

低温球铁件磁痕缺陷的工艺优化

惠俊民, 周林波, 陈仕栋
(慈溪市汇丽机电有限公司, 浙江慈溪 315333)

摘要: 针对低温球铁铸件表面出现的磁痕缺陷, 进行数值模拟分析和铸造工艺改进。结果表明, 在保证铁液纯净度的前提下, 优化铁液充型流场及充型压力分布, 减少负压区, 防止铁液充型过程中出现持续负压, 保证铁液平稳充型, 是消除低温球铁件磁痕缺陷的有效途径。

关键词: 低温球铁; 磁痕; 数值模拟

中图分类号: TG245 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-4977 (2014) 06-0578-05

Technology Optimization of Magnetic Mark Defect for Low Temperature Ductile Iron Casting

HUI Jun-min, ZHOU Lin-bo, CHEN Shi-li
(Cixi Huili Machinery Co., Ltd., Cixi 315333, Zhejiang, China)

Abstract: The magnetic marks defect was found on the surface of low temperature ductile iron castings during production. The simulation and improving process for ductile iron castings were put forward. The results show that under the premise of guarantee the purity of molten irons, the effective ways to eliminate magnetic marks defect of low temperature ductile iron include, optimization of melt iron filling mould flow field and the filling mould pressure distribution, reducing the negative pressure zone, preventing iron liquid filling mould process from continuous negative pressure, making sure the melt iron filling mould stable.

Key words: low temperature ductile iron; magnetic mark; numerical simulation

随着国内外高铁项目的迅猛发展, 高速机车用低温高韧性球铁铸件在磁粉探伤过程中出现的表面磁痕成为影响铸件质量的缺陷之一。本文通过铸件端盖铸造工艺的优化, 提出低温高韧性球铁铸件表面磁痕缺陷的改善措施。

1 铸件结构及检验要求

端盖毛坯单重50 kg, 最大外形尺寸: 500 mm × 860 mm × 300 mm, 壁厚50 mm, 结构见图1。铸件材质EN-GJS-400-18-LT, 要求球化率≥85%, 基体铁素体体积分数≥95%, 抗拉强度≥400 MPa, 屈服强度≥250 MPa, 伸长率≥18%, -40 °C条件下3个冲击试样

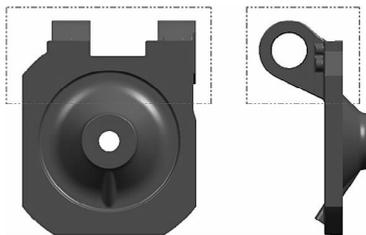


图1 端盖铸件

Fig. 1 End cover casting

平均冲击功≥12 J, 单个试样低温冲击功值≥9 J。铸件整体X射线检测, 关键区(图1中虚线部分)符合ASTM E446标准1级, 其他区域符合ASTM E446标准2级。铸件整体超声波探伤, 要求符合EN9933标准, 铸件全部表面磁粉探伤检测, 关键区符合EN1369标准SM1、LM1a/AM1a要求, 其他区域符合SM2、LM2a/AM2a要求。

2 原工艺及模拟结果

2.1 熔炼工艺

为满足-40 °C环境下的低温、高韧性、高强度要求, 保证材料球化率、基体铁素体体积分数、共晶团数量, 减少晶粒间夹渣和晶界偏析, 化学成分设计遵循一高六低原则, 即碳高, Si、Mn、S、P、Mg残、RE低^[1], CE设计在共晶点附近, 以获得较好的铸造工艺性能。实行大孕育量分三次孕育, 保证球形圆整度、球墨数、球化等级及冲击韧性。

