

特约专栏

# 反重力铸造对高强度铝合金凝固组织影响的研究

李新雷, 郝启堂, 介万奇

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 采用反重力铸造方法生产高强度铝合金铸件已成为航空、航天领域内获得优质构件的重要途径。研究了反重力铸造对高强度铝合金 ZL114A 和 ZL205A 铸件凝固组织的影响。结果表明, 合金的凝固组织存在着不同的位置效应, 对于 ZL114A 合金铸件, 冷端晶粒尺寸最小, 靠近浇口处晶粒尺寸粗大。对于 ZL205A 合金铸件, 随距浇口处距离的减少, 枝晶间分布的网格状  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相逐渐由粗变细,  $\alpha(\text{Al})$  枝晶内分布的黑色点状  $T(\text{Al}_{12}\text{CuMn}_2)$  相逐渐减少。分析表明, 在反重力铸造补缩压力相同的情况下, 合金的凝固温度范围不同是造成凝固组织不同位置效应的主要原因。

**关键词:** 反重力铸造; 高强度铝合金; 凝固组织

中图分类号: TG146.21 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2010)11-0016-05

## Investigation on Effect of Counter Gravity Casting to Solidification Microstructure of High Strength Aluminum Alloys

LI Xinlei, HAO Qitang, JIE Wanqi

(State Laboratory of Solidification Processing, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** There are main approach which get high quality parts in aeronautical and astronautical industry to produce high strength aluminum alloy castings by counter gravity casting. Solidification microstructure of high strength aluminum alloy ZL114A and ZL205A castings under counter gravity casting process was investigated. The results indicate that the microstructure with different solidification temperature range have different site effectiveness. The crystal grains of ZL114A alloy castings near the inner-gate of the castings are larger, while those at the cooling site of castings are fine. For ZL205A alloy casting, with decreasing of the distance of inner-gate site,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  phase distributed in  $\alpha(\text{Al})$  interdendritic become thinner gradually,  $T(\text{Al}_{12}\text{CuMn}_2)$  phase distributed inside of  $\alpha(\text{Al})$  grains also decrease. The investigation indicates that the site effectiveness is related to different solidification temperature of different alloy.

**Key words:** counter gravity casting; high strength aluminum alloy; solidification microstructure

## 1 前言

反重力铸造是利用外加压力使合金液沿着与重力相反的方向自下而上充型并凝固成形的一种铸造方法, 可分为低压铸造、差压铸造和调压铸造等。反重力铸造具有充型平稳、充型速率可控、温度场分布合理、压力下凝固及有利于铸件凝固补缩的特点, 所生产铸件的力学性能好、组织致密、铸造缺陷少<sup>[1-2]</sup>, 非常适合于优质复杂薄壁铸件的生产。ZL114A 和 ZL205A 合金是目前航空、航天领域内应用较多的高强度铝合金。ZL114A 合金属于 Al-Si-Mg 系列合金, 以其较高的强度、较好的塑性以及优良的铸造性能等特点受到青睐。ZL205A 合金是一种高纯高强度铸造铝合金, 在 T6 状态

下, 其强度是目前世界上使用的铸造铝合金中最高的合金之一, 具有非常好的塑性、韧性和抗蚀性, 易焊接, 易加工特点<sup>[3-4]</sup>。但是, ZL114A 和 ZL205A 合金的凝固温度范围存在较大的差异, 在反重力铸造的凝固压力作用下, 对不同高强度铝合金的凝固组织会产生不同的影响, 为此, 针对反重力铸造方法对 ZL114A 和 ZL205A 合金凝固组织的影响规律进行了研究与探讨。

