

# 锌合金压铸用二元复合水溶性盐芯的制备与性能

涂 梭, 樊自田<sup>✉</sup>, 刘富初, 龚小龙

华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074  
✉ 通信作者, E-mail: fanzt@hust.edu.cn

**摘 要** 针对复杂内腔锌合金压铸件难清理及型芯强度要求高的问题, 以高熔点盐氯化钾和低熔点盐硝酸钾组成混合盐为制芯材料, 采用熔融重力浇注工艺制备了高强度二元复合水溶性盐芯. 对比分析了氯化钾盐芯、硝酸钾盐芯和 20% KCl–80% KNO<sub>3</sub> 二元复合水溶性盐芯的性能特征. 采用扫描电镜和 X 射线衍射等测试方法分析了水溶性盐芯的微观形貌与物相组成. 研究表明: 与单质盐芯相比, 二元复合盐芯综合性能更佳, 其表面基本无裂纹与褶皱, 抗弯强度可达 21.2 MPa, 24 h 吸湿率为 0.568%, 80 °C 的水溶速率可达 208.63 kg·min<sup>-1</sup>·m<sup>-3</sup>. 复合盐芯在裂纹扩展时走向发生了偏转, 这是复合盐芯抗弯强度提高的主要原因.

**关键词** 水溶性盐芯; 硝酸钾; 氯化钾; 复合盐芯; 重力浇注; 压力铸造  
**分类号** TG221.1

## Preparation and properties of a binary composite water-soluble salt core for zinc alloy by die casting

TU Suo, FAN Zi-tian<sup>✉</sup>, LIU Fu-chu, GONG Xiao-long

State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China  
✉ Corresponding author, E-mail: fanzt@hust.edu.cn

**ABSTRACT** For realizing complicated shapes of the inner cavity of zinc alloy castings by pressure die casting, the problem of poor leachability has to be solved and the high-strength requirement of the water-soluble salt core should be met. High-melting potassium chloride salt and low-melting potassium nitrate salt were used as the core materials. High-strength binary composite water-soluble salt core (WSSC) was formed by the process of melting and gravity pouring. The performance characteristics of the potassium chloride core, potassium nitrate core, and binary composite WSSC (20% KCl–80% KNO<sub>3</sub>) were investigated. Scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) studies were performed to examine the micro-morphology and phase composition of WSSC. The results indicate the following: the binary composite WSSC has excellent comprehensive performance, its bending strength can exceed 21.2 MPa, the 24 h hygroscopicity rate is 0.568%, the water-soluble rate can exceed 208.63 kg·min<sup>-1</sup>·m<sup>-3</sup> in water at 80 °C and its surface has no cracks and folds unlike the pure salt core. Crack growth in the binary composite salt core occurs by deflection, which is the main reason for the improvement in bending strength.

**KEY WORDS** water-soluble salt core; potassium nitrate; potassium chloride; composite salt core; gravity pouring process; die casting

锌合金的熔点低, 能够铸成精细复杂的各种构件, 铸件具有较高的机构强度、耐腐蚀性、延展性及优良的可锻性和灵活的通用性, 广泛用于制造高质量元件和

产品, 且需求量与日俱增, 因此, 对其性能要求也愈发严格. 同时, 锌作为金属工业中重点发展的金属之一, 锌合金也被认为在未来可能成为铝合金、铜合金等的

替代品,因而锌合金的广泛应用有利于节约能源,并且可以使得原材料得到合理使用<sup>[1-2]</sup>。锌合金压铸具有铸造性能好,压铸件可进行表面处理,不腐蚀压型,不粘模,具有良好的常温机械性能和耐磨性等特点。大多数锌合金压铸件常常带有复杂的内腔或细长孔结构,一般需要采用型芯铸造成形。锌合金浇注温度低(400~500℃)、热容量小,型芯受热温度较低,目前常用的树脂砂芯和陶瓷型芯在成形复杂锌合金压铸件时存在铸后难以清理的问题。而水溶性盐芯具有较好的表面质量与尺寸精度,较高的强度与硬度及优异水溶溃散性,可用于成形具有复杂内腔结构的薄壁压铸件<sup>[3-4]</sup>。水溶性盐芯在国内外铝(镁)合金压铸件中已经得到了成功应用<sup>[5-8]</sup>,而关于锌合金压铸中盐芯的应用则鲜有报道。锌合金的密度比铝(镁)合金的大,这就要求其压铸用水溶性盐芯具有更高的强度。已有研究表明<sup>[9-10]</sup>,目前单质水溶性盐芯具有易产生裂纹和强度偏低等特点。因此,研究开发一种可用于锌合金压铸件的高强度且少裂纹的水溶性盐芯材料具有重要的理论与实际意义。

