

间接挤压铸造工艺参数对铝合金中 Si 偏析的影响

郭莉军[✉], 邢书明, 鲍培玮, 邱常明, 刘文鑫

北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044
✉ 通信作者, E-mail: someboy1981@163.com

摘要 研究间接挤压铸造工艺条件下, 浇注温度、挤压压力、挤压速度、冷却速度及参数间的交互作用对 6066 铝合金中 Si 元素的偏析影响规律. 以凝固后零件热节位置硅的质量分数与合金初始硅的质量分数的差值定量表征偏析程度, 采用考虑一级交互作用的四因素两水平正交设计, 研究间接挤压条件下硅的偏析现象. 结果发现: 浇注温度、挤压压力、挤压速度和冷却速度对硅偏析都有影响, 其中浇注温度是影响最显著的因素. 随着浇注温度的升高, 铝合金中 Si 偏析程度减小. 挤压压力和挤压速度对硅偏析的影响次之, 但两者的影响趋势相反; 模具冷却能力的影响程度与挤压压力和挤压速度的交互作用的影响程度相似. 铜模套(高冷速)比钢模套(低冷速)的硅偏析程度要轻. 间接挤压铸造条件下, 工件热节位置可以出现硅的负偏析.

关键词 铝合金; 挤压铸造; 偏析; 硅; 工艺参数
分类号 TG146.21; TG249.2

Effect of process parameters on Si segregation in an aluminum alloy during squeeze casting

GUO Li-jun[✉], XING Shu-ming, BAO Pei-wei, QIU Chang-ming, LIU Wen-xin

School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
✉ Corresponding author, E-mail: someboy1981@163.com

ABSTRACT The effects of pouring temperature, squeeze pressure, squeeze speed and cooling type on Si segregation in 6066 alloy were studied in indirect squeeze casting. Taking the difference between the silicon content of the hot spot zone after solidification and the initial silicon content of the alloy as the segregation degree, the Si segregation was analyzed according to orthogonal design which considers two levels, four factors and partial first-class interactions. The results show that pouring temperature, squeeze pressure, squeeze speed and cooling type all have effect on the Si segregation, but pouring temperature is the most significant factor. With the increase of pouring temperature, the segregation degree of Si decreases. Squeeze pressure and squeeze speed have less influence on the Si segregation than pouring temperature, but their influence trends are opposite. The influence degree of mold cooling is similar to that of the partial first class interaction of squeeze pressure and speed. The Si segregation in a copper sleeve (high cooling speed) is lighter than that in a steel sleeve (low cooling speed). Negative Si segregation was found in the hot spot zone of indirect squeeze cast work-pieces.

KEY WORDS aluminum alloys; squeeze casting; segregation; silicon; process parameters

在挤压铸造中,经常会看到零件中发生宏观偏析^[1-5]. 关于加压铸造条件下零件的成分偏析形成机理、影响因素和控制方法的研究很多,但结论却并不一

致. Gallerneault 等^[6]认为挤压铸造出现正常偏析的主要原因是外加压力. 挤压铸造中压力使凝固模式由糊状凝固变为近平面的逐层凝固. 这一观点称为压力主

