

# 不同充型条件下应力框铸件的力学性能

## Mechanical Properties of Stress Frame Casting Under Different Filling Conditions

樊振中,熊艳才,洪润洲

(北京航空材料研究院,北京 100095)

FAN Zhen-zhong, XIONG Yan-cai, HONG Run-zhou

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 通过实验与数值模拟方法研究了自由充型和低压浇注两种充型方式对 A357 铝合金应力框铸件铸态组织的影响,并采用拉伸实验、SEM 和 EDS 对 T6 热处理后两种铸件的力学性能及断口形貌进行了观察。结果表明:采用低压浇注可以减少铸件的区域缩松与微观缩孔,A357 铝合金铸态断裂以沿晶断裂为主,裂纹起源于组织缺陷处并不断生长增殖直至铸件发生断裂;T6 热处理后铸件主要发生韧窝断裂,断口上交错分布一定数量的沿晶断裂,华铸 CAE 数值模拟研究证实了低压浇注充型方案的优越性。

**关键词:** 低压浇注;力学性能;应力框铸件;A357 铝合金;华铸 CAE

**中图分类号:** TG244<sup>+</sup>.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)09-0028-07

**Abstract:** The influence of gravity filling and low-pressure filling on the cast structure of A357 aluminum alloy stress frame was investigated by test and numerical simulation methods. The mechanical properties and fracture morphology of two castings were also observed with the use of tensile test, SEM and EDS after T6 heat treatment. The results indicate that low-pressure filling can reduce the casting shrinkage and micro-cavity region. Crystal fracture is the principal split pattern of A357 aluminum alloy in casting state, cracks appear and fast grow until casting fracture from the defect area. Dimple rupture is the main fracture factor with some crystal fracture after T6 heat treatment. China cast CAE simulation study confirms that the low-pressure filling is superiority.

**Key words:** low-pressure filling; mechanical property; stress frame casting; A357 aluminum alloy; China cast CAE

铝硅系铸造铝合金具有流动性好、气密性好、收缩率低和热裂倾向小等特点,经过变质与热处理后,具有良好的力学性能、物理性能、耐蚀性能和机械加工性能,是应用最为广泛的一类铸造合金<sup>[1]</sup>。A357 铸造铝合金具有较好的充型流动性与力学性能,常用来生产形状复杂、承受中等载荷的工程构件,在航空航天领域得到了广泛的应用与发展<sup>[2]</sup>。

目前国内关于 A357 铸造铝合金力学性能的研究开展较多<sup>[3]</sup>,研究对象一般选取为应力框铸件,这些研究往往侧重于热处理温度、热处理时间,合金变质元素添加,共晶硅粒子形貌、排列、取向等对 A357 铝合金铸件力学性能的影响<sup>[4-9]</sup>,而针对充型方式对铸件力学性能影响的研究报道较少。

在 A357 铝合金铸件的实际生产过程中,浇注充型阶段往往由于紊流、卷气而产生的夹杂、粘砂、缩松、缩孔等铸造缺陷,降低了铸件的力学性能。本工作以

应力框铸件为研究对象,分别考察了低压浇注与自由充型条件下 A357 铝合金应力框铸件的力学性能,并在此基础上研究了 T6 热处理后的力学性能,结合实验参数,采用华铸 CAE 软件对应力框铸件的低压浇注与自由充型过程进行了数值模拟。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

应力框铸件的尺寸如图 1 所示,图 1(a)为三维形状示意图;图 1(b)为三维尺寸示意图。实验所用合金为 Al-Si-Mg 系 A357 铸造铝合金,其化学成分见表 1。

实验分别采用低压浇注与自由充型,自由充型下直浇道、横浇道、内浇道的浇道截面比设计为 1:1.6:2.5;低压浇注下直浇道与内浇道的截面比为 1.7:1,低压浇注工艺参数如表 2 所示。为减少其他

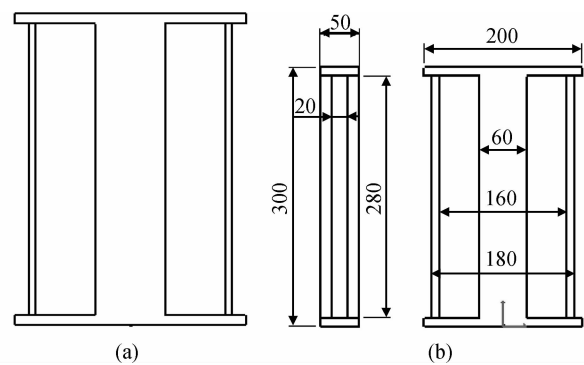


图 1 应力框铸件尺寸 (a)形状示意图;(b)三维尺寸示意图  
Fig. 1 The dimension of stress frame casting  
(a)shape diagram;(b)three dimensional size diagram

表 1 A357 铸造铝合金的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of A357 aluminum alloy (mass fraction/%)							
Si	Mg	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	Al
6.85	0.56	0.13	0.10	0.08	0.08	0.05	Bal

部位对应应力框铸件充型过程的影响,浇注系统去除了冒口。图 2(a)为自由充型浇注系统;图 2(b)为低压浇注充型系统,A357 铸造铝合金的熔炼工艺如下:合金液熔炼→加镁加钛→升温→过热处理→降温→精炼除气→浇注。

表 2 低压充型工艺参数

Table 2 The process parameters of low-pressure filling

Filling speed/ (mm · s <sup>-1</sup> )	Crust time/s	Crust boost speed/(kPa · s <sup>-1</sup> )	Crust boost pressure/kPa	Liters liquid pressure/kPa	Filling pressure/kPa	Drag coefficient
35	5	1	2	5	30	10