以20% KCl-80% KNO<sub>3</sub>(加入量占总摩尔比)为复合盐芯的制芯材料,其具有较高的抗弯强度,液相线温度能满足锌合金压铸件。而对于铝合金,其浇注温度较高,在浇注过程中会对复合盐芯造成表面熔失,影响铸件表面尺寸精度;镁合金性极活泼,与硝酸钾易发生剧烈燃烧或爆炸,因此该复合盐芯不宜用于铝(镁)合金。增大高熔点 KCl 盐的摩尔比,相应的其复合盐液相线温度升高,会加剧硝酸钾的分解,盐芯表面会产生气孔缺陷;降低高熔点 KCl 盐的摩尔比,相应的其复合盐液相线温度降低,盐芯表面会有被局部熔失的可能。

本研究采用以熔融重力浇注工艺成形水溶性盐芯,研究对比了高熔点氯化钾盐芯、低熔点硝酸钾盐芯和20% KCl-80% KNO<sub>3</sub>二元复合水溶性盐芯的表面质量、抗弯强度、吸湿率和水溶速率等性能。采用环境扫描电镜观测了水溶性盐芯的微观形貌,通过X衍射分析仪分析了复合盐芯的物相组成,并对二元复合盐芯的强化机制进行了初步探讨。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验用制备水溶性盐芯的主要材料为AR级硝酸钾(KNO<sub>3</sub>纯度为99%,熔点为337℃)、AR级氯化钾(KCl纯度为99.7%,熔点为771℃)、煤油(密度为0.8g·mL<sup>-1</sup>)和丙酮溶液(分析纯,纯度为99.5%)。

### 1.2 试验设备

无机盐熔炼采用工业用井式电阻炉;混合无机盐采用玛瑙研钵;尺寸为22.36mm×22.36mm×

173.36mm的盐芯标准试样(两端圆弧状便于脱模)采用金属模具制备;SWG杠杆式万能强度试验机测试试样抗弯强度;DHG-9077A型干燥箱用于烘干混合盐料;其他试验设备包括:JA5003型电子天平,精度为0.001g;HH-4型数显恒温水浴锅;数显游标卡尺,精度为0.01mm;KQ-50E型超声波清洗器;Quanta 200环境扫描电子显微镜;X射线衍射仪(粉末衍射 Empyrean XRD-2)。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 盐芯试样的制备

用电子天平称取预定量的无机盐,将其倒入研钵内混研0.5h,混合均匀,直至无明显团状小球状为止;然后将混合均匀的盐放入预设温度为105℃的烘干箱内烘干4h,随炉冷至室温,即配制好混合盐料。配制好的混合盐料放入电阻炉内的刚玉坩埚内熔化,在混合盐料完全熔化后,用氧化铝搅拌棒手动搅拌,使液态混合盐充分混合均匀;控制熔融盐温度超过二元复合盐熔点10℃左右停止搅拌,采用重力浇注工艺直接将熔融盐注入预热温度为130~160℃的金属模具中(KCl盐芯金属模具预热温度为300℃)20s后打开金属模具取出试样,随后空冷至室温状态,即制备得到盐芯试样。

#### 1.3.2 盐芯试样性能测试

待盐芯试样冷却至室温后,肉眼观察其表面质量,用数显游标卡尺测得其长度尺寸,然后用杠杆式万能强度试验机测得盐芯试样的抗弯强度 $\sigma_B$ ;利用阿基米德静水力法<sup>[11]</sup>测得盐芯试样块(约5cm<sup>3</sup>大小)的干燥室质量 $m_0$ 、在煤油中的盐芯块质量 $m_1$ (盐芯块在煤油中的质量)、饱和煤油的盐芯块质量 $m_2$ (将盐芯块从煤油中取出,用完全湿透的绸布擦拭表面过剩煤油,迅速称量),则其显孔隙率为 $P_{显} = (m_2 - m_0) / (m_2 - m_1)$ ,体积密度为 $\rho_{体} = m_0 \rho / (m_2 - m_1)$ , $\rho$ 为煤油密度;盐芯试样的初始质量为 $m_{初}$ ,在RH(相对湿度)为98%~100%恒湿瓶内存放一定时间的盐芯试样质量为 $m_{吸}$ ,则盐芯的吸湿率为 $\psi = (m_{吸} - m_{初}) / m_{初}$ ;将室温下的尺寸为30mm×22.36mm×22.36mm盐芯试样块称重 $m$ ,然后放入静止的水中,测得其水溶性时间 $t$ , $V$ 为该盐芯块的体积,则水溶速率为 $K = m / (t \cdot V)$ ;室温下用游标卡尺测量盐芯试样的上中下部长,取其平均值为 $L_1$ ,则其线收缩为 $\varepsilon_L = (L_0 - L_1) / L_0$ ,其中 $L_0$ 取173.36mm;同样,体收缩 $\varepsilon_V = (V_0 - V_1) / V_0$ , $V_1 = \pi(d/2)^2 h + 2(L-d)dh$ ,其中 $V_0$ 为标准模具盐芯试样体积(22.36mm×22.36mm×173.36mm), $V_1$ 为制备的盐芯试样体积, $d$ 为盐芯试样宽, $h$ 为盐芯试样高, $L$ 为盐芯试样长;将盐芯试样块充分研碎,过325目筛,再称取适量 $m_{真}$ ,置于煤油中,利用阿基米德静水力法测得该试样块体积 $V_{真}$ ,则盐芯真密度为 $\rho_{真} =$

$m_{真}/V_{真}$ .