因论. Hong 等^[7]以铝硅合金为例研究直接挤压铸造工艺参数挤压压力、模具温度、浇注温度等对宏观偏析的影响规律,进一步发展了压力主因论,并提出三个临界压力——无收缩缺陷的最小压力(P_{SC})、产生宏观偏析的最小压力(P_{MS})和产生微观偏析的压力(P_M),只要挤压压力 P 满足 $P_{SC} < P < P_M$ (或 P_{MS}),就可以获得无偏析和无收缩缺陷的完好铸件. 压力主因论虽然能在一定程度解释偏析的形成,但是对偏析的程度没有进行定量研究. Kim 等^[8]通过对比分析加压铸造和常规重力铸造的传热差异,将这种宏观偏析的差异归结为传热的差异:加压铸造强化了工件与模具之间的传热,工件内具有大的横向温度梯度和窄的固液共存区,从而出现正常偏析. 这种观点称为传热主因论. 但是 Schwerdtfeger 和 Heilemann^[9]将已凝固金属的变形与偏析相联系,提出“挤压偏析”的概念:当正在凝固的合金受到一个变形力作用变形时,枝晶间的液相和糊状区内的固相就有可能发生相互相对运动,由于他们的成分不同,从而导致偏析的出现,并以碳钢锭轧制变形为例进行实验研究,揭示了其形成机理,建立了简单的数学模型,使“应变诱发论”得到了一定发展. 这一观点称为应变诱发主因论. 至今为止,即使是最简单的挤压铸造条件下,压力、应变和传热,谁是溶质偏析的主因并没有定论,间接挤压铸造条件下的偏析规律和特点研究很少,特别是对于各个工艺参数的影响显著性和参数间的交互作用研究未见报道,很有必要系统研究挤压铸造条件下工艺因素对溶质偏析的影响规律. 本文以 6066 铝合金轮形件为研究对象,采用正交设计,较系统地研究间接挤压铸造工艺条件对硅偏析的影响规律.

1 实验材料及方法

实验选用如图 1 所示的轮形件为试件,用复合挤压铸造工艺成形试件(模具如图 2),其轮缘部分视为工件,轮辐部分视为内浇道,轮心部分视为工艺余料和集渣部分. 可见,该轮形试件的成形方式结合了直接挤压铸造与间接挤压铸造. 轮心的部分金属液受到压头压力的直接作用,属于直接挤压铸造,而轮缘部分属于间接挤压铸造. 合金液通过轮辐部分填充轮缘部分,轮缘被充满后,压力通过轮辐传递到轮缘. 对于轮缘部分来说,轮辐可以看作是内浇道.

实验采用 6066 铝合金,其成分见表 1. 用电阻炉熔炼,用 C2C16 除气(用量为铝液质量的 0.2%). 达到要求的浇注温度后取样进行成分分析,并浇入挤压铸造轮形试件模具的压室内,随后迅速以设定的挤压速度将铝合金液推入模腔,充满轮缘后按设定压力保压,凝固成形. 完全凝固后,顶出试件,冷却后沿直径方向纵向解剖,对轮缘部分中央位置(热节位置)硅的

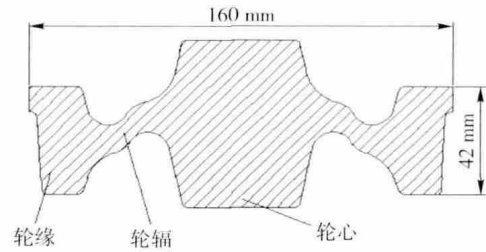
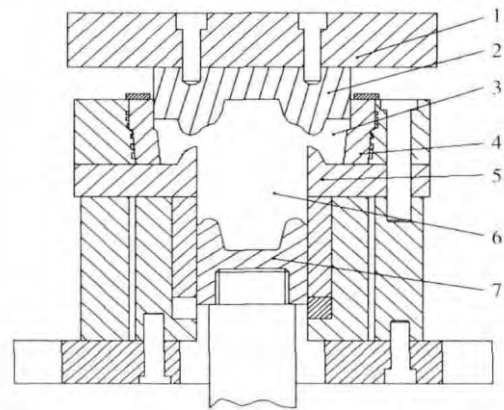


图 1 零件图

Fig. 1 Drawing of the part

质量分数进行测定,每个件取沿圆周均布的三个测试点,取样示意图如图 3,检测位置如图 4. 实验所用的成形设备为 200 t 立式挤压铸造机,最大可以对合金液产生 60 MPa 的压强;模具预热温度控制在 $(200 \pm 10)^\circ\text{C}$ 范围,保压时间为 15 s.



