy segregation element with the segregation ratio of 0.2~0.3, which is grade 3. Meanwhile, the impurity elements such as iron, copper, manganese, zirconium are all light segregation elements with the segregation ratio of 0.1~0.2, which is grade 1 or grade 2. The segregation position of impurity elements is controlled by solidification sequence, rheological state and spatial position. The central position (zero rheological zone) under punch or indenter and local hot spot positions of reverse filling are the accumulation area of $k_0 < 1$ impurity elements. On the contrary, the farthest position of reverse filling is poor in impurity elements.

Key Words: Aluminum Alloy, Wheel Hub, Squeeze Casting, Impurity Element, Segregation

挤压铸造由于其流动和高压的作用,成形工件中的成分偏析难以避免。其中合金元素的偏析早在 20 世纪

收稿日期:2020-08-27;修改稿收到日期:2020-09-18
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275031);天津市重点研发计划资助项目
第一作者简介:邢书明,男,1962 年出生,教授,北京(100044),E-mail: smxing@bjtu.edu.cn
引用格式:邢书明,王永生,刘鑫,等. 反向挤压铸造大型轮毂杂质元素偏析行为研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(3):265-269.
XING S M, WANG Y S, LIU X, et al. Segregation behavior of impurity elements in large wheel hub by reverse squeeze casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3):265-269.

90 年代就受到了关注,并发现挤压铸造件的偏析与重力铸造有显著的差异^[1~3]。GAN Y 等^[4]对比研究了重力铸造和挤压铸造 Al-Cu-Mg 合金不同厚度试样的组织和性能后发现,重力铸造中 Cu 为反偏析,但是在挤压铸造条件下 Cu 却为正偏析,挤压铸造的偏析程度小于重力铸造的。其他很多针对直接挤压铸造成形工件的偏析研究也证明,挤压铸造中合金元素的偏析为加重的正偏析^[5~10]。进一步研究表明,偏析位置和偏析程度还受冷却速度控制^[11]。

合金材料中杂质元素的偏析对材料组织性能同样产生重要影响,但是,杂质元素在挤压铸件中的偏析规律尚不清楚。BABICHEVA R I 等^[12]研究了 Fe、Co、Cu、Ti、Mg 和 Pb 等杂质元素的晶界偏析对纳米晶态铝合金的晶界强度产生的影响,发现 Fe、Co 的晶界偏析有强化晶界的作用,而 Cu、Pb 晶界偏析则具有削弱晶界的作用。杨健^[13]利用分子动力学计算方法系统研究了铝中常见元素的分配系数及其偏析机理,证明了所有杂质元素的平衡分配系数都随原子序数增加呈周期性变化,为杂质元素的偏析预测提供了依据。但是,挤压铸件中杂质元素的宏观偏析会跟工件形状、尺寸、加压方式等密切相关。本课题以 A356 铝合金轮毂为研究对象,分析了反向挤压铸造轮毂中杂质元素 P、Ca、Zn、Pb、Cu、Fe、Zr、Mn 等的宏观偏析行为,旨在为铝合金铸件中的杂质偏析控制提供参考。

1 试验方法

试验材料为 A356 铝合金,其化学成分按美国标准 B108-03a 控制。采用立式直接加压反向充填的挤压铸造方法成形,见图 1,得到公称直径为 500 mm、最大壁厚为 40 mm 的重卡轮毂,见图 2。挤压铸造的主要工艺参数:浇注温度为 690 °C,比压为 100 MPa,开始加压时间为 15 s,保压 1 min。