2.2 铸造工艺

2.2.1 工艺分析

根据铸件X射线和超声波探伤要求, 工艺设计将

收稿日期: 2013-11-25收到初稿, 2014-03-18收到修订稿。

作者简介: 惠俊民 (1974-), 男, 工程师, 长期从事铸造工艺技术工作。E-mail: hjmccy@126.com

关键区域置于浇注位置底部以利补缩。为促进铸件基体组织铁素体化,防止冷铁激冷产生渗碳体和珠光体,工艺尽量采用冒口分区补缩,少用冷铁。铸件浇冒系统设计见图2。

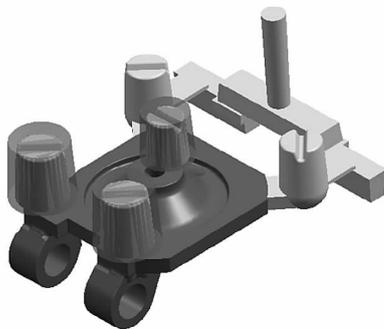


图2 铸件的浇冒系统

Fig. 2 The pouring system of castings

2.2.2 浇注系统设计

因为球铁浇注过程中易产生氧化夹渣,导致磁粉探伤不合格,所以采用封闭-开放式浇注系统,既有利于挡渣,又使充型平稳。

初定截面比: $\sum A_{直}:\sum A_{阻}:\sum A_{内}:\sum A_{横}=4:2.5:3:8$, 浇注系统阻流截面为横浇道过滤片搭接处,内浇道略大于阻流截面,防止内浇道产生喷射,保证浇道进液平稳。直浇道高度:上砂箱高度260 mm,浇口杯按200 mm, $H=H_{上箱}+H_{杯}=260+200=460$ mm。铁液重量: $G_L=G_{铸件}+G_{浇冒口}=50+50=100$ kg, 浇注时间: $\tau=G^{1/2}+2\times G^{1/3}=7.1+2\times 3.7=14.5$ s, 选取流量因素 $\mu=0.55$ 。平均压头:铸件型腔总高度300 cm,平均压头 $H_p=H_0-0.125Hc=460-37.5=422.5$ mm。球铁铁液经球化、孕育处理后温度下降很多,且易氧化。因此根据澳赞公式^[2]计算阻流截面时,公式中 τ 要在灰铁计算时间的基础上减少1/2至1/3,取 $\tau=14.5\times 65\%=9.42$ s。 $A_{阻}=G_L/[0.3\mu\tau(H_p)^{1/2}]=9.6$ cm²。

铁液在横浇道分两处搭接进入阻流截面,因此按两个阻流截面计算,根据过滤片25%~33%的通过率,单个滤片搭接断面为45 mm×45 mm,总有效阻流过滤面积 $\sum A_{阻}$ 为10.12 cm²。

内浇道面积, $\sum A_{内}=\sum A_{阻}\div 2.5\times 3=12.1$ cm²

扁平内浇道2个,内浇道截面尺寸(58 mm/64 mm)×10 mm。内浇道搭接在横浇道顶面,搭接宽度略大于内浇道厚度,减小内浇道进渣的概率。横浇道面积, $\sum A_{横}=\sum A_{阻}\div 2.5\times 8=32.4$ cm²,取横浇道截面尺寸(35 mm/45 mm)×40 mm梯形。取直浇道直径 $\Phi 45$ mm, $F_{直}=15.9$ cm²。最终浇注系统实际浇道比为: $\sum A_{直}:\sum A_{阻}:\sum A_{内}:\sum A_{横}=1.57:1:1.2:3.2$ 。