1—上模板; 2—上模; 3—模腔; 4—模套; 5—下模; 6—压室; 7—压头

图 2 模具原理图

Fig. 2 Principle diagram of the mold

表 1 合金成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of the alloy							%
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
0.6	0.35	0.3	0.15	0.9	0.1	0.1	余量

模具原理如图 2 所示,首先合金液浇入压室 6 中,然后上下模合模,压头 7 向上运动,在压头的推力作用下,合金液先接触上模后通过轮辐填充轮缘部分. 纯铜的导热率比模具钢的导热速率高许多,所以纯铜的冷却速度比模具钢的要大. 实验通过改变模套 4 材料种类实现模具冷却速度的变化.

采用四因素二水平有交互作用的正交设计表 18(27)进行实验设计,来研究挤压压力、速度、浇注温度、冷却速度等四个挤压铸造工艺参数及它们之间的一级交互作用对硅偏析影响的显著性和影响趋势. 挤压压力为 20 MPa 和 50 MPa,挤压速度为 $35 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,冷却方式为铜模套和模具钢模套,浇注温度为 680°C 和 730°C . 挤压铸造的特点就是合金液在

压力下充型并凝固,所以考虑交互的因素有挤压压力与挤压速度的交互作用,计作 A × B. 挤压压力与冷却速度的交互作用,计作 A × C,因素水平见表 2.

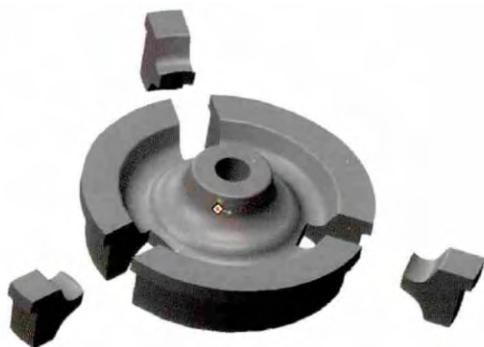


图3 取样示意图

Fig. 3 Schematic illustration of sampling

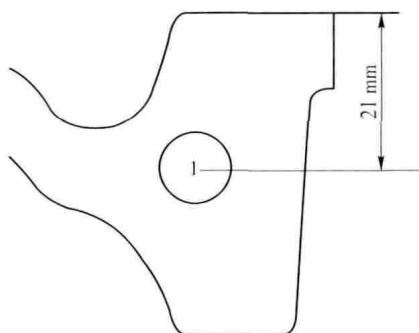


图4 检测位置

Fig. 4 Position of detection

表2 因素水平表

Table 2 Factors and levels

因素水平	A, 挤压压力/MPa	B, 挤压速度/(mm·s ⁻¹)	C, 冷却方式	D, 浇注温度/℃
1	20	35	纯铜	680
2	50	50	模具钢	730

以成形零件三个均匀分布部位 Si 的质量分数,作为观测值. 实验采用直读式光谱仪来检测不同位置 Si 的质量分数. 每一次实验浇注前对合金液取样并测定 Si 的质量分数,作为合金的初始溶质质量分数,计作 ω_0 . 零件成形后,在其热节位置测定的 Si 溶质质量分数,计作 ω_i , $i=1, 2, 3$.

2 实验结果

合金在凝固过程中发生的化学成分不均匀现象称为偏析^[10]. 实验以零件的热节位置测定的 Si 元素质量分数与浇注前 Si 元素质量分数的差值 ω' 的正负作为正负偏析的判断标准,如式(1). 若 ω' 为正则偏析为正偏析,若 ω' 为负则偏析为负偏析. ω' 绝对值的大小表征偏析的程度. 实验检测结果如表 3.

$$\omega' = \omega_i - \omega_0 \quad (1)$$

从表 3 中可看出热节位置硅存在正偏析或负偏析. 以热节位置 Si 的质量分数作为实验评判指标,研究挤压工艺参数对热节位置 Si 质量分数的影响,进而研究挤压工艺参数对热节位置 Si 偏析的影响. $\bar{\omega}'$ 为每个试样三个测点的 Si 元素质量分数与初始溶质质量分数 ω_0 差值的平均值,其值的正负可以表示零件的正负偏析.