## 2 实验方法

采用差压铸造方法浇注 ZL114A 和 ZL205A 合金试样, 试样轮廓尺寸为 17 mm × 17 mm × 130 mm。铸型材料选用粘土砂, 浇注工艺方案如图 1 所示。采用上罐排气式差压铸造方法进行浇注, 浇注工艺参数分别为: 升液速度 40 mm/s, 升液压力 12 kPa, 充型速度 40 mm/s, 充型压力 30 kPa, 结壳时间 1 s, 结壳增压压力 1 kPa, 结壳增压速度 1 kPa/s, 结晶增压压力 30 kPa, 结晶增压速度 1 kPa/s, 结晶时间 200 s, 差压铸造同步压力

600 kPa。结晶保压阶段完成时，上罐压力不低于 500 kPa。升液管在井式预热炉中预热到 500 ℃。

对于 ZL114A 合金，熔体处理时采用 Sr 变质，合金料熔化后，升温至 740 ℃ 进行第 1 次精炼，扒渣，静置 10 min 后再升温至 740 ℃，加入 Al-10Sr 中间合金(Sr 的加入量为 0.015%)。2 min 后进行第 2 次精炼除气、扒渣，并静置 15 min 后，在 715 ℃ 浇注。对于 ZL205A 合金，将合金料加热熔化至 740 ℃，采用 HGJ-1A 铝合金无毒精炼剂精炼(加入量为 0.7%)，撇渣，静置 15 min 后，在 720 ℃ 浇注差压铸造试样。

差压铸造的金相试样按图 1 中所示位置 1, 2, 3 处切取。金相试样经过粗磨、细磨、抛光后，用 0.5% HF 水溶液腐蚀，并用无水酒精清洗、吹干。采用光学金相显微镜(OLYMPUSGX71)观察凝固组织形态，并进行金相的拍摄和存储。密度试样沿横向切取，切取位置及编号如图 1 所示，共切取 3 组进行测量，所有密度试样都要磨去粘砂及表皮，没有明显的可见铸造缺陷。采用 Sartorius-CP224S 电子分析天平分别称量试样在空气和水中的质量，用排水密度测量法相应编号试样的密度。

3 实验结果

3.1 反重力铸造对 ZL114A 铝合金凝固组织的影响

Sr 变质 ZL114A 合金的差压铸造试样中位置 1, 2,

3 处的铸态显微组织如图 2 所示。从图 2 a, 2 b, 2 c 可以看出，由于凝固位置差异，试样的凝固组织存在较大差异。位置 1 处的  $\alpha$ -Al 枝晶晶粒最细，位置 3 处的  $\alpha$ -Al 枝晶晶粒多呈圆形，且分布较为均匀。实测晶粒尺寸分别为 23.6, 38.5, 43.9  $\mu\text{m}$ 。二次枝晶间距依次为 15.2, 24.5, 28.9  $\mu\text{m}$ 。

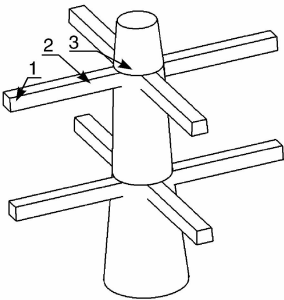


图 1 矩形试样反重力铸造浇注方案图  
Fig. 1 Counter gravity casting method of rectangular samples

3.2 反重力铸造对 ZL205A 合金凝固组织的影响

ZL205A 合金的成分复杂，砂型铸造时铸态组织主要由  $\alpha(\text{Al})$  固溶体、沿固溶体枝晶间分布的  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相和 Cd 共相晶组织组成。ZL205A 合金差压铸造位置 1, 2, 3 的铸态显微组织如图 3 所示。从图 3a, 3b, 3c