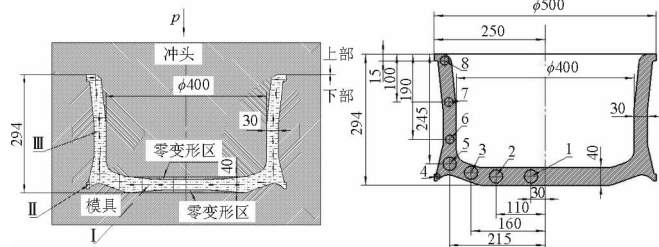


图 1 反向挤压铸造示意图

Fig.1 Schematic diagram of the reverse squeeze casting for the wheel hub

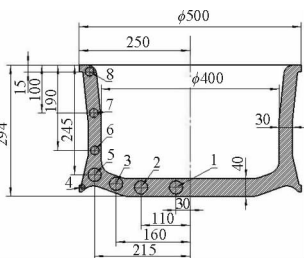


图 2 铸件尺寸及取样位置

Fig.2 The sampling position and the dimension of the wheel hub

面上均按照图 2 位置取 8 个 30 mm×30 mm 试样,对应记为 1~8 号位置,各位置的物理含义为:1 号位是凸模(压头)下方的中心,称为轮心;2 号位和 3 号位分别是凸模半径 1/2 位置和 3/4 位置,位于轮毂的辐板上,是水平流动的通道位;4 号位是外轮缘位置,壁厚最薄,是最先凝固的位置,且主要在重力下凝固;5 号位是凸模与凹模形成的间隙(轮辋与辐板交汇处)开始位,是反向充填的开始位;6 号位和 7 号位分别是轮辋高度的 1/5 和 1/3 位置,是反向充填的通道位;8 号位是轮辋的最上部,内轮缘位置,是反向充填的最远端。

采用切削加工将上述各试样的表面去除 5 mm 后,形成的平面作为检测面。采用斯派克 LABM11 直读光谱仪进行各元素含量的检测,测量 3 次,取平均值作为各元素的含量值;沿圆周的 3 个相同物理意义的剖面各元素含量值再取平均值,作为上述 1~8 处的成分。

由于不同元素的基础含量不同,有的甚至存在数量级差异,为了定量表达各元素的偏析程度,采用一个无量纲量偏析比来反映各元素的偏析程度。定义各元素的最大含量与最小含量差与平均含量的比为偏析比,用 ϕ_w 、 ϕ_r 、 ϕ_h 偏析比分别定量表达整个铸件、径向和纵向的偏析程度。

$$\phi_w = \frac{C_{w\max} - C_{w\min}}{\bar{C}_w} \quad (1)$$

$$\phi_r = \frac{C_{r\max} - C_{r\min}}{\bar{C}_r} \quad (2)$$

$$\phi_h = \frac{C_{h\max} - C_{h\min}}{\bar{C}_h} \quad (3)$$

式中, $C_{w\max}$ 、 $C_{w\min}$ 、 $C_{r\max}$ 、 $C_{r\min}$ 、 $C_{h\max}$ 、 $C_{h\min}$ 分别为各元素在整个铸件内的最大和最小含量、径向的最大和最小含量、纵向的最大和最小含量; $\bar{C}_w$ 、 $\bar{C}_r$ 、 $\bar{C}_h$ 分别为整个铸件、径向以及高度方向的平均含量。定义杂质元素含量与平均含量离差最大的位置为偏析位置。

2 试验结果分析

2.1 杂质元素的偏析程度

A356 铝合金反向挤压铸造轮毂内不同位置的杂质元素含量见表 1。可以看出,各杂质元素在轮毂的不同位置含量都存在一定的差异,即存在不同程度的宏观偏析。根据表 1,进一步整理可得各元素在整个轮毂内的偏析比,见表 2。由表 2 可见,各杂质元素的偏析比存在明显不同。其中纵向偏析比 ϕ_h 是根据 5、6、7、8 位置的数据,用式(3)计算而得;径向偏析比 ϕ_r 则是用 1、2、3、5 位置的含量数据,依据式(2)计算得到;整体偏析比 ϕ_w 则是用 1~8 点的数据按式(1)计算而得。由表 2 可

表 1 各杂质元素在不同位置的含量

Tab.1 Impurity element content at different positions %

位置	$w_B/\times 10^{-3}$							
	Fe	Cu	Zn	Mn	Zr	Pb	Ca	P
1	0.16	3.8	8.0	3.1	1.56	2.2	2.6	1.00
2	0.15	3.2	7.0	3.0	1.56	2.0	2.5	1.28
3	0.16	3.4	7.0	3.1	1.56	2.0	2.7	1.08
4	0.15	3.1	6.0	2.8	1.72	1.9	3.5	1.21
5	0.17	3.5	8.0	3.1	1.56	2.1	2.8	0.99
6	0.18	3.6	7.0	3.1	1.59	2.2	2.8	0.89
7	0.17	3.4	8.0	3.1	1.78	2.7	3.6	1.05
8	0.15	3.1	5.5	2.7	1.61	1.6	3.7	0.77
C_{w-max}	0.18	3.8	8.0	3.1	1.78	2.7	3.7	1.28
C_{w-min}	0.15	3.1	5.5	2.7	1.56	1.9	2.5	0.77
平均值 $\bar{C}_w$	0.16	3.4	7.1	3.0	1.62	2.1	3.0	1.03

见,杂质元素的偏析程度排序如下:

按照整体偏析比 ϕ_w 排序为: $P>Zn>Pb>Ca>Fe>Mn>Cu>Zr$;按纵向偏析比 ϕ_h 排序为: $Zn>Pb>Ca>Fe>Cu>P>Mn=Zr$;按径向偏析比 ϕ_r 排序为: $Zn>P>Cu>Fe>Ca>Pb>Mn>Zr$ 。

可以发现,不同方向的偏析程度排序并不一致。整体偏析程度较小的 Cu 在径向排序中却成了偏析程度严重的第 3 位,在整体排序和纵向排序都属于比较严重的 Pb 在径向排序中却很靠后,偏析较轻。从径向或纵向对杂质元素的偏析比分别排序,发现不同元素的偏析程度除了 Zn 都处于首位、Mn 都处于末位外,其他杂质元素的偏析程度在不同方向的表现差异很大。这说明,各元素的偏析程度并不能简单按照平衡分配系数的大小来判定,还需要考虑流动、密度等外在因素的影响。

表 2 各杂质元素的偏析程度

Tab.2 Segregation degree of impurity element at the different positions %

元素	$w_B/\times 10^{-3}$							
	Fe	Cu	Zn	Mn	Zr	Pb	Ca	P
整体最大离差	0.03	0.70	2.50	0.40	0.22	0.80	1.20	0.51
整体偏析比 ϕ_w	0.19	0.14	0.34	0.16	0.10	0.30	0.24	0.50
径向最大离差	0.02	0.70	2.00	0.10	0	0.20	0.30	0.29
径向偏析比 ϕ_r	0.12	0.20	0.28	0.03	0	0.10	0.11	0.27
纵向最大离差	0.03	0.50	3.50	0.40	0.22	1.10	0.90	0.28
纵向偏析比 ϕ_h	0.18	0.15	0.49	0.13	0.13	0.51	0.28	0.30

根据偏析比大小划分偏析等级,对于工程应用较方便。这里将偏析程度分为 4 级:[0~0.1]为 1 级,基本无偏析;(0.1~0.2]为 2 级,偏析较轻;(0.2~0.3]为 3 级,偏析较重;(0.30~1.0]为 4 级,偏析严重。据此划分的各杂质元素偏析等级见表 3。可以看出,各元素在径向和纵向的偏析级别略有差异,但纵向偏析等级与整体偏析等级一致,Zn、Pb、P 属于 4 级,即严重偏析元素;Ca 属于 3 级,即偏析较重的元素;其他 Fe、Cu、Mn、Zr 等杂质元素都在 2 级,属于偏析较轻的元素。

表 3 各杂质元素的偏析等级

Tab.3 Segregation grades of impurity elements

元素	Fe	Cu	Zn	Mn	Zr	Pb	Ca	P
径向偏析比 ϕ_r	0.12	0.20	0.28	0.03	0	0.10	0.11	0.27
径向偏析等级	2	3	3	1	1	2	2	2
纵向偏析比 ϕ_h	0.18	0.15	0.49	0.13	0.13	0.51	0.28	0.30
纵向偏析等级	2	2	4	2	2	4	3	4
整体偏析等级	2	2	4	2	2	4	3	4

2.2 杂质元素的偏析位置

根据表 1 的数据可以进一步计算出各元素沿纵向的偏析位置。除了基本无偏析的 Mn、Zr 外,各个杂质元素含量与平均含量离差最大的位置见表 4。除 Ca 有例外,各元素含量最低的位置都是最后充填位置 8 号位。这说明,在反向挤压铸造中,在反向充填的最后充填位置杂质元素含量并不高,这与通常的猜想有所不同。各杂质元素含量最高的位置在 5、6、7 号位。这 3 个位置连起来,就是反向挤压铸造的流变通道。因此也可以将这种偏析认为通道偏析。

表 4 杂质元素纵向(5~8)偏析位置一览表

Tab.4 Longitudinal segregation position (No. 5~8) of impurity elements

元素	Fe	Cu	Zn	Pb	Ca	P
最大含量位置	6	5~7	5~7	7	8	7
最小含量位置	8	8	8	8	5	8

类似地,根据表 1 可得各杂质元素沿径向的偏析位置,见表 5。可见,除 P 外,其他杂质元素均在压头下方大约压头半径 1/2 的 2 号位含量最低,而在中心的 1 号位及边缘的 5 号位含量较高。其中 2 号位和 5 号位连接形成了挤压铸造水平流变的通道,这说明反向挤压铸造的径向也存在通道偏析。1 号位也属于偏析位置,其位于凸模(压头)下方的中心,处于“变形死区”内,不妨将这个位置称为“零流变”位,把这种偏析称为“零流变偏析”。4 号位于外轮缘,这个位置因工件结构的原因,金属熔体在反向挤压充型和补缩过程也几乎没有流变,也属于“零流变”位置,但是壁厚小,是先凝固位置,杂质元素含量是比较低的位置,也属于偏析位置(但不是偏析最严重的位置)。