### 1.3.3 用于微观形貌观察的盐芯试样制备

将测试抗弯强度后的盐芯试样切成小块,用 500 目的耐水砂纸粗磨,然后用 1000 目和 2500 目的耐水砂纸精磨,磨好的试样用装有丙酮溶液的超声波清洗器清洗干净,即可用于环境扫描电镜微观检测分析及其附带的微区能谱分析功能测定其元素组成(样品经喷碳);用小刀刮取复合盐芯试样少许,玻璃片夹固紧,即可用于 X 射线衍射分析.

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 水溶性盐芯的宏观表面质量

图 1 所示为水溶性盐芯的表面质量宏观图. 由图 1 可知,单质水溶性盐芯表面存在许多褶皱(图 1(a)),而二元复合水溶性盐芯表面大部分光滑(图 1(c)),基本上没有褶皱,借鉴金属凝固初期的自由变形曲率公式<sup>[12]</sup>(1)解释可知:

$$\frac{1}{r} = \frac{\alpha H(T_0 - T_m)}{\lambda} \quad (1)$$

其中  $\alpha$  为线膨胀系数  $H$  为熔融盐与铸型的热传导系

数,  $T_0$  为熔融盐液浇注温度,  $T_m$  为铸型的预热温度,  $\lambda$  为无机盐的热导率,曲率越大,褶皱越多. 由于无机盐的热导率非常低,远小于金属,所以单质水溶性盐芯产生褶皱的倾向远大于金属,其产生的褶皱多. 研究实验表明,二元复合盐芯可以有效地减缓甚至消除表面褶皱,光滑的表面或者存在微小的褶皱,使得盐芯在后续加工中只需要经过简单的机械加工即可使用,不需要额外设置太大的机加工余量.

由图 1(b) 可以看出,单质水溶性盐芯表面存在许多发散状的裂纹,而二元复合水溶性盐芯表面没有裂纹. 一方面,单质水溶性盐芯表面存在的大量褶皱会促使微观裂纹的产生;另一方面,无机盐为脆性材料,其产生热裂纹的倾向较大,浇注的盐芯试样在凝固收缩过程中需要经历一个“高温脆性区”,在此温度区间盐芯试样的塑性降至最低,盐芯在凝固过程中收缩较大,受到外界阻碍易产生裂纹<sup>[13]</sup>. 在实际的浇注过程中,单质盐芯在凝固过程中有持续的爆裂声,表面出现裂纹,呈发散状不断扩大;而二元复合盐芯的表面无明显宏观裂纹. 因此,与单质盐芯相比,二元复合盐芯具有更好的表面质量.

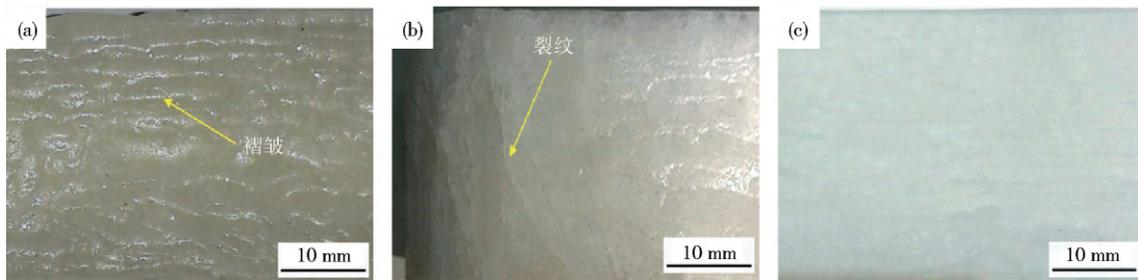


图 1 水溶性盐芯表面质量. (a) 单质盐芯表面褶皱; (b) 单质盐芯表面裂纹; (c) 二元复合盐芯表面  
Fig. 1 Surfaces quality of WSSC: (a) folds of pure WSSC; (b) cracks of pure WSSC; (c) surface of binary composite WSSC