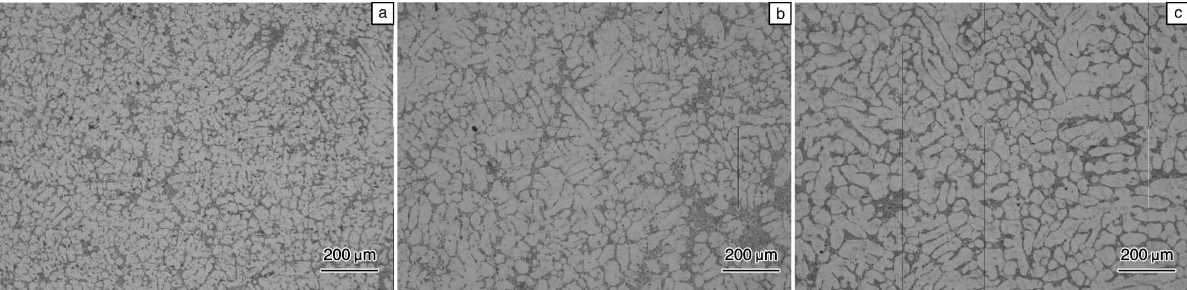


图 2 差压铸造 Sr 变质 ZL114A 合金铸态的金相照片：(a) 位置 1 处，(b) 位置 2 处，(c) 位置 3 处  
Fig. 2 Metallographs of as-cast ZL114A alloy with Sr modification under DPC: (a) site 1, (b) site 2, and (c) Site 3

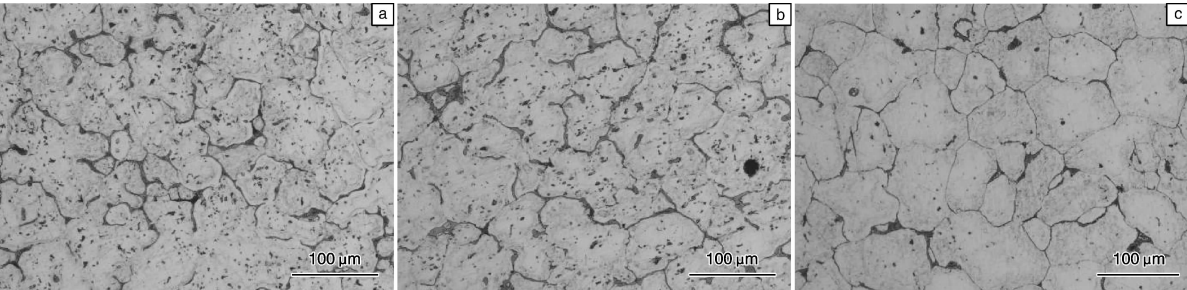


图 3 差压铸造 ZL205A 合金铸态的金相照片：(a) 位置 1，(b) 位置 2，(c) 位置 3  
Fig. 3 Metallographs of as-cast ZL205A alloy under DPC: (a) site 1, (b) site 2, and (c) site 3

可以看出,反重力铸造试样不同位置存在较大的差异,晶界处网状的 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相随着位置1,2,3的变化而逐渐由粗变细,且总量也在减少。此外,分散在 $\alpha$ 固溶体中的黑色麻点状 $T(\text{Al}_{12}\text{CuMn}_2)$ 相的数量随着位置1,2,3的变化也逐渐减少。

### 3.3 反重力铸造对试样密度的影响

Sr变质处理 ZL114A 合金和 ZL205A 合金反重力铸造试样不同位置取样的密度称量如图 4 所示。从图 4a 中可以看出,对于 ZL114A 合金反重力铸造试样,位置 3 处的密度最高,为  $2.6778 \text{ g/cm}^3$ ,其次是位置 1 处,为  $2.6711 \text{ g/cm}^3$ 。位置 2 处的密度最低,为  $2.6680 \text{ g/cm}^3$ 。试样的密度分布具有位置效应,位置 3 处比位置 1 处的密度高出 0.36%。从图 4b 中可以看出,对于 ZL205A 合金反重力铸造试样,位置 1 处的密度最高,为  $2.8259 \text{ g/cm}^3$ ,其次是位置 2 处,为  $2.8223 \text{ g/cm}^3$ ,再次是位置 3 处,密度为  $2.7999 \text{ g/cm}^3$ 。试样的密度分布具有位置效应,位置 1 处比位置 3 处的密度高出 0.93%。