表3 Si 元素检测结果(质量分数)

Table 3 Detection results of Si content %

试样号	ω_0	ω_1	ω_2	ω_3	$\bar{\omega}'$	偏析类型
1	0.813	0.647	0.647	0.560	-0.195	负偏析
2	0.787	0.759	0.819	0.847	0.021	正偏析
3	0.763	0.997	1.030	0.985	0.241	正偏析
4	0.877	0.658	0.670	0.608	-0.232	负偏析
5	0.837	0.543	0.503	0.565	-0.300	负偏析
6	0.891	0.764	0.845	0.754	-0.103	负偏析
7	0.871	0.841	0.784	0.753	-0.078	负偏析
8	0.848	0.615	0.534	0.557	-0.279	负偏析

把表 3 的数据代入正交表 4 中,进行重复观测值的正交表直观分析.

比较表 4 中各因素的极差 H_j 值可见: 对零件热节位置硅质量分数影响最显著的因素是浇注温度(因素 D),既不是挤压压力,也不是挤压速度;挤压压力(因素 A)和挤压速度(因素 B)有重要影响,但其显著程度次于浇注温度;冷却速度(因素 C)的影响显著性较小,与挤压速度和压力的交互作用(因素 A × B)的影响作用相当.

分别以各因素水平为横坐标,硅元素质量分数的平均值为纵坐标,可以绘制各因素对硅质量分数的影响趋势图,如图 5 ~ 图 8.

由图 5 可见,随着浇注温度的升高,热节位置 Si 的质量分数在升高并逐渐靠近浇注前的 Si 含量,也就是 Si 的偏析程度在降低,甚至由低浇温时负偏析转变为正偏析即零件热节位置 Si 的质量分数值大于合金浇注前的 Si 质量分数. 由图 6 可知: 在挤压压力为 20 MPa 和 50 MPa 的作用下,热节位置 Si 的质量分数均低于浇注前 Si 质量分数,即出现负偏析;随着挤压压力的提高, Si 质量分数在降低并逐渐偏离浇注前的 Si 质量分数,即负偏析程度增大.

由图 7 可知,在挤压速度为 35 mm·s⁻¹ 和 50 mm·s⁻¹ 时,零件热节位置 Si 出现负偏析. 随着挤压速度的提高,零件热节位置 Si 的质量分数在增加逐渐接近于浇注前的 Si 质量分数,负偏析的程度减小. 由图 8 可知,冷却速度对 Si 质量分数的影响不大. 在两种冷却

表 4 正交表实验结果分析

Table 4 Analysis of experimental results of the orthogonal table

序号	影响因素							偏析度/%			
	A	B	A × B	C	A × C	D	B × C	ω_1	ω_2	ω_3	$\sum \omega_i$
1	1	1	1	1	1	1	1	0.647	0.647	0.560	1.854
2	1	1	1	2	2	2	2	0.759	0.819	0.847	2.452
3	1	2	2	1	1	2	2	0.997	1.030	0.985	3.012
4	1	2	2	2	2	1	1	0.658	0.670	0.608	1.936
5	2	1	2	1	2	1	2	0.543	0.503	0.565	1.611
6	2	1	2	2	1	2	1	0.764	0.845	0.754	2.363
7	2	2	1	1	2	2	1	0.841	0.784	0.753	2.378
8	2	2	1	2	1	1	2	0.615	0.534	0.557	1.706
I_j	9.254	8.280	8.390	8.855	8.935	7.107	8.531				
II_j	8.058	9.032	8.922	8.457	8.377	10.205	8.781				
k_j	4	4	4	4	4	4	4				
$I_j/3k_j$	0.771	0.690	0.699	0.738	0.745	0.592	0.711				
$II_j/3k_j$	0.672	0.753	0.744	0.705	0.698	0.850	0.732				
H_j	1.196	0.752	0.532	0.398	0.558	3.098	0.250				
主次顺序	D > A > B > A × C > A × B > C > B × C										
最优组合	A1B2C1D2										