表 5 各杂质元素径向(1、2、3、5 点)偏析位置一览表

Tab.5 Radial segregation position (No. 1,2,3,5) of impurity element

元素	Fe	Cu	Zn	Pb	Ca	P
最大含量位置	5	1	1,5	1	5	2
最小含量位置	2	2	2,3	2	2	5

3 讨论与分析

3.1 反向挤压铸造中宏观偏析的形成机制

杂质元素的偏析行为需要从凝固热力学和动力学

两方面来分析。从热力学的角度看,只要与 Al 形成固溶体的平衡分配系数不等于 1,凝固过程就存在溶质的再分配,这种再分配的程度大小可以用平衡分配系数的数值定量描述。A356 铝合金中各杂质元素与 Al 之间的平衡分配系数 k_0 见表 6,其中 Cu、Ca、Fe、Mn 都与 Al 形成固溶体,且发生共晶反应,因此,它们的平衡分配系数 k_0 均小于 1;而 Zr 与 Al 之间发生包晶反应,其平衡常数 k_0 大于 1;Pb 与 Al 不形成固溶体和化合物,发生偏晶反应,没有平衡分配系数。因此,杂质元素可以根据平衡分配系数分为易偏析元素、不易偏析元素和异常偏析元素 3 大类。Mn 的平衡分配系数接近 1,所以,其偏析倾向最小,是不易偏析元素。相反,Ca、Fe、Zr、Cu 的平衡分配系数远离 1,所以,偏析倾向大,属于易偏析元素;Pb 与 Al 之间没有平衡分配系数,属于异常偏析元素。

表 6 各杂质元素的平衡分配系数 k_0

Tab.6 Equilibrium distribution coefficient of impurity elements							
Fe	Cu	Zn	Mn	Zr	Pb	Ca	P
0.022 ^[13]	0.10	0.50	0.95	2.54	—	0.001	—

但是,试验结果中杂质元素的偏析比最大的并不是 Ca、Fe,而是 Zn、P、Cu、Pb。而且纵向和径向偏析比排序不尽相同,这说明,在反挤压铸造条件下的杂质元素的偏析程度除了受平衡分配系数控制外,还受流变行为控制。

挤压铸造条件下所加压力高达 60~150 MPa,不仅能使剩余液相流动,也能使固液混物流变,甚至使铝合金凝固层发生塑性流动,这种流动造成了物质的宏观

转移,强制性地改变了杂质元素的分布。反向挤压铸造轮毂的过程可以分为挤压充型、持压凝固和流变补缩 3 个阶段。在挤压充型阶段,Al 液刚刚浇入型腔,仅在与型壁接触的部位(底面、侧面下部及压头接触面)形成很薄的凝固层,其余部分为温度和溶质含量基本均匀的液态,因此,虽然充型阶段铝合金的流变距离最大,但并不会产生成分的不均匀;持压凝固期间,是凝固与流变同时发生的一个耦合阶段。在高压作用下,界面传热加剧,凝固速度大幅度提高,溶质再分配难以达到平衡,因此,就会在凝固层内存在杂质元素的分布梯度,凝固前沿出现杂质原子的富集($k_0 < 1$ 的杂质)或贫乏($k_0 > 1$ 的杂质,如 Zr)。随着凝固进行,出现凝固体收缩,于是在收缩产生的负压和压头压力的作用下,凝固前沿的杂质富集或贫乏区就会沿着补缩方向向收缩部位流变,这种流变使溶质富集层向体收缩部位转移,凝固前沿的溶质含量降低,加速了凝固进行,再次排出溶质。因此,流变不断地将富含杂质元素的熔体向远端体收缩区输送和转移。随着挤压凝固进行,流变补缩通道越来越窄,使通道内富含溶质的熔体(固液混合物)流变转移需要的切应力越来越大,一旦所加切应力小于临界切应力时,通道便被冻结,形成了富含杂质元素的“通道偏析”。