图 2 为水溶性盐芯的宏观断口截面图. 由图 2 可知,三种水溶性盐芯断面没有缩孔,由于无机盐收缩比金属大得多,在实际的浇注过程中发现冒口部位有局部缩孔,冒口的设置可以有效转移缩孔,改善盐芯铸造质量. 单质盐芯的断口两侧存在局部缩陷(图 2(a)、

图 2(b)). 由于盐芯的热导率很低,熔盐注入铸型后,首先在表面形成硬壳,内部尚处于液态的熔盐在此外壳中冷却. 单质盐芯在凝固期间的体收缩受液-固状态改变的影响大,其内外凝固时间相差较大,因而由初始凝固壳体的内部和外部之间的温差引起的热变形,

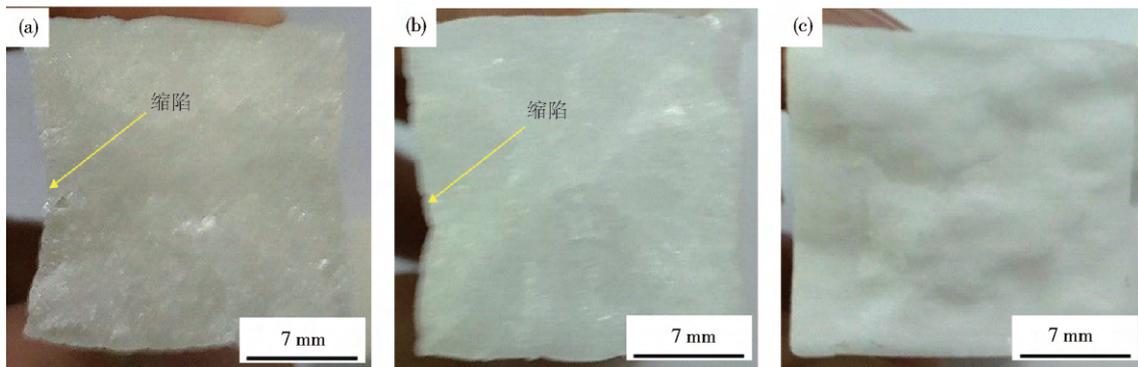


图 2 水溶性盐芯的断口截面图. (a) KCl 盐芯; (b) KNO<sub>3</sub> 盐芯; (c) 二元复合盐芯

Fig. 2 Fracture macrographs of WSSC: (a) KCl WSSC; (b) KNO<sub>3</sub> WSSC; (c) binary composite WSSC

即会产生盐芯的表面不平整;此外,当盐芯外层表面已凝固区域发生固态收缩时,盐芯内部可能处于半固态或液态,在外界大气压的作用下,盐芯由外层向内层方向产生收缩而产生缩陷。

图3为 $\text{KNO}_3$ - $\text{KCl}$ 二元体系相图。由图3可知,二元复合盐芯(20%  $\text{KCl}$ -80%  $\text{KNO}_3$ )的凝固区间较小,凝固时间较短,冒口中的熔融液可以在盐芯凝固过程中起到补缩的作用,因而制备出的二元复合盐芯表面比较平整光滑。

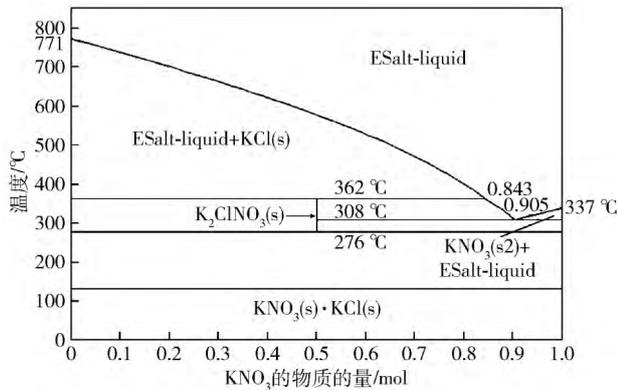


图3  $\text{KNO}_3$ - $\text{KCl}$ 二元体系相图<sup>[13]</sup>

Fig. 3 Phase diagram of  $\text{KNO}_3$ - $\text{KCl}$  binary system<sup>[13]</sup>

## 2.2 水溶性盐芯的性能

表1为三种水溶性盐芯的性能对比表。从表1可以看出,二元复合盐芯具有优良的抗弯强度和抗吸湿性,综合性能优异。由于锌合金的密度比铝(镁)合金大,在压铸过程中,盐芯受到金属液的高速冲击,要求水溶性盐芯具有更高的抗弯强度以满足压力铸造的使用要求。单质水溶性盐芯抗弯强度明显偏低,而二元复合盐芯的抗弯强度可达21.2 MPa,可用于成形锌合金铸件。