注: I_j —第 j 列“1”水平所对应的实验指标 $\sum \omega_i$ 的数值之和 $j=1, 2, \dots, 7$; II_j —第 j 列“2”水平所对应的实验指标 $\sum \omega_i$ 的数值之和; k_j —第 j 列同一水平出现的次数, 等于实验次数除以第 j 列的水平数; $I_j/3k_j$ —第 j 列“1”水平所对应的实验指标的平均值; $II_j/3k_j$ —第 j 列“2”水平所对应的实验指标的平均值; H_j —第 j 列的极差, 等于第 j 列各水平所对应的实验指标平均值中最大值减去最小值。

速度下, 零件热节位置的 Si 出现负偏析. 纯铜模套的冷却速度大于模具钢模套的冷却速度, 所以可得出随着冷却速度的降低, 热节位置 Si 的质量分数在减小, 逐渐偏离浇注前 Si 质量分数, 零件热节位置 Si 负偏析增大。

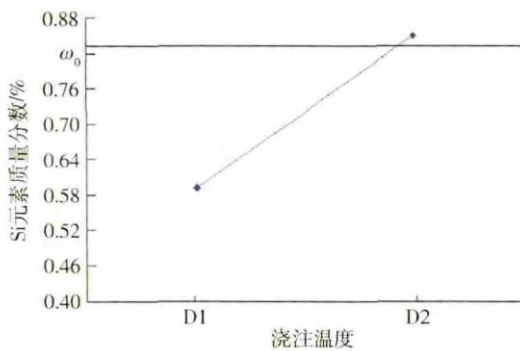


图 5 浇注温度对 Si 质量分数的影响

Fig. 5 Effect of pouring temperature on the Si content

3 分析讨论

3.1 间接挤压铸造中硅偏析的形成过程

在间接挤压铸造中, 溶质原子硅的再分布有三个阶段. 第一阶段是在压室内重力作用下凝固过程发生的硅的富集. 铝合金液浇入压室后, 在开始加压前, 压

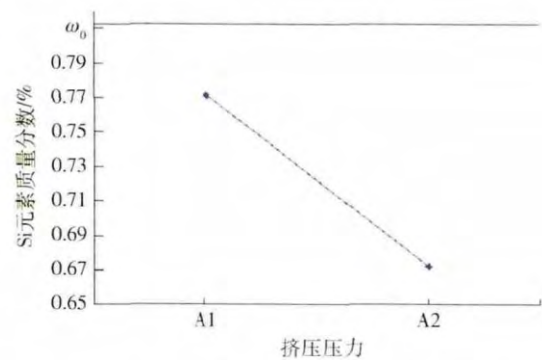


图 6 挤压压力对 Si 质量分数的影响

Fig. 6 Effect of squeeze pressure on the Si content

室内壁会形成一层凝固壳. 同时浇注过程中动量引起压室内合金液的对流, 在对流作用下使得凝固排出的硅在液相中的分布基本均匀. 这一阶段硅的排出取决于凝固相的多少. 如果压室内的凝固相较多, 相应地残余液体中硅质量分数就高, 相反则反之; 不管怎样, 压室内液相中硅质量分数会高于浇注时的硅质量分数. 第二阶段是加压充填模腔期间. 压室内的合金液在压力作用下, 液相与固相共同被挤入型腔. 液流与模具接触发生凝固, 排出 Si 原子. 同时, 合金液中凝固晶粒长大也排除 Si 原子. 这个阶段时间长短取决于挤压速度. 挤压速度越小, 充满模腔的时间就越长, 也就