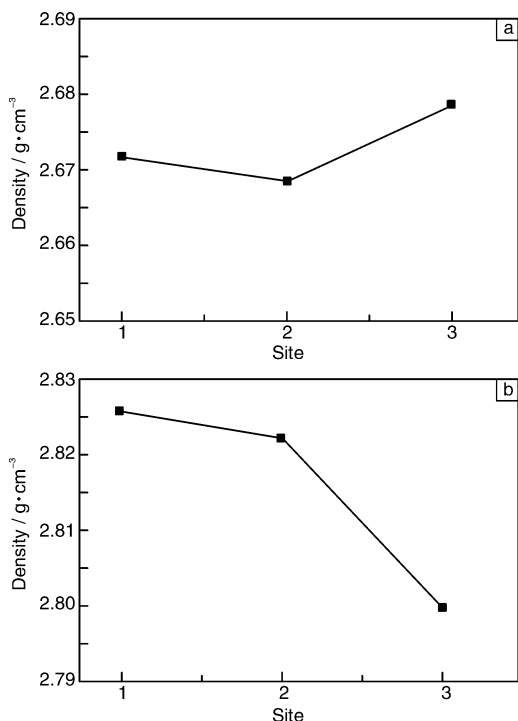


图 4 ZL114A(a)和 ZL205A(b)高强度铝合金差压铸造试样不同位置的密度分布曲线

Fig. 4 Densities at different sites of high strength aluminum alloy ZL114A (a) and ZL205A (b) under DPC

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 反重力铸造对 ZL114A 合金凝固组织与性能的影响

本实验中位置 1 处的合金液流程最长,且沿程的热量损失最大,温度最低,为铸件的冷端。位置 3 处的合金液温度最高,为铸件的热端。对于 ZL114A 合金,由

于其结晶温度范围较窄,倾向于以逐层凝固方式凝固。凝固时,铸件和铸型之间发生热交换作用,铸件横向凝固过程中进行逐层凝固,在铸件表面形成硬壳,固液界面不断向中心线推进。同时在铸件冷端到热端之间存在递增的温度场,铸件发生顺序凝固。位置 1 处,合金液温度低,首先发生凝固,并且冷却速率最大,因而晶粒最为细小,二次枝晶间距最小。同时,1 处合金液凝固发生体收缩时,位置 2、3 处大部分合金液尚未凝固,补缩通道畅通,在压差作用下,位置 1 处体收缩可持续得到 2、3 处合金液的补缩,因而密度较高。而位置 3 处的合金液凝固时间最长,且距离浇注系统最近,合金液温度最高,易形成粗大的树枝晶,因而晶粒的尺寸最大。此外,位置 3 处合金液凝固过程中可持续得到浇注系统的加压补缩,因而密度最高。位置 2 处的冷却速度介于位置 1、3 两者之间,但由于逐层凝固使得凝固补缩通道变窄,处于补缩困难区,无法进行有效补缩,因而该处的晶粒尺寸较大,密度最低。

### 4.2 反重力铸造对 ZL205A 合金凝固组织与性能的影响

对于 ZL205A 合金,由于其结晶温度范围较宽,倾向于以体积凝固方式凝固,易形成粗大的树枝状晶。合金凝固过程中,先析出 $\alpha-\text{Al}$ 枝晶,然后再析出 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相和其余相。当粗大的 $\alpha$ 相等轴晶连成晶体骨架时,枝晶间富集着含 Cu 量较高的合金液。同时由于反重力铸造压差的作用,增强了合金液在枝晶间的流动能力。