$\text{KCl}$ 盐芯的显气孔率最大,为1.221%,单质水溶性盐芯的显气孔率明显大于二元复合水溶性盐芯,其原因是单质水溶性盐芯产生裂纹较多,使其显气孔率增加明显;二元复合盐芯最接近于真密度,单质盐芯与真密度相差较大,其原因可能是单质盐芯内部的闭气孔较多,而二元复合盐芯内部结合得较为致密,产生的裂纹少,同时内部的闭气孔少,这也使得二元复合盐芯抗弯强度较高。三种水溶性盐芯24 h吸湿率和收缩率均较大,因此熔融浇注法形成的水溶性盐芯工业化应用的关键是解决水溶性盐芯存放过程中的吸湿和熔融浇注成形时的收缩问题。

由表1可以看出,常温下 $\text{KCl}$ 盐芯的水溶速率最高,水溶速率为 $46.80 \text{ kg} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^3)^{-1}$ , $\text{KNO}_3$ 盐芯的水

表1 三种不同水溶性盐芯的性能对比

Table 1 Performances comparison of three kinds of water-soluble salt cores

材料体系	$\sigma_B$ /MPa	$P_{\text{显}}/ \%$	$\rho_{\text{体}}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\rho_{\text{真}}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\psi/ \%$	$(\varepsilon_L) \varepsilon_v/ \%$	$(K_{\text{常温}}) K_{80^\circ\text{C}}/(\text{kg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$
$\text{KCl}$ 盐芯	4.01	1.221	1.810	1.980	0.747	(3.77) 8.2	(46.80) 207.13
$\text{KNO}_3$ 盐芯	3.45	0.814	2.028	2.109	0.435	(2.34) 5.6	(18.28) 250.32
复合盐芯	21.20	0.458	2.039	2.088	0.568	(3.25) 7.9	(22.36) 208.63

注:  $K_{\text{常温}}$ 为盐芯在常温条件下的水溶速率;  $K_{80^\circ\text{C}}$ 为盐芯在80℃水浴条件下的水溶速率。

溶速率最低,水溶速率为 $18.28 \text{ kg} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^3)^{-1}$ ,这是因为常温常压下 $\text{KCl}$ 的溶解度(34.2 g)大于 $\text{KNO}_3$ 的溶解度(31.6 g),并且 $\text{KNO}_3$ 盐芯在水溶过程中吸热,使得常温常压下水溶速率降低。采用二元体系制备的盐芯继承了 $\text{KCl}$ 常温常压下优良的水溶性,因而二元复合盐芯的水溶速率比单质 $\text{KNO}_3$ 盐芯高。在80℃水浴中,三种盐芯的水溶速率显著提高,这说明水溶液温度能显著改变盐芯的水溶速率,其中 $\text{KNO}_3$ 盐芯水溶速率最高, $\text{KCl}$ 盐芯的水溶速率最低,这是由于当水溶液温度为80℃时, $\text{KNO}_3$ 的溶解度(169 g)大于 $\text{KCl}$ 的溶解度(51.1 g);同时,水溶液温度的提高加剧了水分子的运动,水分子激烈碰撞盐芯,水溶速率加快。二元复合盐芯在80℃水浴时的水溶速率可达 $208.63 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ,因此其具有优良的水溶溃散性。

## 3 宏观形貌分析

图4所示为三种不同水溶性盐芯的微观形貌。由图4可以看出,单质水溶性盐芯断面形貌有明显的晶粒外形轮廓(图4(a)、图4(b)),沿着晶粒间晶界断裂,断面呈冰糖快状或岩石块状形貌,这是一种典型沿晶断裂方式。二元复合水溶性盐芯微观断面如图4(c)所示,其断裂方式主要以穿晶断裂为主,沿晶断裂为辅,晶粒比较细小,结合得更加致密。从单质盐芯的微观组织形貌(图4(d)、图4(e))可以看出,晶粒间结合比较松散,有明显微孔隙和微裂纹存在;而二元复合盐芯的微观组织(图4(f))结合紧凑致密,大小晶粒交错相间分布,无明显的微裂纹。由于固相转变比较慢,早期析出的 $\text{KCl}$ 相来不及转变,最终以小颗粒状分布在晶界处,或以枝晶状交错分布,其类似于一种增

强相,当裂纹扩展到该处时,沿着界面方向继续扩展,界面间发生解离,解离的界面弱化了裂纹前沿的应力

集中,使得裂纹方向偏转,裂纹扩展途径增长,因而,复合盐芯的抗弯强度较单质盐芯提高很多.