易偏析元素在凝固过程中存在显著的溶质再分配,使固液前沿流变通道内的溶质富集现象加剧,但是由于持压凝固过程的“流变输送”作用使这种富集不断转移,易偏析元素并不一定便显出最严重的偏析。Ca 和 Fe 在 Al 中的溶解度都极低,所以,其含量较高时,将主要存在于液体中,很容易被“流变输送”,所以,偏析程度并

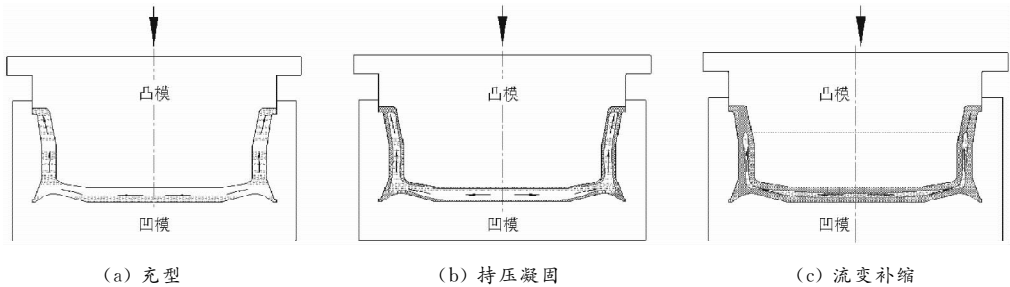


图 3 反向挤压铸造过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of reverse squeezing casting process

不是最严重的。

3.2 反向挤压铸造中杂质元素的“零流变偏析”

试验结果发现,1 号位是杂质元素含量较高的偏析区、4 号位是杂质元素含量较低的偏析区。表面看两者没有关系,其实两者都属于“零流变偏析”。1 号位处于凸模(压头)下方的中心,当凸模接触合金液后,其下表面迅速形成一层凝固壳,随着凸模的向下挤压,其下方的金属液沿径向流动,在凸模下方的中心位置 1 号位,金属液只有垂直压缩运动,没有水平运动,即存在一个

类似塑性变形中的“变形死区”。这个“变形死区”的厚度随着凝固时间的延长而增厚,范围也会随着凝固时间延长而扩大,“变形死区”内凝固排出的杂质元素也就不发生明显的流变转移,从而形成一个杂质富集区。所以,“零流变偏析”是一种没有明显流变的区域内表现出的偏析现象,偏析规律与重力铸造一样,其是最后凝固的位置,溶质含量高于平均值,属于正偏析。

4 号位杂质含量较低的原因也是“零流变偏析”。由图 2 可见,4 号位位于外轮缘,这个位置工件壁厚只

有 4 mm, 在开始加压之前就已经基本凝固, 所以, 这个位置在随后的反向挤压充型和补缩过程几乎没有流变, 也属于“零流变”位置。由于壁厚小, 是先凝固位置, 杂质元素含量比较低, 即出现了负偏析。它与 1 号位不同的是, 这里是先凝固位置, 排出的溶质被“流变转移”至轮辋位置, 所以属于负偏析。

这种“零流变偏析”的发生部位都是挤压铸造中不发生明显流变部位, “变形死区”和薄壁、筋条、肋板等开始挤压前已经基本凝固结束的部位是“零流变偏析”的典型部位, 其偏析规律同于重力铸造。处于最后凝固位置的将出现正偏析, 而处于首先凝固位置, 则表现为负偏析。

3.3 反向挤压铸造中杂质元素的反常偏析

总体上看, 反向挤压铸造的杂质偏析属于正偏析。反向充填的最后位置 8 号位和型腔底部的薄壁结构 4 号位是最先凝固位置, $k_0 < 1$ 的杂质含量较低。但是, 试验中发现 Ca 出现了反常偏析。Ca 与 Al 的平衡分配系数只有 0.001, 属于 $k_0 < 1$ 的易偏析元素, 在最先凝固位置应当含量较低, 但试验发现, 在最先凝固位置的 8 号位其含量很高, 见表 1。

出现这种反常偏析的根源可以从 Ca 的存在形式来解释。根据 Al-Ca 相图可知, Ca 在 Al 中的平衡溶解度极低, 只有 0.01%。也就是说, Al 合金凝固时, Ca 极少被固化在凝固层内, 而是游离在液相内。Ca 的密度只有 1.54 g/cm^3 , 仅为 Al 的 50%, 这种游离于液相中的 Ca 就会出现漂浮, 在处于上部的 8 号位出现集聚, 而在处于下部的 5 号位相对贫乏。铸件越大这种现象会越明显。因此, Ca 的反常偏析本质上是与 Al 之间的密度差引起的“密度偏析”。