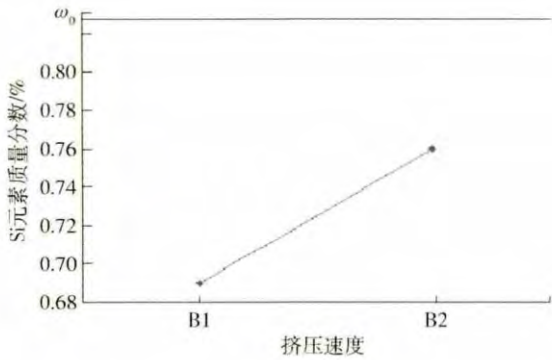


图7 挤压速度对 Si 质量分数的影响

Fig.7 Effect of squeeze speed on the Si content

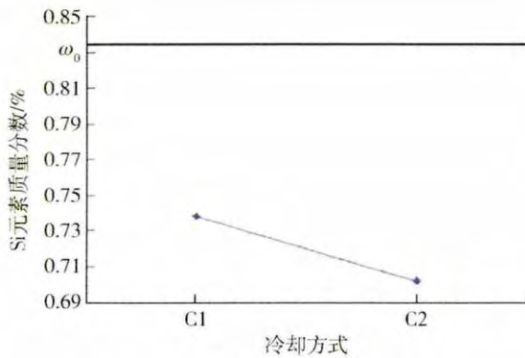


图8 冷却方式对 Si 质量分数的影响

Fig.8 Effect of cooling type on the Si content

是充型过程增加的凝固量也越多,进一步使残余液相中硅质量分数提高。第三阶段是保压凝固期间,在合金液充满型腔后,合金液在压力作用下发生流变以及凝固。这个阶段工件受到的是三向压应力,但是,伴随着凝固的进行,工件体积减小,在压力作用下,液相或固液混合物就会向收缩部位流动实现补缩。可见,正是这种补缩流的方向决定了偏析的类别和程度。

图9(a)中晶粒比图9(b)中晶粒较粗大,而且晶粒没有完整的晶界包围,共晶成分较聚集。图9(b)中晶粒较小,晶粒有完整的晶界包围。在凝固过程中,零件热节位置的固相在不断增加,液相在不断减少,枝晶间的补缩通道是会改变的。首先,零件热节位置的残余液相在压力作用下对零件其余部分的收缩体积进行补缩。然后,在内浇道的枝晶间的通道封闭之后,补缩通道内的固相和液相混合液对热节位置的收缩体积进行补缩。在没有残余液相补缩的情况下,压力作用使固相发生少量塑性变形,同时热节位置的残余液相被挤压聚集。这样使得热节位置的固相晶粒在压力作用下相互挤压,部分晶界消失,部分晶粒相互连通。远离热节位置的部位,随着凝固的进行,含Si量高的残余液相在压力作用下对先凝固部分收缩的体积进行补缩。由实验可知在硅偏析形成过程的第三阶段中,凝固体积收缩的部分不是完全由残余液相补充,而是由

凝固相发生塑性变形补充。

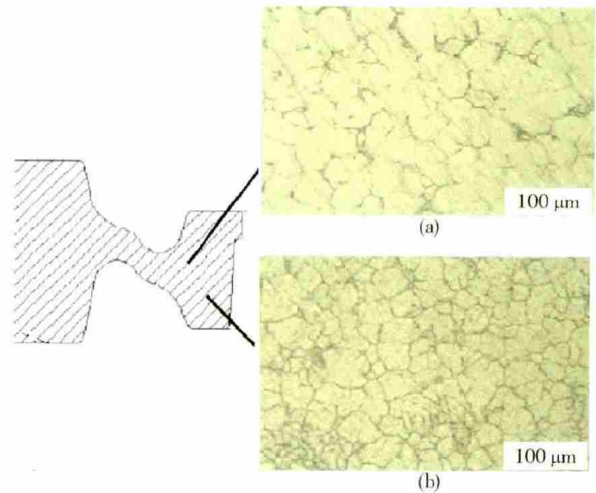


图9 不同位置的组织。(a)热节位置的组织;(b)边缘位置的组织

Fig.9 Microstructures of different positions: (a) hot spot zone; (b) edge

3.2 热节位置负偏析的形成机理

由表3看出,在正交设计的实验结果中,绝大多数实验结果均为负偏析。硅在铝合金中的平衡分配系数小于1。在重力铸造情况下,随着凝固的进行,高Si质量分数的残余液相逐渐集中在最后凝固区域,热节位置的溶质质量分数是高于先凝固位置的质量分数,即出现的是正偏析。但本实验结果是,在热节位置硅的质量分数低于平均质量分数,即出现负偏析。这一现象在前人的研究中均未见到。