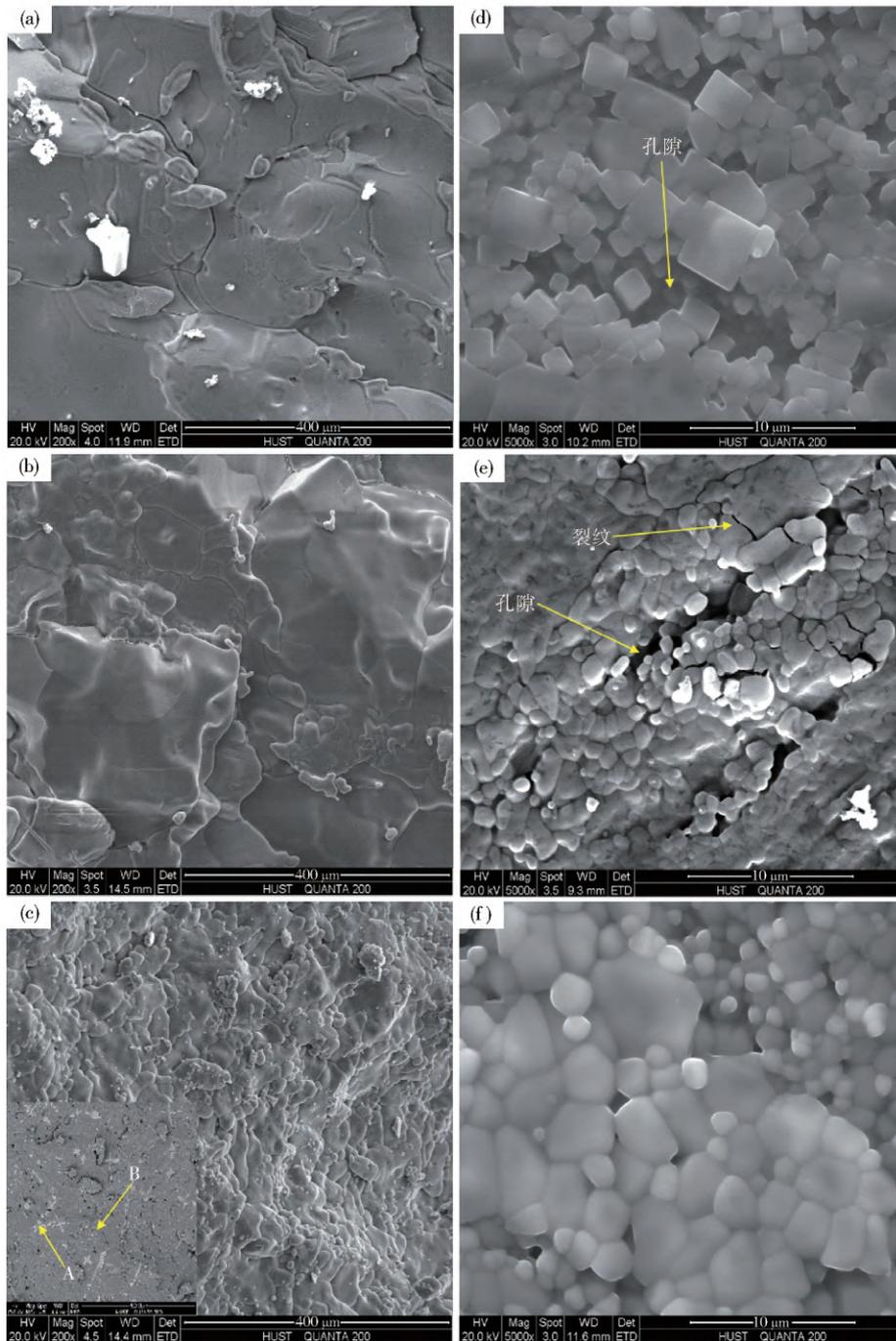


图 4 三种不同水溶性盐芯的微观形貌. (a) KCl 盐芯断口形貌; (b) KNO<sub>3</sub> 盐芯断口形貌; (c) 二元复合盐芯的盐芯断口形貌; (d) KCl 盐芯凝固组织微观形貌; (e) KNO<sub>3</sub> 盐芯凝固组织微观形貌; (f) 二元复合盐芯凝固组织微观形貌

Fig. 4 Morphology of three kinds of WSSCs: (a) fracture of KCl WSSC; (b) fracture of KNO<sub>3</sub> WSSC; (c) fracture of binary composite WSSC; (d) solidified structure of KCl WSSC; (e) solidified structure of KNO<sub>3</sub> WSSC; (f) solidified structure of binary composite WSSC

图 5 是二元复合水溶性盐芯的 X 射线衍射谱,复合盐芯中的相由 KCl 和 KNO<sub>3</sub> 组成,这表明在复合盐芯制备过程中,KCl 和 KNO<sub>3</sub> 没有发生反应生成新的相.采用微区能谱图分析(点 A、B 为图 4(c) 左下角所标注),测试结果定性分析表明:A 点由 K 和 Cl 元素组