仔细观察表 1 中不同位置的 Cu 含量, 也可以发现这种“密度偏析”。Cu 的密度为 8.91 g/cm^3 , 是 Al 的 3 倍以上, 因此, 它在液相中会出现“沉降”, 导致最后凝固位置的下部(6 号位)Cu 含量明显高于 7 号位和 8 号位。这种密度偏析在铸件高度较大、壁厚大的工件中表现会更加突出。

4 结 论

(1) 挤压铸造轮毂内存在杂质元素的沿补缩通道的通道偏析、基本不发生流变位置的零流变偏析以及 Ca 和 Cu 的密度偏析, 通道偏析和零流变偏析都属于正偏析, 密度偏析则表现为反偏析。

(2) 在反向挤压铸造轮毂条件下各杂质元素的偏析程度排序为: Zn、Pb、P 是严重偏析元素, 偏析级别达 4 级; Ca 属于偏析较重的元素, 偏析级别为 3 级; Fe、Cu、

Mn、Zr 等杂质元素的偏析程度差异不大, 都属于偏析较轻的元素, 偏析级别为 2 级以下。

(3) 挤压铸造中存在杂质元素的流变输送现象, 杂质的偏析位置受凝固顺序、流变状态和空间位置所控制。凸模(压头)下方的中心位置(零流变区)和反向充填的局部热节位置是 $k_0 < 1$ 杂质元素集聚区。

参 考 文 献

- [1] JEAN-LUC D, CHRISTOPHE L F. Influence of filling speed and solidification pressure on macrosegregation in squeeze-casting[J]. Materials Science Forum, 1996, 217-222(1): 271-276.
- [2] GALLERNEAULT M, DURRANT G, CANTOR B. Squeeze casting of hypoeutectic binary Al-Cu[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1996, A27(12): 4 121-4 132.
- [3] DURRANT G, GALLERNEAULT M, CANTOR B. Control of segregation in squeeze cast Al-4.5Cu binary alloy[J]. Materials Science Forum, 1997, 242: 77-82.
- [4] GAN Y, ZHANG D T, ZHANG W W, et al. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of squeeze cast Al-Cu-Mg alloy[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2015, 28(1): 50-58.
- [5] 李元元, 张明, 赵海东, 等. 直接挤压铸造法制备 Al-Cu-Mn 轮毂的研究[A]. 2007 铸造活动周论文集[C]. 武汉, 2007.
- [6] 宗福成, 葛素静, 臧立中, 等. 挤压铸造 Al-Si 合金轮毂中的夹杂研究[J]. 铸造, 2014, 63(7): 694-697.
- [7] 刘忠艳. 特种车辆铝合金轮毂液态模锻数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [8] 侯立群, 马欣宇, 李素梅, 等. 挤压铸造轮毂的应用研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2003(S1): 218-221.
- [9] HONG C P, SHEN H F, CHO I S. Prevention of macrosegregation in squeeze casting of an Al-4.5Cu alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1998, A29(1): 339-349.
- [10] JOON Y C, HEUNG S K, IN G M, et al. Homogenization of direct chill casted Al-10Si-2Cu-1Mg-0.5 Mn alloy[J]. Journal of the Korean Institute of Metals and Materials, 2000, 38(8): 980-984.
- [11] WANG S Z, JI Z S, SU M, et al. Segregation behavior of ADC12 alloy differential support formed by near-liquidus squeeze casting [J]. Materials and Design, 2015, 65(1): 591-599.
- [12] BABICHEVA R I, DMITRIEV S V, ZHANG Y, et al. Effect of grain boundary segregations of Fe, Co, Cu, Ti, Mg and Pb on small plastic deformation of nanocrystalline Al[J]. Computational Materials Science, 2015, 98(2): 410-416.
- [13] 杨健. 铝合金熔体杂质元素相互作用及偏析机理的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [14] 翟秀静, 符岩, 张晓明, 等. 原铝中 Fe、Si 杂质分配系数的计算与测定[J]. 轻金属, 2000(12): 37-40.
- [15] 刘文鑫. 挤压铸造轮毂的非均质现象研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [16] KIM S W, DURRANT G, LEE J H, et al. Microstructure of direct squeeze cast and gravity die cast 7050 (Al-6.2Zn-2.3Cu-2.3Mg) wrought Al alloy[J]. Journal of Materials Synthesis and Processing, 1998, 6(2): 75-87.

(编辑: 张正贺)