位置 1 处温度最低,凝固速度较快,是铸件最先产生体收缩的地方。随着铸件体收缩的进行,未凝固的合金液在压差作用下,沿着树枝状晶间通道向冷端(位置 1 处)移动进行补缩。由于向冷端补缩的合金液来自热端(位置 2 和 3 处)已发生凝固的枝晶间,含有较高的 Cu 元素,因此,使得位置 1 处的 Cu 和其它元素含量增大,从而使三元共晶的体积分数增大,在 $\alpha-\text{Al}$ 枝晶间形成了大量的 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相。由于位置 1 处含 Cu 相最多,因而密度最高。位置 3 处最后凝固,此时枝晶间原含 Cu 量较高的液相已补缩到冷端,而在压差作用下,向该处补缩的合金液是来自浇注系统的具有平均成分的合金液,使该处 Cu 元素的平均含量降低,因而此处 $\alpha-\text{Al}$ 枝晶间的 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相含量减少,密度也最低。位置 2 处的补缩合金液中,也有较高的 Cu 含量,因而在枝晶间存在较多的 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相和部分 $T(\text{Al}_{12}\text{CuMn}_2)$ 相,密度介于位置 1 和 3 之间。

### 4.3 反重力铸造的凝固补缩机制

反重力铸造条件下,合金液在坩埚液面压差的作用下,沿升液管进入铸型型腔。充满型腔后在一定的压差下补缩并凝固成形。型腔中的合金液在形成晶粒并长大

连成枝晶骨架时, 枝晶间的合金液流动受到阻力, 必须在一定的压差作用下才能克服阻力实现对枝晶空隙的补缩。反重力铸造压差作用下合金糊状区的枝晶凝固过程如图 5 所示。

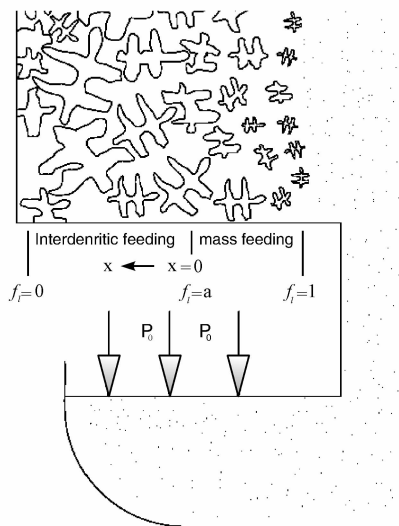


图 5 糊状区枝晶凝固示意图

Fig. 5 Schematic diagram of dendritic solidification in mushy zone

枝晶间的距离通常在  $(10 \sim 100) \mu\text{m}$  之间, 根据流体力学的观点, 可以将枝晶区作为多孔介质处理。根据枝晶间流动的达西流动定律, 枝晶通道间  $x$  方向的流动速度可表达为<sup>[5]</sup>:

$$v_x = \frac{K(x)}{\mu f_1(x)} \nabla P \quad (1)$$

式中:  $v_x$ —枝晶间的平均流动速度;

$K(x)$ —渗透系数, 通常可表达为  $K(x) = \gamma f_1(x)^2$ ;

$\gamma$ —与枝晶间空隙和结构有关的常数;

$P$ —枝晶间流动的局部压力梯度;

$\mu$ —粘度系数;

$f_1(x)$ ——液相所占体积百分数。

引起枝晶间液体流动的主要原因是液体的凝固收缩。由凝固收缩而引起的速度分量为<sup>[6]</sup>:

$$v = \frac{R}{G} \beta \quad (2)$$

式中:  $\beta$ —为合金凝固收缩率;

$G$ —温度梯度;

$R$ —凝固速率。

合并式(1)和(2)得:

$$\nabla P = \frac{\mu}{\gamma f_1(x)} \frac{R}{G} \beta \quad (3)$$

以图 5 中所示的  $x$  坐标为凝固方向,  $x=0$  处为枝晶间补缩区与液相补缩区的交界处。设枝晶间补缩的压差

梯度开始于  $x=0$  处, 则  $x$  处的局部压差为:

$$\nabla P = \frac{\mu R \beta}{\gamma G} \int_0^x \frac{dx}{f_1(x)} \quad (4)$$

对于反重力铸造过程, 设坩埚内合金液面上施加的压差为  $P_0$ , 合金液局部  $x$  处距离坩埚内液面的高度  $h$  所产生的液体压差为  $\rho_1 gh$ , 枝晶间流动所需的局部压差为  $\Delta P$ , 则作用在  $x$  处的局部压力可表示为:

$$P(x) = P_0 - \rho_1 gh - \Delta P = P_0 - \rho_1 gh - \frac{\mu R \beta}{\gamma G} \int_0^x \frac{dx}{f_1(x)} \quad (5)$$