2.2.3 其他控制要求

造型材料,选择散热慢的呋喃树脂砂,并加大砂箱吃砂量,保证铸件高温浇注后缓慢冷却;浇注后待

铸件完成共析转变再打箱,打箱时铸件温度控制在600℃左右,以获得较多的铁素体组织^[3]。

2.3 数值模拟

用铸造CAE软件对铸造工艺进行数值模拟,对缩孔、缩松和凝固进程进行综合分析,预测铸件缺陷(图3)。模拟结果显示,铸件产生收缩缺陷的可能性很小。

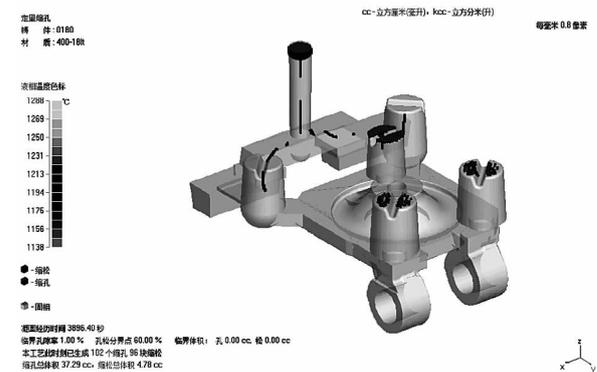


图3 铸造CAE软件模拟结果

Fig. 3 The CAE software simulation results of casting

2.4 试制结果及分析

2.4.1 铸件无损检测

超声波探伤检验,铸件整体符合EN9933超声波探伤标准。磁粉探伤检验:铸件全部表面进行磁粉探伤,发现铸件在图4所示区域,磁痕呈网状和线型两种,最大长度7 mm,铸件表面打磨5 mm深才能去除,磁粉探伤不合格。图5为铸件表面磁痕缺陷抛光后放大照片,图6为显微镜下磁痕缺陷形态照片。

2.4.2 缺陷分析

对图7磁粉探伤缺陷处进行EDS分析,如图8,其



图4 铸件表面磁痕缺陷位置

Fig. 4 The magnetic mark defect position on the surface of casting

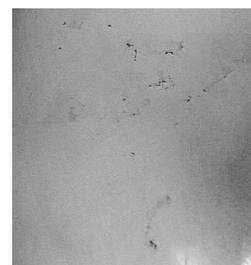


图5 磁痕抛光后放大照片

Fig. 5 The pictures of magnetic mark image after polishing

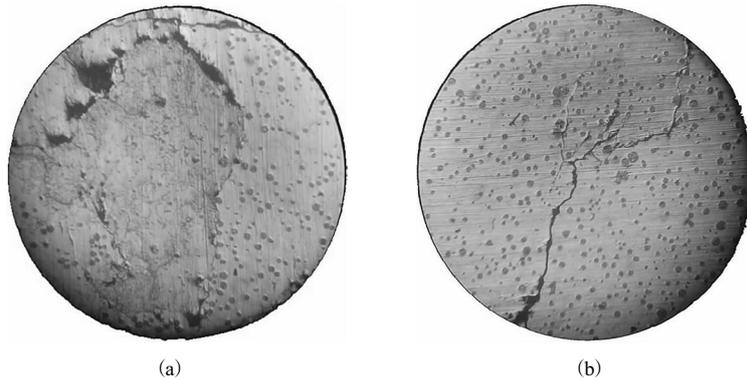


图6 磁痕缺陷形态

Fig. 6 The magnetic mark defect form

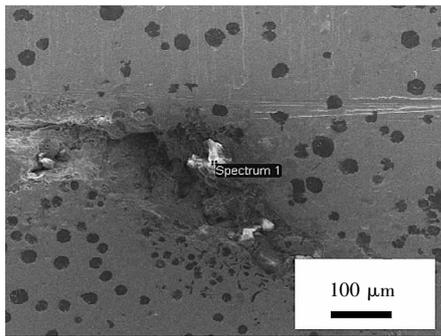


图7 磁粉探伤缺陷处的形貌 (SEM)

Fig. 7 The defect morphology by magnetic particle inspection (SEM)

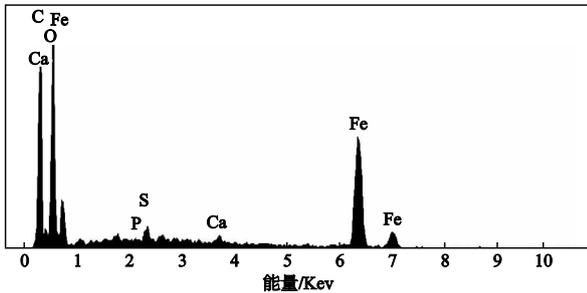


图8 磁粉探伤缺陷处EDS图谱 (SEM)

Fig. 8 The defect EDS map by magnetic particle inspection (SEM)

中各元素的含量和原子分数见表1。其中O元素的含量达到45.14%，物相分析表明，图7缺陷处主要由SiO₂、FeS₂、C和Fe组成，所以铸件磁痕缺陷主要是铸件表面氧化夹渣，这些夹杂物来自铁液内部^[4]，由两方面原因产生。首先，熔炼方面：原材料不纯净、原材料中Si、P和其他微量元素偏高、熔炼工艺不合理，形成铁液中的熔渣（如SiO₂等）；第二，铁液充型不平稳，飞溅、卷气，氧化形成夹渣（如SiO₂等）。