间接挤压铸造中的补缩部分,通过浇道对收缩的部分进行补缩。因为内浇道具有较小的横截面积,所以内浇道比热节位置先凝固。在金属液充满型腔后,合金中液相比固相有更高的流动速度。首先热节位置的含Si量高的残余液相在压力作用下对先凝固部分的体收缩进行补缩,降低了热节位置的Si质量分数。然后在凝固后期,内浇道的凝固相增多,液相逐步减少,枝晶间的通道逐步封闭,同时合金的收缩集中到了零件的热节位置。内浇道中没有含Si量高的残余液相向热节位置收缩部分补缩。随着凝固的进一步进行,在压力的作用下,内浇道中的凝固相包裹着少量的残余液相发生塑性变形,对零件的热节部位进行补缩。热节位置的凝固晶粒相互挤压发生塑性变形,共晶成分被挤压聚集,造成热节位置出现反偏析现象,其过程示意图如图10。

3.3 浇注温度主因论

实验结果可知,零件热节位置的偏析既不支持压力主因论,也不支持传热主因论。事实上,浇注温度主要影响第一阶段的溶质排出量,同时也影响合金液的凝固时间。高的浇注温度下,压室内合金液中的凝固

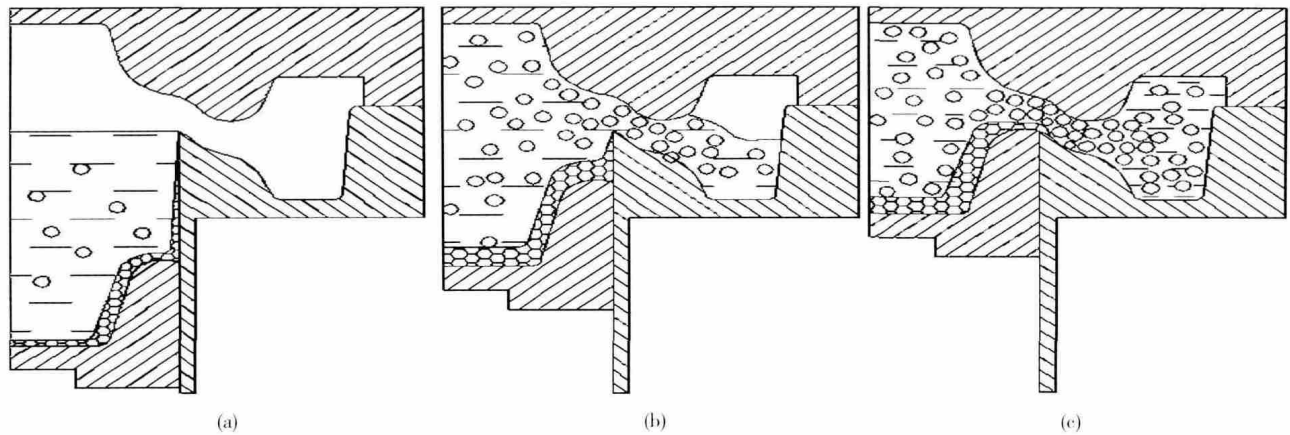


图 10 偏析形成过程示意图. (a) 充型开始; (b) 充型; (c) 凝固补缩

Fig. 10 Formation process of segregation: (a) beginning filling; (b) filling; (c) solidifying and feeding