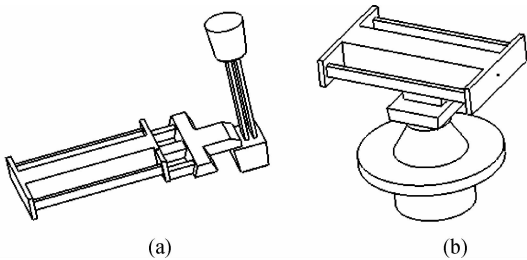


图 2 应力框铸件浇注系统 (a)自由充型;(b)低压充型  
Fig. 2 The gating system of stress frame casting  
(a)gravity filling;(b)low-pressure filling

1.2 实验方法

为了对比自由充型与低压浇注对应应力框铸件力学性能的影响,铸态与热处理态拉伸试样取样位置相同,自由充型下拉伸试样分别取自应力框铸件的厚杆近浇道、厚杆远浇道与细杆部位,如图3(a)所示;低压浇注

下对应取自应力框铸件的厚杆两侧与细杆部位,如图 3(b)所示,每个部位分别制备 3 个拉伸试样。细杆部位制取成标准  $\phi 5\text{mm}$  拉伸试棒;厚杆部位则制备为标准  $\phi 10\text{mm}$  拉伸试棒。试样制备完成后,用 800# 砂纸打磨试样表面,消除表面机械加工划痕。A357 铸造铝合金采用航标 5446—T6 热处理制度,如表 3 所示<sup>[10]</sup>。

表 3 A357 铸造铝合金热处理制度

Table 3 Heat treatment of A357 cast aluminum alloy

Heat treatment	Solution temperature/℃	Solution time/h	Aging temperature/℃	Aging time/h
T6	540±3	8	165±3	7

1.3 测试与表征

力学性能实验在 WDW-100KN 试验机上完成,夹头移动速度为 2mm/min。采用光学显微镜观察 A357 铝合金铸件铸态与 T6 热处理后的微观组织,拉伸试样的断口形貌利用 FEI-Quanta 600 扫描电子显微镜分析;使用 IN-CAx-sight 6247 能谱分析仪对拉伸断口进行面元素含量标定。

2 实验结果与分析

2.1 微观组织与力学性能测试

图 4 为应力框铸件自由充型与低压浇注下铸态及 T6 热处理后的微观组织示意图,由图 4(a),(c)可知

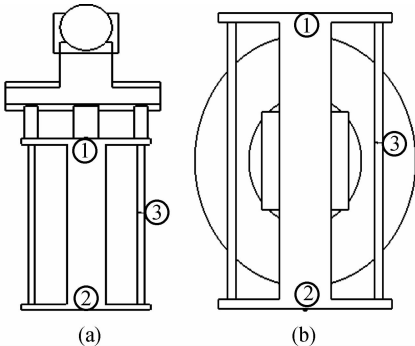


图 3 拉伸试样取样位置 (a)自由充型;(b)低压充型  
Fig. 3 Sampling location of tensile specimen  
(a)gravity filling;(b)low-pressure filling

自由充型下铸件铸态与 T6 热处理后内部存在微观缩孔;低压浇注下铸件内部组织均匀致密。自由充型下应力框铸件的厚杆近浇道、厚杆远浇道与细杆部位及低压浇注下的厚杆两侧部位与细杆部位分别由图 5 横坐标中的数字 1、2、3 表示,力学性能测试结果取自各部位 3 个拉伸试样的平均值。自由充型与低压浇注下铸件的厚杆近浇道部位(图 5 横坐标 1 表示)铸态及

T6 热处理后的抗拉强度与伸长率相差最大;自由充型与低压浇注下铸件细杆部位(图 5 横坐标 3 表示)铸态及 T6 热处理后抗拉强度与伸长率相差最小,A357 铝合金应力框铸件自由充型与低压浇注下力学性能最高值均出现在细杆部位,铸态下抗拉强度  $\sigma_b$  为 155MPa,伸长率  $\delta$  为 4%;T6 热处理后抗拉强度上升至 338MPa,伸长率增至 4.5%。