对原工艺，再次进行模拟分析：铁液充型模拟显示（图9），浇注时间 $t=3.52$ s时，铁液在缺陷位置飞

表1 磁粉探伤缺陷处的成分

Table 1 The components of defect by magnetic particle inspection

项目	C	O	P	S	Ca	Fe	总量
质量分数/%	9.11	45.14	0	1.72	0.83	43.19	100.00
原子分数/%	17.14	63.72	0.00	1.21	0.47	17.46	100.00

溅、交汇，而且都是进入型腔的初期铁液，极易形成夹渣，并粘附于铸件缺陷区域表面。

原工艺流程场压力模拟显示，浇注时间 $t=3.68$ s时（图10），铸件缺陷区域出现持续负压，发生卷气夹渣缺陷可能性较大^[5]。

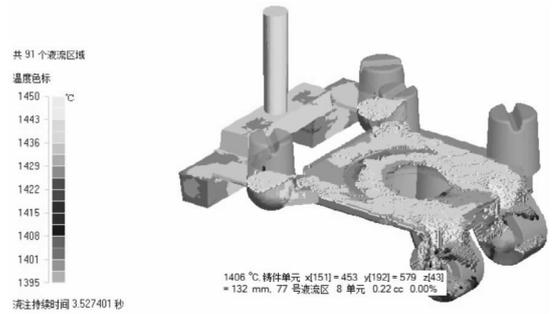


图9 原工艺 $t=3.52$ s时充型模拟结果

Fig. 9 The simulation result of filling mould of melt iron at 3.52 s with original process

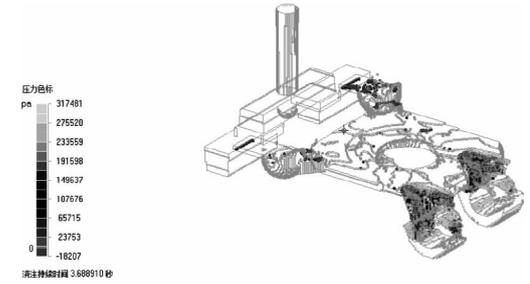


图10 原工艺 $t=3.68$ s时流场负压

Fig. 10 The negative pressure of flow field at 3.68 s with the original process

以上模拟结果表明，球铁充型过程中出现的飞溅和持续负压导致的卷气，是铸件产生氧化夹渣的直接原因。模拟结果也提示我们，球铁工艺设计，不仅要做强凝固数值模拟，还应做铁液充型和流场压力模拟，才能全面预防铸件缺陷。

3 改进后的工艺及模拟结果

3.1 改进后的工艺

为防止铁液充型飞溅和卷气产生大量氧化夹渣，

减少流场负压区，防止出现持续负压，实现铁液快速、平稳充型。对工艺进行了以下优化。

(1) 原工艺浇注系统为封闭-开放式，虽然内浇道进液较平缓，但所用中注式浇注系统，无法避免铁液在型腔内的飞溅和紊流现象。而底注浇注系统，即可以保留封闭-开放式浇注系统挡渣好，充型平稳的优点，又可避免铁液在型腔内的飞溅和紊流。

具体的改进措施是：原分型面内浇道取消，改为两根 $\Phi 30$ mm的陶瓷管底注，浇注系统其他组元不变。浇注系统浇道比为： $\Sigma A_{直}:\Sigma A_{阻}:\Sigma A_{内}:\Sigma A_{横}=1.57:1:1.38:3.2$ 。

(2) 在铸件的流场末端设置溢流、排气装置，提高铁液充型速度，排除型腔末端死角冷铁液。改进后的工艺见图11。

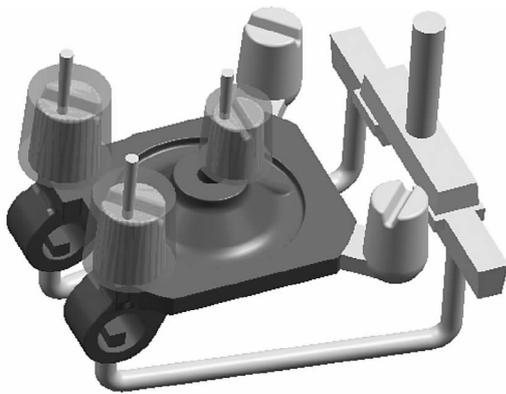


图11 改进后的浇冒系统

Fig. 11 The improved gating system

3.2 改进后工艺模拟分析

改进后工艺充型色温模拟显示(图12)，铁液在吊环处充型平稳，交汇处铁液温度 $1405\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，铸件产生冷隔、夹渣缺陷可能性较小。