图 5 中, 在  $x=0$  处,  $f_1(0) = a$ , 糊状区的长度为  $l$ , 则糊状区内  $x$  处的  $f_1(x)$  可近似采用下式表示为:

$$f_1(x) = a - (x/l) \quad (6)$$

式中,  $l$  为糊状区的长度。则式(5)成为

$$p(x) = p_0 - \rho_1 gh - \frac{l \mu R \beta}{\gamma G} \ln \left[ \frac{a}{f_1(x)} \right] \quad (7)$$

对于糊状区长度  $l$ ,  $l = \Delta T / G$ ,  $\Delta T$  为合金的凝固温度范围,  $G$  为温度梯度。对于三维空间的流动,  $\gamma = 1 / 24n\pi\tau^3$ ,  $n$  为单位面积上的枝晶通道数, 与二次枝晶间距  $(d_2)$  的平方成反比, 则由式(7)得

$$p(x) = p_0 - \rho_1 gh - 24\pi\tau^3 \mu R \beta \frac{\Delta T}{G^2} \left[ \frac{1}{d_2} \right]^2 \ln \left[ \frac{a}{f_1(x)} \right] \quad (8)$$

则有

$$p(x) = p_0 - \rho_1 gh - AB \left( \frac{\Delta T}{G^2} R \right) \quad (9)$$

式中  $A = 24\pi\tau^3 \mu \beta \left[ \frac{1}{d_2} \right]^2$ ,  $B = \ln \left[ \frac{a}{f_1(x)} \right]$ 。

从式(9)中可以看出, 提高反重力铸造时合金液面的压差  $p_0$  可有效提高枝晶间合金液的流动动力, 增强凝固补缩效果, 减少缩孔缩松等缺陷。此外, 铸件中的枝晶间流动的局部压力分布与凝固过程中的凝固速率  $R$ 、温度梯度  $G$  和合金的凝固温度范围  $\Delta T$  有关。因此, 在采用反重力铸造方法生产铸件时, 除采用提高压差  $p_0$  措施来增强凝固补缩外, 还可以通过调整  $R$  和  $G$  等工艺参数来强化枝晶间补缩, 获得优质铸件。

对于不同的高强度铝合金, 由于合金的凝固温度范围不同, 枝晶间的补缩阻力是不同的。对于 ZL114A 合金, 合金的凝固温度范围约为  $60^\circ\text{C}$ , 而 ZL205A 合金, 约为  $130^\circ\text{C}$  左右。因此 ZL205A 合金枝晶间流动的补缩阻力大。对于 ZL114A 合金来说, 可采用低的凝固速率、高的温度梯度, 使枝晶间的局部凝固阻力减少, 强化补缩, 抑制缩松的形成。但是对于 ZL205A 合金来说, 凝固收缩率大, 热裂倾向大, 不能采用过高的温度梯度。为此, 应保证在较小的温度梯度下, 采用提高反重力铸造液面压差的办法来强化补缩。

## 5 结 论

(1) 反重力铸造条件下高强度铝合金试样的凝固组

织具有显著的位置效应。对于 ZL114A 合金，铸件冷端的晶粒尺寸及二次枝晶间距最小，靠近浇口处晶粒尺寸粗大。对于 ZL205A 合金铸件，随着距浇口处距离的减少，枝晶间分布的网格状  $\theta'$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) 相逐渐由粗变细， $\alpha'$  ( $\text{Al}$ ) 枝晶内分布的黑色点状  $T$  ( $\text{Al}_{12}\text{CuMn}_2$ ) 相逐渐减少。