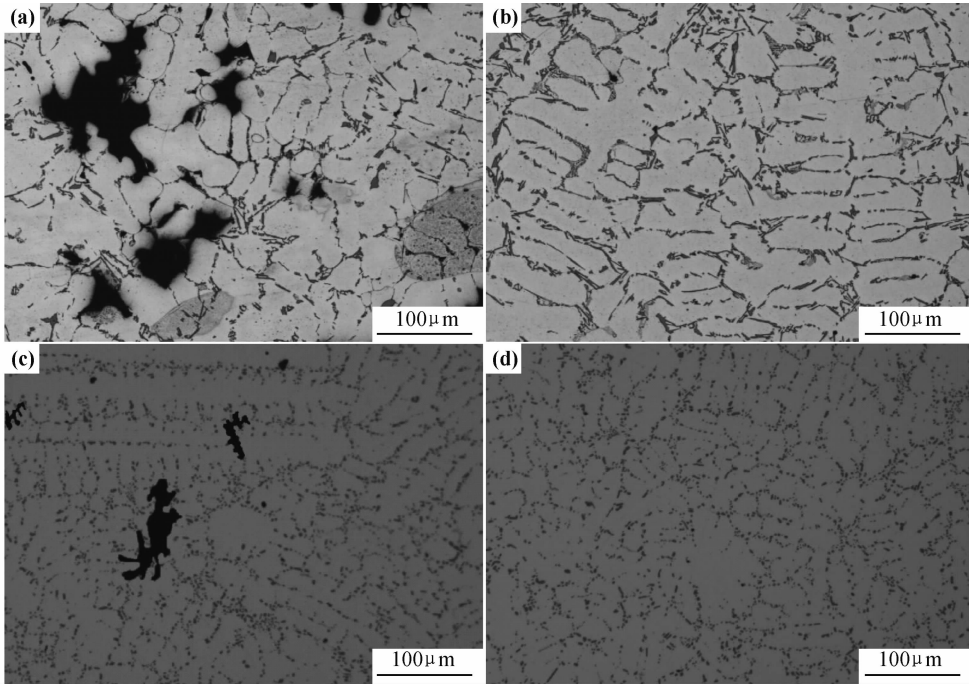


图 4 应力框铸件微观组织形貌

(a)自由充型铸态;(b)低压浇注铸态;(c)自由充型热处理态;(d)低压浇注热处理态

Fig. 4 The microstructure morphology of stress frame casting

(a)cast state under gravity filling;(b)cast state under low-pressure filling;  
(c)heat treatment under gravity filling;  
(d)heat treatment under low-pressure filling

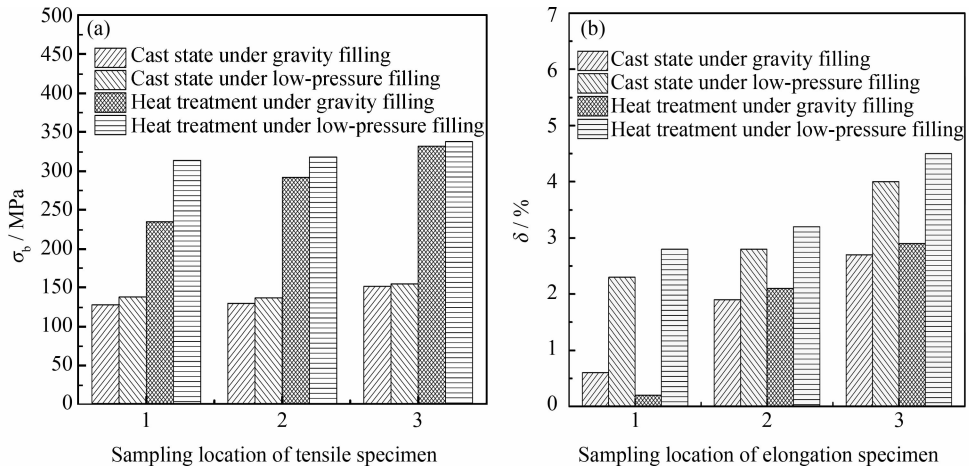


图 5 应力框铸件力学性能测试 (a)抗拉强度;(b)伸长率

Fig. 5 The mechanical testing of stress frame casting

(a)tensile strength;(b)elongation

## 2.2 断口形貌与 EDS 分析

### 2.2.1 铸态断口形貌

拉伸试样铸态断口如图 6 所示。图 6(a)为自由充型细杆部位断口 SEM 形貌,可以看出自由充型下细杆部位以沿晶断裂为主,应力集中分布于晶粒边界处,引发脆性初生 Si 粒子与共晶 Si 粒子破碎,随后裂纹沿晶界扩展生长直至试样断裂。自由充型下铸件厚杆近浇道部位的断口形貌如图 6(b)所示,分析可知铸件厚杆近浇道部位自由充型下最后发生凝固,溶解在

A357 合金液内的有限氢气( $H_2$ )及浇注初期因卷气而引入的气体在凝固后期富集于此,先行析出的初生  $\alpha$ -Al 基体在凝固后期未得到有效补缩导致该部位产生微观缩孔与区域缩松,拉伸实验时该区域作为裂纹源首先引起应力集中,缩松区域附近的初生  $\alpha$ -Al 基体直接剥离断裂,劣化了力学性能。铸件厚杆远浇道部位自由充型下处于整个浇注流程末端,充型过程中在此处产生的漩涡与紊流直接冲击砂型及其表面涂料,易产生夹杂缺陷(见图 6(c)),影响该处的力学性能。