成,B 点由 K、Cl、N、O 元素组成;更具体地结合相图(图 3)分析<sup>[14]</sup>,在图 4(c) 中,枝晶状结构是 KCl 相,大范围黑色相由 KCl 和 KNO<sub>3</sub> 组成介稳化合物相(K<sub>2</sub>NO<sub>3</sub>Cl)存在,由于固体转变比较慢,早期析出的 KCl 相来不及转变,以小颗粒状分布在晶界处,或以枝

晶状交错分布。

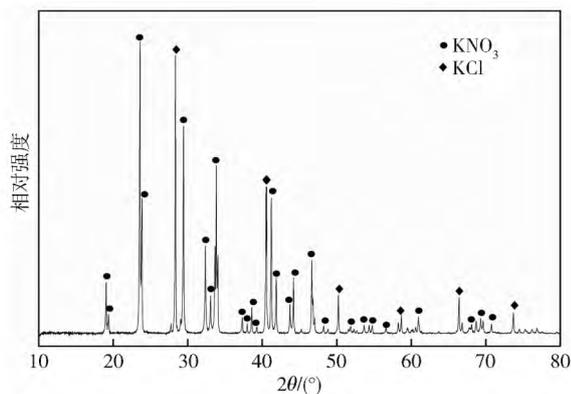


图5 二元复合水溶性盐芯的衍射谱图

Fig. 5 X-ray diffraction pattern of binary composite WSSC

二元复合盐芯抗弯强度提高可以用裂纹偏转机理来解释,其示意图如图6所示<sup>[15]</sup>,当裂纹扩展遇到图4(c)基体中的小颗粒时,其分散了裂纹扩展前沿的应力集中,裂纹走向发生偏转,裂纹的扩展路径增长,裂纹在扩展过程中消耗更多的能量;同时,二元复合盐芯的晶粒更加细小,晶粒间结合更加紧密,因而导致二

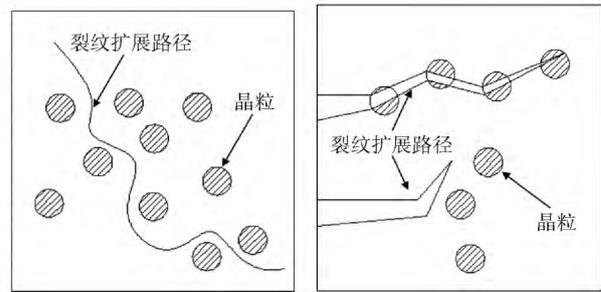


图6 水溶性盐芯增强机制示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 6 Schematic drawings of strengthening mechanisms of WSSC<sup>[15]</sup>

元复合盐芯强度提高。

制备得到的盐芯试样在万能强度试验机上测试时突然断裂,且未发生塑性变形,两个断面可以无缝对接,分析认为,水溶性盐芯的断裂方式为脆性断裂。图7给出了三种盐芯的断面图,单质水溶性盐芯的断裂曲线基本上是垂直方向的,而二元复合盐芯的断裂曲线比较曲折,这说明裂纹在扩展过程中走向发生了偏转。

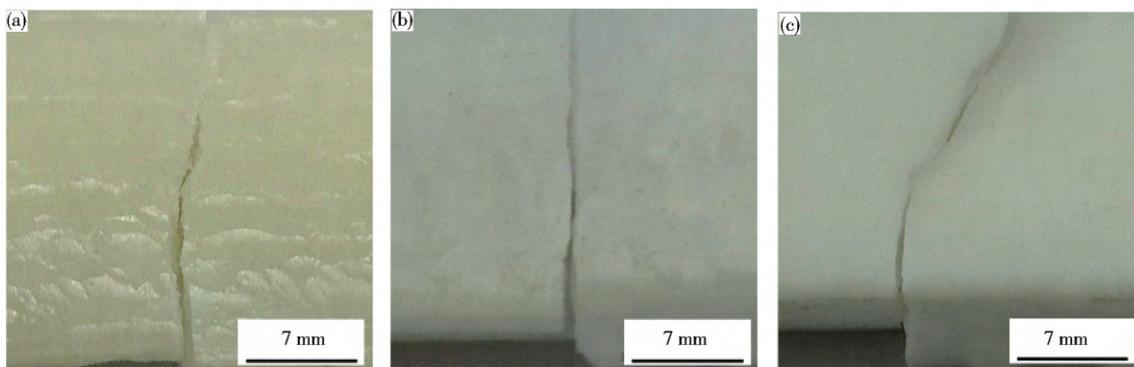


图7 水溶性盐芯断裂时的曲线分布。(a) KCl盐芯;(b) KNO<sub>3</sub>盐芯;(c) 二元复合盐芯

Fig. 7 Crack curves occurred at WSSC: (a) KCl WSSC; (b) KNO<sub>3</sub>WSSC; (c) binary composite WSSC