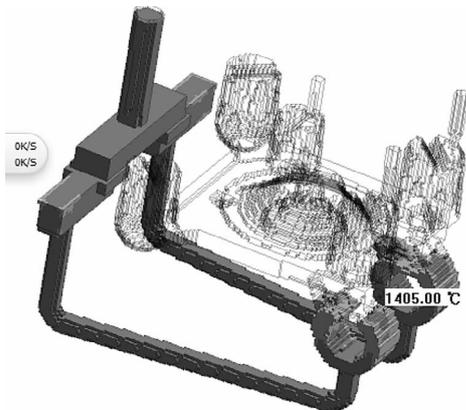


图12 新工艺 $t=2.88$ s时充型模拟结果

Fig. 12 The simulation result of filling mould at 2.88 s with improved technology

改进后工艺流场压力显示，铁液在吊环处没有负压，发生卷气夹渣缺陷可能性较小(图13)。

3.3 熔炼及浇注

为提高铁液纯净度，防止有害元素在铁液结晶和

组织形成过程中产生大量氧化夹杂。在熔炼、浇注过程中加强以下几方面控制。

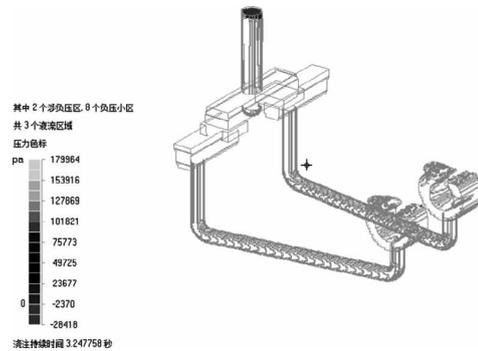


图13 新工艺流场压力

Fig. 13 The flow field pressure of improved process

原材料：生铁选用P、S、Mn、Ti及Cr、V、Mo等其他特定微量元素含量很低且质量稳定的高纯生铁^[6]；废钢选用成分相近，有害元素含量较低的优质废钢；球化剂选择镁含量6%左右、稀土含量不超过2%的中镁低稀土球化剂^[7]；回炉料选用低温冲击类回炉料。

在保证球化的前提下尽量降低球化剂、孕育剂加入量，减少球化剂和孕育剂中的Mg、Si等元素的氧化反应，同时严格控制孕育剂块度，防止块度过大，造成铁液凝固时偏析。

温度方面：由于球墨铸铁的球化、孕育处理工程中，要求加入大量的处理剂，这使铁液温度要降低 $50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，为了保证浇注温度，铁液熔炼温度控制在 $1500\sim 1550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、铁液球化后适当镇静，使渣和气体有足够的时间上浮，浇注温度控制在 $1352\sim 1420\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。熔炼、浇注过程中铁液表面用覆盖剂，减少铁液与氧气反应，产生氧化物。浇注前，扒渣5~6次，以减少铁液里的氧化物，防止铸件产生夹渣缺陷。

3.4 高温铁素体化退火

为获得全铁素体基体组织，彻底消除渗碳体和珠光体，对铸件进行高温铁素体化退火(图14)。首先，将铸件加热到 $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ 完全奥氏体区，保温3 h，让铸件完全奥氏体化，再炉冷至 $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保温3 h，待铸件金属基体充分转变为铁素体，再随炉冷却至 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷。

4 结果及分析

4.1 铸件理化检验

铸件的化学成分(质量分数)：3.81% C、2.03% Si、0.09% Mn、0.012% S、0.028% P、0.046% Mg_残、0.010% RE_残、0.002% Ni、0.010% Cu、0.019% Ti、0.021% Cr、0.001% Mo、0.023% Al、0.006% V、0.001% Co、0.001% Sb、0.001% Sn、0.001% Pb、0.008% Ce、0.002% La、0.002% Zn。力学性能：抗拉