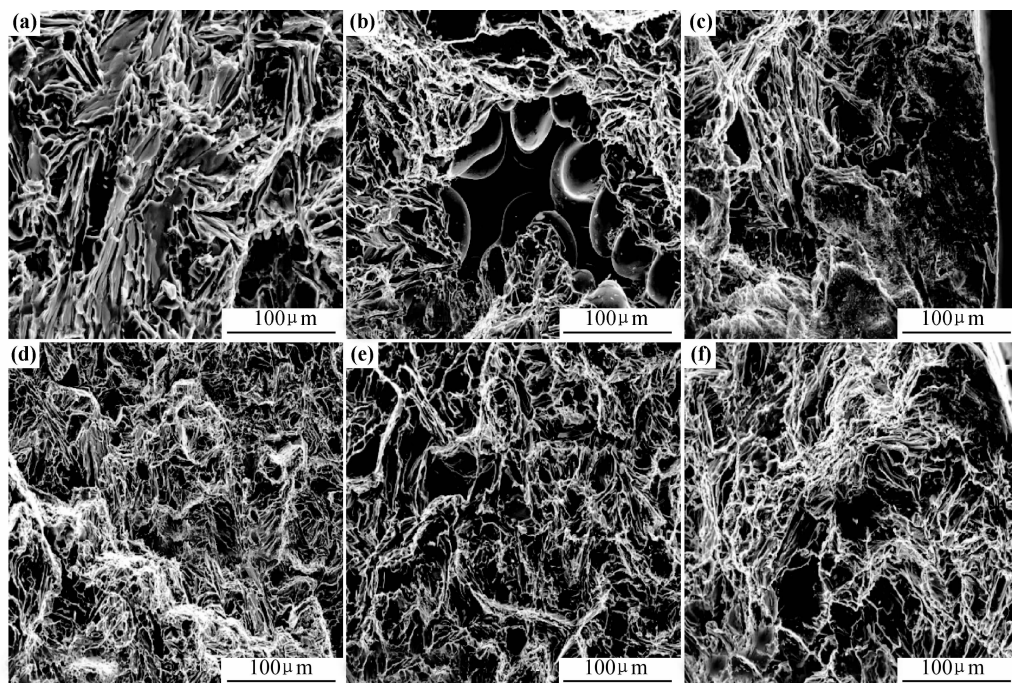


图 6 铸态断口 SEM 形貌 (a)自由充型细杆部位;(b)自由充型厚杆近浇道;(c)自由充型厚杆远浇道;  
(d)低压浇注细杆部位;(e),(f)低压浇注厚杆两侧部位

Fig. 6 The SEM morphology of cast fracture (a)thin pole under gravity filling;(b)thick pole near runner under gravity filling;  
(c)thick pole away runner under gravity filling;(d)thin pole under low-pressure filling;(e),(f)bilateral under low-pressure filling

由图 6(d)可以观察到此时拉伸试样断口表面分布着脱粘共晶 Si 颗粒和由 Si 颗粒脱落后形成的凹坑,白色点状共晶 Si 颗粒沿枝晶边缘分布,表明低压浇注下应力框铸件细杆部位仍以沿晶断裂为主。低压浇注下铸件厚杆两侧部位拉伸试样的断口形貌分别如图 6(e)与图 6(f)所示,与细杆部位相比,由于低压浇注下铸件厚杆处于冷却凝固后期,因此微观缩孔与氧化夹层易在铸件厚杆中心处出现(见图 6(f)),单轴拉伸状态下厚杆两侧部位断口表面分布了大量由  $\alpha$ -Al 基体剥落而产生的凹坑(见 6(e))。

自由充型下铸件厚杆近浇道部位的 EDS 分析如图 7(a)所示,可知铸件厚杆近浇道部位先行析出的初生  $\alpha$ -Al 基体在凝固后期未得到有效补缩导致该部位产生了微观缩孔与区域缩松。图 7(b)为低压浇注

下厚杆两侧部位拉伸试样断口 EDS 分析,由图可知断口裂纹扩展处 Al 占 60.16%(原子分数,下同);Si 占 38.82%,分析可知此时的裂纹扩展是沿着二元共晶体(Al-Si)与三元共晶体(Al-Si-Mg<sub>2</sub>Si)的晶界进行,裂纹区域邻近的破碎初生 Si 粒子与共晶 Si 粒子形成团簇,抑制了应力的过度集中与裂纹的快速扩展。

John A. Francis<sup>[11]</sup>研究指出当铸件内部某些区域存在一定数量的微观组织缺陷时,铸件的破坏首先起始于缺陷处,随后裂纹绕过缺陷周围临近的共晶硅粒子团簇,并不断从该处增殖生长直至铸件断裂。与自由充型相比,低压浇注充型工艺参数可控,减少了铸件内部区域缩松与微观缩孔等组织缺陷的数量,因此可以获得较高的力学性能。

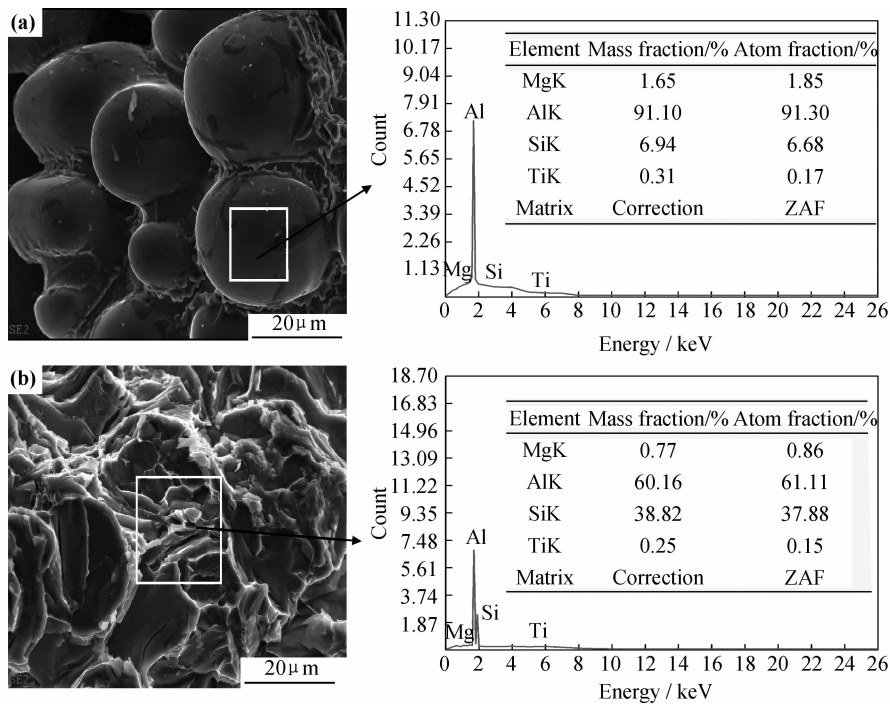


图 7 铸态断口 EDS 分析 (a)自由充型厚杆近浇道;(b)低压浇注厚杆两侧部位

Fig. 7 The EDS analysis of cast fracture

(a)thick pole near runner under gravity filling;(b)bilateral under low-pressure filling