(2) 反重力铸造凝固压力对合金试样的密度具有显著的位置效应。ZL114A 合金试样密度分布是浇口处最高，冷端其次，中间部分最低，而对于 ZL205A 合金试样，密度分布则是距浇口端越近，密度越低。

(3) 反重力铸造的凝固补缩压力不仅与凝固速率  $R$ 、温度梯度  $G$  有关，还与合金的凝固温度范围有关。对于 ZL114A 合金可通过提高温度梯度来实现补缩，而对 ZL205A 合金则主要通过提高补缩压力来实现有效补缩。

参考文献 References

[1] LI Kundar, Cheng Mingcheng, Chang Edward. Effect of Pressure onthe Feeding Behavior of A356 Alloy in Low-Pressure Casting [J].

AFS Transactions, 2001, 26: 1 – 9

[2] Morimoto S, Ohnishi N, Okada S. Development of a Low – Pressure Die Casting Process for Improved Soundness of Aluminum Casting[J]. AFS Transactions, 1987, 39 – 46

[3] Dong Xiuqi(董秀琦). Theory and Practice for Low – Pressure and Differential Pressure Casting(低压及差压铸造理论与实践)[M]. Beijing: Mechanical Indsytry Press, 2003: 115 – 117.

[4] Li Yuanyuan(李元元), Guo Guowen(郭国文), Luo Zongqiang(罗宗强). 高强韧铸造铝合金材料研究进展 [J]. Special Casting and Nonferrous Alloy(特种铸造及有色合金). 2000(6): 45 – 47

[5] Gan Weiping(甘卫平), Fan Hongtao(范洪涛), Xu Kegin(许可勤). Al – Zr – Mg – Cu 系高强铝合金研究进展[J]. Aluminium Working(铝加工). 2003, 150(3): 6 – 12

[6] Hu Hanqi(胡汉起). Principle of Metallic Solidification(金属凝固原理)[M] Beijing: Mechanical Industry press, 2007: 210 – 211

[7] Wen Xinghuo(闻星火), He Bingjun(何丙军), Liu Baicheng(柳白成). 压力条件下缩松判据的研究[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition) (清华大学学报(自然科学版)). 1998, 38(8): 54 – 56



第十四届全国钛及钛合金学术交流会在宝钢召开

2010 年 11 月 19 日上午，由宝钢股份和中国有色金属学会共同举办的第十四届全国钛及钛合金学术交流会在宝钢宝山宾馆召开。中国科学院院士曹春晓，中国工程院院士周廉，中国有色金属工业协会会长、中国有色金属学会理事长康义，宝钢股份副总经理、特钢事业部总经理庞远林，以及全国钛行业 50 多家单位的专家和学者参加了会议。会议设 6 个分会场，包括理论与基础研究、工艺组织与性能、热加工工艺技术、应用发展及综合等 6 个课题。共收到论文 230 篇。

本次会议为期 3 天，旨在通过与会专家代表对钛及钛合金冶金装备、工艺技术及产品技术的研讨、交流，共同促进新材料、新产品开发，支撑现代工业和国民经济的长期稳定发展。

会议开幕式由宝钢股份特钢事业部副总经理陆江帆主持。宝钢股份副总经理、特钢事业部总经理庞远林，中国有色金属工业协会会长、中国有色金属理事长康义分别在开幕式上致词。庞远林在致辞中表示，宝钢将学习国内外的先进技术经验，深入了解钛产品发展动态，积极探索应用领域的拓展，提升企业工艺技术创新及产品自主研发能力，为我国经济建设作出新贡献。康义在讲话中指出，“十二五”将是我国实现由钛行业大国变强国的关键时期，全行业要加快产业结构调整与优化升级，增强自主创新能力，提高产业集中度，实现又好又快发展。

当天上午，曹春晓、周廉 2 位院士分别作了题为“钛与航空”、“办好世界钛会，促进中国钛科学与技术发展”的特邀报告。会议期间，与会代表还参观了特钢事业部相关生产线。

(本刊通讯员)