## 4 结论

(1) 20% KCl-80% KNO<sub>3</sub>二元复合水溶性盐芯具有优异的表面宏观质量,表面基本无裂纹褶皱,且综合性能更佳,其抗弯强度可达21.2 MPa,在相对湿度为98%~100%条件下,24h吸湿率为0.568%,恒温80℃水浴下,水溶速率可达208.63 kg·min<sup>-1</sup>·m<sup>-3</sup>。

(2) 抗弯强度测试表明,盐芯的断裂方式为脆性断裂;微观组织分析表明,20% KCl-80% KNO<sub>3</sub>二元复合水溶性盐芯较单质盐芯结合比较致密,同时在断裂过程中裂纹扩展前沿走向发生偏转,起到了提高盐芯抗弯强度的作用;微区能谱测定和X衍射分析表明,复合盐芯中的相由KCl和KNO<sub>3</sub>组成,这表明在复合盐芯制备过程中,KCl和KNO<sub>3</sub>没有发生反

应生成新相。

(3) 锌合金压铸用水溶性复合盐芯的成功制备有望为锌合金压铸用型芯带来新的活力;水溶性盐芯收缩、吸湿性和强韧化等问题,是未来合金压铸用水溶性盐芯实际应用需要解决的关键问题。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang X. Casting zinc alloys research and application. *Energy Energy Conservation*, 2012(4): 93  
(张啸. 铸造锌合金的研究进展与实际应用. *能源与节能*, 2012(4): 93)
- [2] Li K L, Wu C J, Peng H P, et al. Effect of Mg on the solidification structure and growth of the intermetallic layer of a Zn-11% Al alloy coating. *Chin J Eng*, 2016, 38(8): 1123  
(李凯良, 吴长军, 彭浩平, 等. Mg对Zn-11% Al合金镀层凝

- 固组织及合金层生长的影响. 工程科学学报, 2016, 38(8): 1123)
- [3] Luo J X. The research and application of high pressure resistant dissolvable core. *Foundry*, 2002, 51(2): 92  
(罗继相. 耐高压易溶芯的研制与应用. 铸造, 2002, 51(2): 92)
- [4] Huang R H, Zhang B P. Progress and analysis of salt core made under high pressure for die casting. *Foundry*, 2016, 65(8): 757  
(黄仁和, 张宝平. 压铸用高压制备盐芯进展与分析. 铸造, 2016, 65(8): 757)
- [5] Yaokawa J, Anzai K, Yamada Y, et al. Castability and strength of potassium chloride-ceramic composite salt cores. *J Japan Foundry Eng Soc*, 2004, 76(10): 823
- [6] Yaokawa J, Miura D, Anzai K, et al. Strength of salt core composed of alkali carbonate and alkali chloride mixtures made by casting technique. *Mater Trans*, 2007, 48(5): 1034
- [7] Yaokawa J, Anzai K, Yamada Y. *Expandable Core for Use in Casting*: US Patent, US 11/377,125. 2006-3-16
- [8] Hirokawa K. *Disintegrative Core for High Pressure Casting, Method for Manufacturing the Same, and Method for Extracting the Same*: US Patent, 6755238. 2004-6-29
- [9] Xu P C. *Research on High Strength & Water-soluble Halides Salt-core* [Dissertation]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007  
(徐鹏程. 高强度水溶性卤化物型芯的研究[学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2007)
- [10] Chen W P, Zheng H W. Progress in research on water-soluble salt-core used for high-pressure casting. *Foundry Technol*, 2010, 31(2): 241  
(陈维平, 郑洪伟. 高压铸造用水溶性盐芯的研究进展. 铸造技术, 2010, 31(2): 241)
- [11] COSTIND. HB 5352.4—2004 Test method for properties of investment casting shell-Part 4: determination of permeability to gas. Beijing: Beijing Aeronautical Materials Research Institute, 2004  
(国防科学技术工业委员会. HB 5352.4—2004 熔模铸造型壳性能试验方法 第4部分: 透气性的测定. 北京: 北京航空材料研究院, 2004)
- [12] Zheng H W. *Research on the Water-soluble Salt-core Used by High-pressure Casting* [Dissertation]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010  
(郑洪伟. 高压铸造用水溶性盐芯的研究[学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2010)
- [13] Foundry Branch of China Mechanical Engineering Society. *Foundry Handbook: Casting Process*. 2nd Ed. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003  
(中国机械工程学会铸造分会编. 铸造手册: 铸造工艺. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2003)
- [14] CRCT. FTsalt-FACT Salt Phase Diagrams [DB/OL]. *Centre for Research in Computational Thermochemistry* (2010-04-10) [2017-01-15]. [http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation/FTsalt/FTsalt\\_Figs.htm](http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation/FTsalt/FTsalt_Figs.htm)
- [15] Huang R H, Zhang B P. Study on the composition and properties of salt cores for zinc alloy die casting. *Int J Metalcasting*, 2017, 11(3): 440