2.2.2 T6 热处理断口形貌

图 8 为拉伸试样 T6 热处理断口 SEM 形貌。A357 铝合金应力框铸件自由充型下细杆部位经 T6

热处理后的拉伸断口形貌如图 8(a)所示,断口表面分布了一定数量的韧窝,与图 5 中细杆部位的伸长率经 T6 热处理后得到提高的实验结果相吻合。由图 8(b)

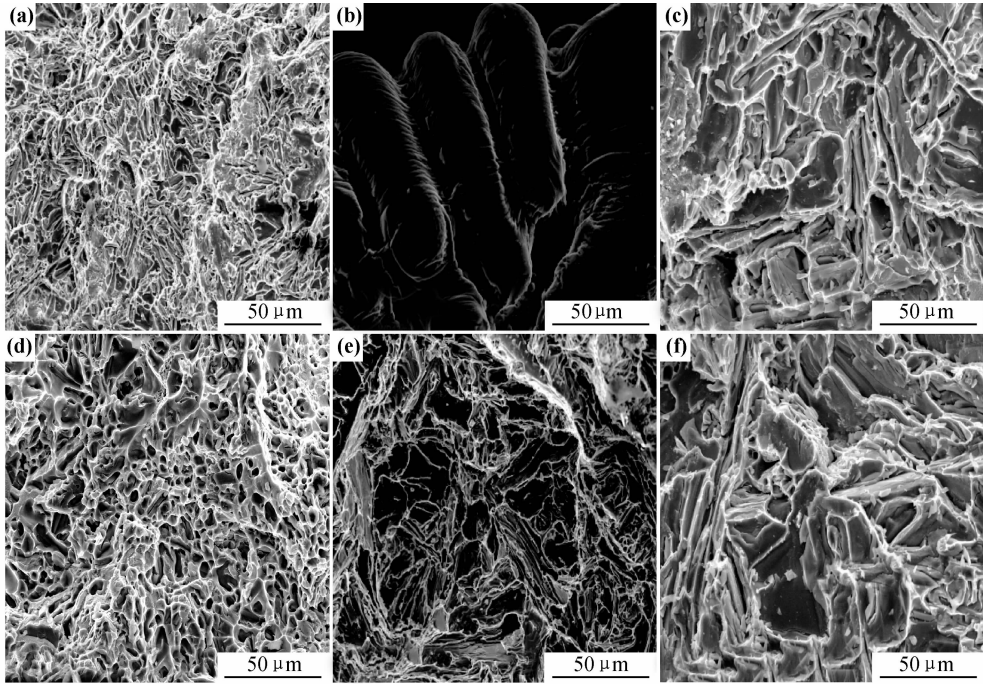


图 8 T6 热处理态断口 SEM 形貌

(a)自由充型细杆部位;(b)自由充型厚杆近浇道;(c)自由充型厚杆远浇道;(d)低压浇注细杆部位;(e),(f)低压浇注厚杆两侧部位

Fig. 8 The SEM morphology of fracture under T6 heat treatment

(a)thin pole under gravity filling;(b)thick pole near runner under gravity filling;(c)thick pole away runner under gravity filling;

(d)thin pole under low-pressure filling;(e),(f)bilateral under low-pressure filling

可知厚杆近浇道部位经 T6 热处理后,微观组织缺陷区域内的初生  $\alpha$ -Al 基体由于表皮受热氧化而产生褶皱,严重劣化了该处的力学性能。自由充型下铸件厚杆远浇道部位经 T6 热处理后断口表面仍以沿晶断裂为主,韧窝分布数量较少,铸造充型过程中所造成的氧化夹杂并未消除,力学性能受到一定程度的影响,如图 8(c)所示。低压浇注下应力框铸件细杆部位 T6 热处理后的断口形貌如图 8(d)所示,断口表面分布了大量韧窝凹坑。由图 8(e),(f)分析可知,低压浇注下铸件厚杆两侧部位经 T6 热处理后,铸件内部的共晶 Si 粒子逐渐由板条状、针状转化为球形,晶粒边界密集细

化,初生 Si 粒子与共晶 Si 粒子为硬脆相,破碎后黏附在断口表面,断口表面分布了一定数量的韧窝凹坑,提升了铸件的力学性能<sup>[12]</sup>。

图 9(a)为自由充型下厚杆近浇道部位 T6 热处理后的 EDS 扫描结果,断口表面元素 Al 占 91.11%(质量分数,下同),Si 占 4.50%,Mg 占 4.39%,与图 7(a)相比,初生  $\alpha$ -Al 基体表面的 Mg 元素产生了一定程度的富集。低压浇注下铸件厚杆两侧部位 T6 热处理后断口表面 EDS 扫描结果如图 9(b)所示,与图 7(b)相比,断口表面的 Al 元素含量由 60.16%降至 57.14%;Si 元素含量由 38.82%上升至 42.19%,说明此时拉伸