相比较少,残余液相中 Si 的质量分数相对较低,因此 Si 的偏析程度较小. 低的浇注温度不仅含有较多的凝固相,而且会使内浇道中枝晶间的通道更早的封闭,因而造成较多的低含 Si 固相的流变补缩, Si 的偏析程度增大. 挤压压力对 Si 偏析影响的显著性仅次于浇注温度. 随着挤压压力的增大,热节位置内更多含 Si 量高的残余液相去补缩先凝固相的体收缩,使得热节位置的 Si 质量分数减少. 同时随着挤压压力的增大,内浇道区域发生塑性补缩的程度增大,被挤进热节位置的凝固相增大,补缩体积的含 Si 量减少. 所以随着挤压压力的增大, Si 的偏析增大. 这与前人的研究相同,但是偏析的类型不同. 本实验中 Si 的偏析是负偏析而前人的研究为正偏析,其原因是由于他们选用了较高的浇注温度. 由图 5 可见,高的浇注温度可出现正偏析.

挤压速度影响在充型过程中 Si 偏析,即第二个阶段. 液流与模具接触发生凝固,排出硅原子. 挤压速度越小,充满模腔的时间就越长,也就是充型过程增加的凝固量也越多,进一步使残余液相中硅质量分数提高. 所以挤压速度越小, Si 的偏析程度越大.

由此可见,间接挤压铸造铝合金 Si 的偏析出现在整个挤压铸造过程中. 各个工艺参数对铝合金 Si 偏析的影响规律及影响程度不同. 要想取得成分均匀的零件,必须从挤压铸造工艺的每一步去控制 Si 的偏析.

4 结论

(1) 在间接挤压铸造中,浇注温度是影响零件热节位置硅偏析的主要因素;随着浇注温度的降低,铝合金中 Si 偏析的程度增大. 挤压压力、挤压速度和冷却速度(模具材料)的影响作用都明显小于浇注温度的影响.

(2) 随着挤压压力的增加,铝合金 Si 偏析的程度

增大;提高挤压速度有降低硅偏析程度的作用.

(3) 在间接挤压铸造条件下,工件热节位置硅的偏析类型可以是负偏析.

参 考 文 献

- [1] Gan Y Q, Zhang D T, Zhang W W, et al. Macroseggregation in squeeze-cast Al5Cu0.4Mn alloy based on Taguchi method. *Chin J Nonferrous Met*, 2012, 22(12): 3386
- [2] Britnell D J, Neailey K. Macroseggregation in thin walled castings produced via the direct squeeze casting process. *J Mater Process Technol*, 2003, 138(1-3): 306
- [3] Liu H, Zhao G, Liu C M. Effects of magnesium content on phase constituents of Al-Mg-Si-Cu alloys. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2006, 16(2): 376
- [4] Meng F S, Zhang W W, Zhang W, et al. Research of element segregation to large wheel hub hardness and mechanical properties. *Adv Mater Res*, 2013, 711: 262
- [5] Lee J H, Kim H S, Won C W, et al. Effect of the gap distance on the cooling behavior and the microstructure of indirect squeeze cast and gravity die cast 5083 wrought Al alloy. *Mater Sci Eng A*, 2002, 338(1): 182
- [6] Gallerneault M, Durrant G, Cantor B. The squeeze casting of hypoeutectic binary Al-Cu. *Metall Mater Trans A*, 1996, 27(12): 4121
- [7] Hong C P, Lee S M, Shen H. F. Prevention of macrodefects in squeeze casting of an Al-7 wt pct Si alloy. *Metall Mater Trans B*, 2000, 31(2): 297
- [8] 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 Mater Synth Process*, 1998, 6(2): 75
- [9] Schwerdtfeger K, Heilemann J. Squeezing segregation: investigation with laboratory experiments. *ISIJ Int*, 2006, 46(1): 70
- [10] Martorano M A, Ferreira Neto J B, Oliveira T S, et al. Macroseggregation of impurities in directionally solidified silicon. *Metall Mater Trans A*, 2011, 42(7): 1870