强度425 MPa, 屈服强度285 MPa, 伸长率24%, 布氏硬度HB 143; 温度 (-40 ± 2) °C时, 夏比缺口冲击试块冲击功值分别为: 16.0 J、16.5 J、16.0 J。试样微观组织如图15所示, 球化等级: 球化分级2级, 石墨等级6级, 铁素体含量 $>95\%$ 。

4.2 铸件无损检测

超声波探伤检验, 铸件整体符合EN9933超声波探伤标准。X射线探伤检验, 关键区符合ASTM E446标准1级, 其他区域符合ASTM E446标准2级要求。磁粉探伤检验: 铸件关键区符合EN1369标准SM1、LM1a/AM1a要求, 其他区域符合SM2、LM2a/AM2a要求。

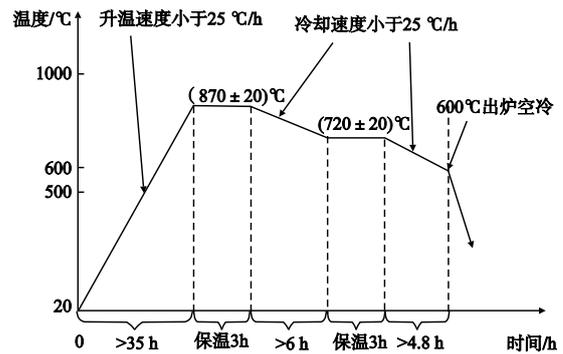
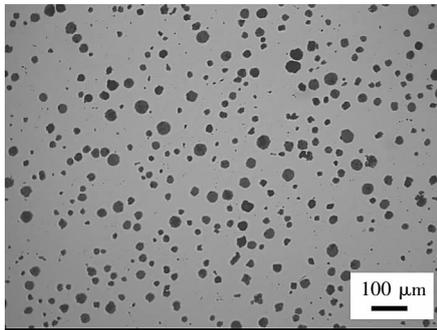
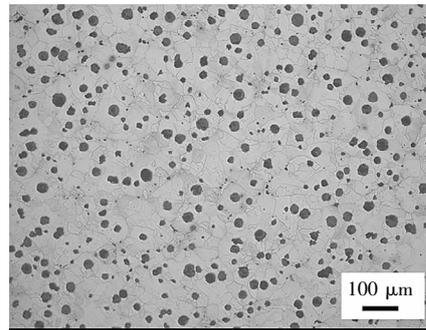


图14 铸件的退火工艺

Fig. 14 The annealing process of casting



(a) 侵蚀前



(b) 4%硝酸酒精溶液侵蚀后

图15 试样微观组织

Fig. 15 The microstructure of sample

5 结论

(1) 采用高纯净度的原材料, 合理控制球化、孕育和浇注工艺, 减少铁液内部有害元素含量, 提高铁液纯净度是防止低温球铁铸件磁痕缺陷的前提。

(2) 低温高韧性球铁铸件表面磁痕缺陷主要由铁液内部氧化夹杂物汇聚而成, 工艺设计既要保证浇注系统进液平稳, 又要保证铁液在铸件型腔内充型平稳, 防止铁液飞溅和持续负压卷气, 产生氧化夹杂。

参考文献:

[1] 赵金峰, 穆福超. QT400-18高韧性球墨铸铁的生产 [J]. 现代铸铁,

2005 (3): 40-42.

[2] 洛阳市科学技术学会. 铸铁熔制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.

[3] 李弘英, 赵成志. 铸造工艺设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[4] 陈正周. 球墨铸铁件磁粉探伤缺陷及预防措施 [J]. 铸造, 2013 (10): 28-32.

[5] 陈立亮, 刘瑞祥. 华铸CAE/InteCast集成系统使用手册R10.0 [M]. 武汉: 华中科技大学华铸软件中心, 2011.

[6] 中国铸造协会. 铸造用高纯生铁 [S]. 北京: 中国铸造协会, 2011.

[7] 沈洪杰, 王泽华. 低温球墨铸铁的研制 (上) [J]. 金属加工, 2008 (15): 52-54.

(编辑: 刘冬梅, ldm@foundryworld.com)

(选自《铸造》2014年第6期)