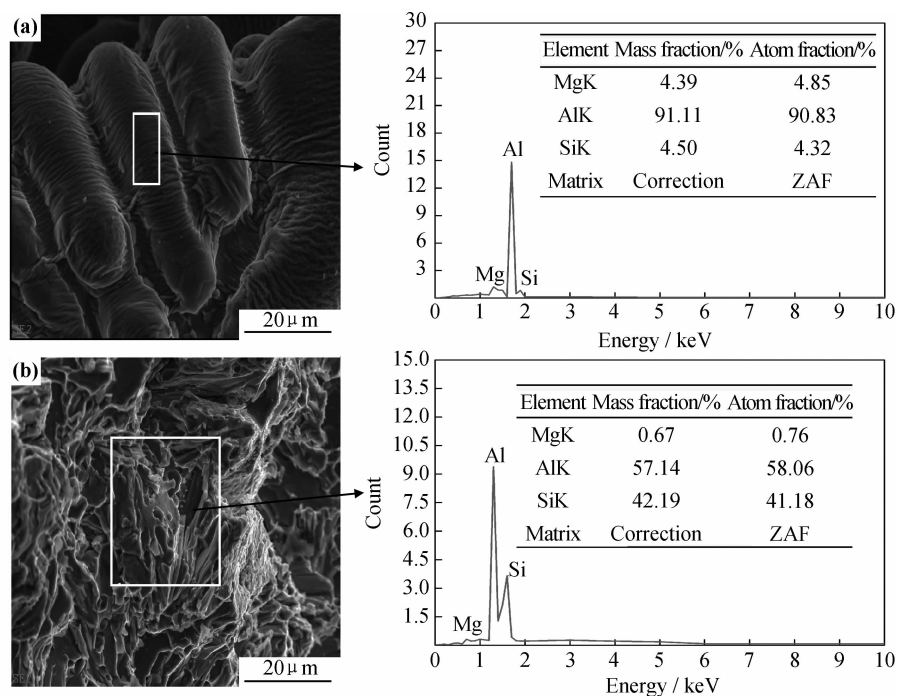


图 9 T6 热处理态断口 EDS 分析

(a)自由充型厚杆近浇道;(b)低压浇注厚杆两侧部位

Fig. 9 The EDS analysis of fracture under T6 heat treatment

(a)thick pole near runner under gravity filling;(b)bilateral under low-pressure filling

试样的伸长率得到了一定程度的提升。

### 2.3 华铸 CAE 数值模拟

采用华铸 CAE10.0 铸造模拟软件对应力框铸件自由充型与低压浇注的充型涡流、定量缩孔与充型压力进行了数值模拟,结果如图 10 所示。模型采用均匀网格剖分,网格大小设置为 2.8mm,剖分数量为 1177600,缩尺比例采用 0.1,铸型/模具/模壳设置为铸型生长,生长厚度为 30mm,生长方向为远原点生长 Z 向;定量缩孔的判据设置为临界孔隙率 0.90%,疏松分界点为 60.00%,缩孔的临界体积设置为 0.40cm<sup>3</sup>,缩松的临界体积为 0.20cm<sup>3</sup>。由图 10(a),(b)可知,自由充型下浇道内共存在 92 个旋度大于

50s<sup>-1</sup>的涡流区,最大旋度为 2652s<sup>-1</sup>,阈值为 50s<sup>-1</sup>;低压浇注下共有 43 个旋度大于 50s<sup>-1</sup>的涡流区,最大旋度为 122s<sup>-1</sup>,阈值为 50s<sup>-1</sup>。应力框铸件自由充型与低压浇注下定量缩孔的数值模拟结果如图 10(c),(d)所示,自由充型下铸件的缩孔总体积为 79.75cm<sup>3</sup>,缩松总体积为 11.59cm<sup>3</sup>,共分布 3 个缩孔,2 个缩松;低压浇注下缩孔总体积为 17.78cm<sup>3</sup>,缩松总体积为 0.00cm<sup>3</sup>,共分布 2 个缩孔,0 个缩松。图 10(e)与图 10(f)分别为自由充型与低压浇注下充型过程内部充型压力的数值模拟结果,可知,自由充型下存在 53 个涉负压区,353 个负压小区,分布有 75 个液流区域,最高压力为 467705Pa,最低压力为 -23755Pa;低压浇注



下存在 2 个涉负压区, 0 个负压小区, 分布有 2 个液流区域, 最高压力为 72932Pa, 最低压力为 -64Pa。由数值模拟结果可知, 低压浇注工艺参数可控, 充型过程平

稳, 不易产生严重的紊流与漩涡, 减少了铸件内部组织缺陷数量与严重程度, 保证了铸件的整体力学性能优于自由充型状态。

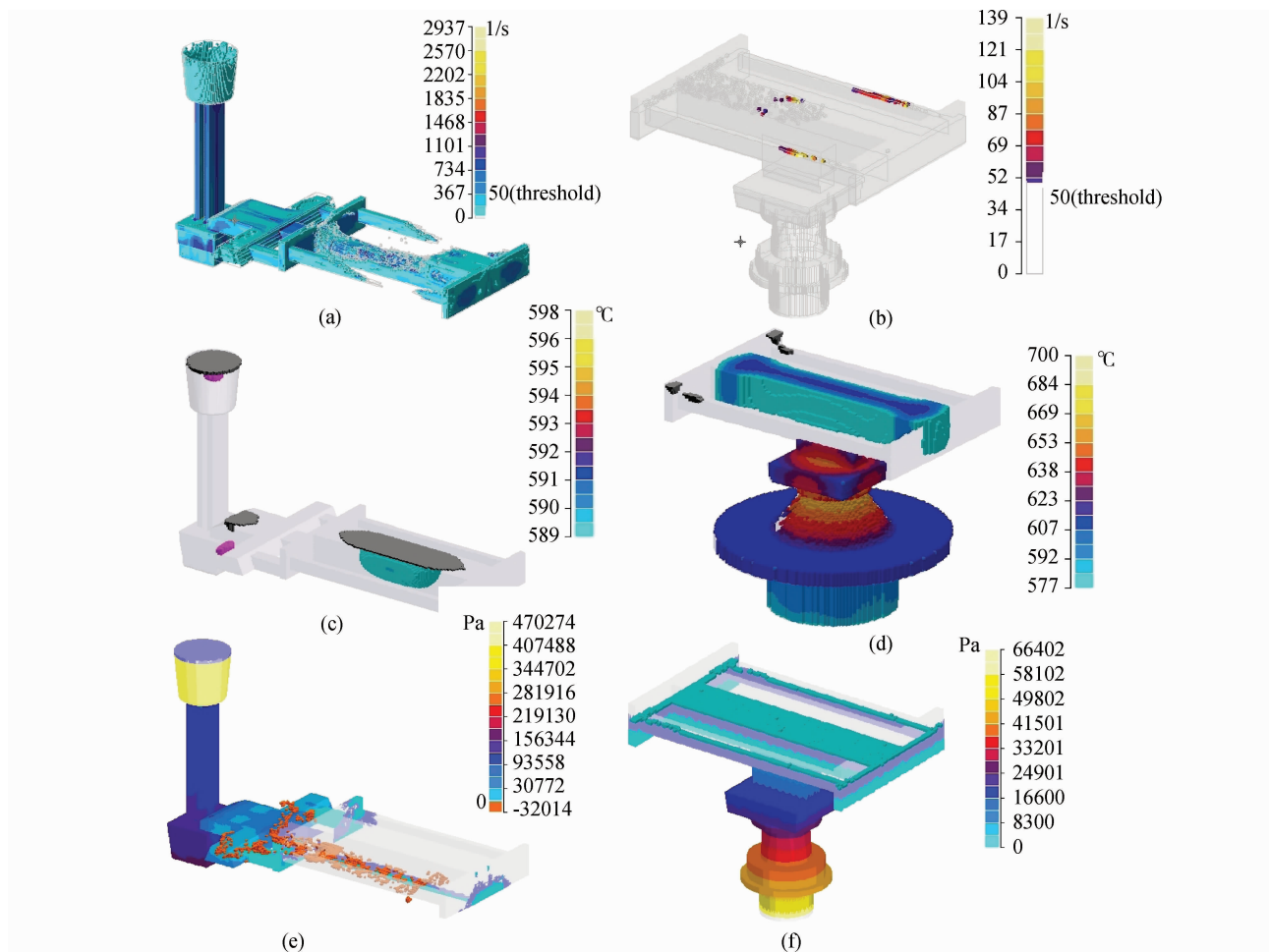


图 10 应力框铸件数值模拟 (a)自由充型涡流;(b)低压浇注涡流;(c)自由充型缩孔;  
(d)低压浇注缩孔;(e)自由充型压力;(f)低压浇注压力

Fig. 10 The numerical simulation of stress frame casting

- (a)the eddy simulation under gravity filling;(b)the eddy simulation under low-pressure filling;  
(c)the shrinkage cavity simulation under gravity filling;(d)the shrinkage cavity simulation under low-pressure filling;  
(e)filling pressure simulation under gravity filling;(f)filling pressure simulation under low-pressure filling

### 3 结论

(1)与自由充型相比, 采用低压浇注充型工艺, 减少了 A357 铝合金应力框铸件内部区域疏松、微观缩孔与氧化夹杂铸造缺陷的数量与严重程度, 提高了铸件的整体力学性能。

(2)A357 铝合金应力框铸件铸态断裂以沿晶断裂为主, 邻近区域内破碎的初生 Si 粒子与共晶 Si 粒子形成团簇, 抑制了裂纹的快速扩展, 区域疏松与微观缩孔等铸造缺陷则加剧了应力集中与裂纹扩展, 降低了铸件的力学性能。

(3)T6 热处理后的 A357 铝合金应力框铸件, 断口形貌以韧窝断裂为主, 交错分布一定数量的沿晶断裂; T6 热处理并未消除铸态缺陷, 反而进一步恶化了缺陷处的力学性能。

(4)华铸 CAE 数值模拟结果表明采用低压浇注可以有效提高 A357 铝合金应力框铸件的充型质量。

### 参考文献

- [1] 熊艳才, 刘伯操. 铸造铝合金现状及未来发展[J]. 特种铸造及有色合金, 1998, (4): 1-5.  
[2] 陈振中, 解传浩, 朱成香. A357 铸造铝合金疲劳特性及热处理的影响[J]. 轻金属, 2010, (7): 58-61. (下转第 38 页)

(2)  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Ag}$  核壳纳米复合材料导电率为  $0.317 \text{ S/cm}$ 。

(3)  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  粒子具有超顺磁性,其饱和磁化强度为  $1.28 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,矫顽力为  $8.2784 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ 。 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ag}$ 核壳粒子饱和磁化强度为  $0.92 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,矫顽力与  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  粒子基本一致。

### 参考文献

- [1] BAO Yu-ping, HECTOR CALDERON, KANNAN M KRISHNAN. Synthesis and characterization of magnetic-optical Co-Au core-shell nanoparticles [J]. *Phys Chem C*, 2007, 111(5): 1941—1944.
  - [2] XU Zhi-chuan, HOU Yang-long, SUN Shou-heng. Magnetic core/shell  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Au}$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Au}/\text{Ag}$  nanoparticles with tunable plasmonic properties[J]. *Am Chem Soc*, 2007, 129(28): 8698—8699.
  - [3] XUAN Shou-hu, WANG Yi-xiang, JIMMY YU, et al. Preparation, characterization, and catalytic activity of core/shell  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{polyaniline}/\text{Au}$  nanocomposites [J]. *Langmuir*, 2009, 25(19): 11835—11843.
  - [4] LIDIA ARMELAO, MICHELE PASCOLINI, ELENA BIASIOLO, et al. Innovative metal oxide-based substrates for DNA microarrays[J]. *Inorganica Chimica Acta*, 2008, 361(12—13): 3603—3608.
  - [5] SEINO S, KINOSHITA T, OTOME Y, et al. Magnetic composite nanoparticle of  $\text{Au}/\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  synthesized by gamma-ray irradiation [J]. *Chem Lett*, 2003, 32(8): 690—691.
  - [6] ZHANG Ling, DOU Yong-hua, GU Hong-chen. Synthesis of  $\text{Ag-Fe}_3\text{O}_4$  heterodimeric nanoparticles[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 297(2): 660—664.
  - [7] BAO Jie, CHEN Wei, LIU Tao-tao, et al. Bifunctional  $\text{Au-Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles for protein separation[J]. *Nanotechnology*, 2007, 18(4): 293—298.
  - [8] LIU X Q, TAO S W, SHEN Y S. Preparation and characterization of nanocrystalline  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  by a sol-gel process [J]. *Sens Actuators B Chem*, 1997, 40(2—3): 161—165.
  - [9] 郭巍, 郑振忠, 吴行, 等. pH 值、烧结温度可控制备磁性  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  纳米粒子[J]. *电子元件与材料*, 2010, 29(12): 31—34.
  - [10] GU Jian-min, LI Si-heng, WANG En-bo, et al. Single-crystalline  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  with hierarchical structures: controllable synthesis, formation mechanism and photocatalytic properties[J]. *Solid State Chem*, 2009, 182(5): 1265—1272.
  - [11] YASUHIRO KONISHI, TAKESHI KAWAMURA, SATORU ASAI. Preparation and properties of fine hematite powders by hydrolysis of iron carboxylate solutions[J]. *Metall Mater Trans B*, 1994, 25(2): 165—170.
  - [12] 冯琳, 宋延林, 万梅香, 等. 磁性氧化铁纳米粒子的研究进展[J]. *科学通报*, 2001, 16(46): 1321—1325.
  - [13] 刘海峰, 彭同江, 孙红娟. 直接共沉淀法制备掺杂  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  及其气敏性能的初步研究[J]. *中国粉体技术*, 2006, (2): 11—15.
  - [14] WANG X H, WANG L X, JING X B, et al. Thermal behaviors of doped polyaniline[J]. *Synthetic Metals*, 1995, 69(1—3): 265—266.
- 收稿日期: 2011-05-19; 修订日期: 2012-03-13
- 作者简介: 郭巍(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事功能高分子材料研究, 联系地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号院研究生 78 队(100072), E-mail: syfdgw1979@sina.com
- 通讯作者: 吴行(1962—), 男, 教授, 主要从事功能聚合物材料和环境友好特种涂层防护材料研究, 联系地址: 北京市丰台区槐树岭 3 号院二室(100072), E-mail: hang7wu@yahoo.com.cn
- \*\*\*\*\*
- (上接第 34 页)
- [3] 解传浩, 陈振中. A357 铸造铝合金拉伸性能研究[J]. *沈阳航空工业学院学报*, 2010, 27(1): 5—7.
  - [4] KEN GALL, MARK HORSTEMEYER. Finite element analysis of the stress distributions near damaged Si particle clusters in cast Al-Si alloys [J]. *Mechanics of Materials*, 2000, 32(4): 277—301.
  - [5] FISHER J C, HOLLOMON J H. Precipitation from solid solution [J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 2002, 44(6): 1324—1327.
  - [6] WANG Q G, DAVIDSON C J. Solidification and precipitation behavior of Al-Si-Mg casting alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 2001, 36(3): 739—750.
  - [7] DORWARD R C. A dynamic quench model for strength predictions in heat-treatable aluminum alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 66(4): 25—29.
  - [8] EMBURY J D, SARGENT C M. The effect of quench deformation on the defect structure of quenched metals and alloys[J]. *Acta Metallurgica*, 1962, 10(2): 1118—1121.
  - [9] ANJABIN N, KARIMI A. Physically based material model for evolution of stress-strain behavior of heat treatable aluminum alloys during solution heat treatment [J]. *Materials and Design*, 2010, 31(8): 433—437.
  - [10] 师昌绪, 颜鸣皋. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
  - [11] JOHN A FRANCIS, DELPHINE CANTIN G M. The role of defects in the fracture of an Al-Si-Mg cast alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 407(25): 322—329.
  - [12] LI Jian-tan, NICHOLAS ZABARAS. A thermomechanical study of the effects of mold topography on the solidification of aluminum alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 404(4): 197—207.
- 收稿日期: 2011-09-13; 修订日期: 2012-06-12
- 作者简介: 樊振中(1985—), 男, 博士研究生, 研究方向为大型薄壁整体铝合金铸件变形机理与控制, 联系地址: 北京市 81 信箱 2 分箱(100095), E-mail: fanzhenzhong2010@163.com
- 通讯作者: 熊艳才(1966—), 男, 研究员, 研究领域为铸造铝合金与精密铸造技术, 联系地址: 北京市 81 信箱 2 分箱(100095), E-mail: xiongyan-cai621@sina.com