

Structure Optimization and Performance Improvement of Aluminum Cylinder Head Castings*

Bingrong Zhang¹, Zhongling Sun¹, Shenjun Tian²

¹Shandong Tailai Aluminum Foundry Technology Co. Ltd., Laiwu

²Chery Automotive Co. Ltd., Wuhu

Email: brzit@yahoo.com.cn

Received: Dec. 29th, 2012; revised: Jan. 18th, 2013; accepted: Feb. 3rd, 2013

Abstract: Light-weighting, thinning, precision and strengthening are always the objectives to which we have been doing our best for automotive and engine fields. This work has reviewed some researches made by the authors in recent years on modification and optimization of the structure of aluminum cylinder head, as well as core-making materials and processes. In particular, the weight-reduction by the pre-casting of the spark plug holes and high pressure oil road holes in aluminum cylinder head castings were studied. The comparison and analysis were made on relative dimensions, clearance, surface roughness as well as the second dendrite arm spacing (SDAS) and mechanical properties with and without pre-casting.

Keywords: Aluminum Cylinder Head; High-Pressure Oil Road; Spark Plug Hole; Pre-Casting; SDAS

铝合金发动机缸盖铸件结构优化及性能改进

张炳荣¹, 孙忠领¹, 田身军²

¹山东泰来铸铝科技有限公司, 莱芜

²奇瑞汽车股份有限公司, 芜湖

Email: brzit@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012年12月29日; 修回日期: 2013年1月18日; 录用日期: 2013年2月3日

摘要: 轻量化、薄壁化、精准化、强韧化是发动机及汽车行业永远努力的方向。本文综合评述了近几年来作者在铝合金缸盖毛坯结构、型芯材料及制芯工艺等方面的优化改进, 重点涉及到缸盖毛坯的火花塞孔预铸、高压油道预铸工艺等毛坯结构减重, 并对结构减重前后的相关尺寸、清洁度、预铸表面的粗糙度及关键部位的二次枝晶间距(SDAS)和机械性能进行了比较分析。

关键词: 铝合金缸盖; 高压油道; 火花塞孔; 预铸; 二次枝晶间距

1. 研究背景及目的

最近十几年来, 汽车行业在中国经历了前所未有的迅猛发展。而汽车行业恰恰是铸件产品的最大用户, 我国汽车的庞大市场带动了汽车铸件需求的大幅度增长。铸件是汽车产品零部件的重要构成之一, 平均每辆汽车上接近 20% 重量的零部件为铸件产品, 一

台发动机上铸件产品所占重量高达 70%~80%。同样, 铸件产品用于汽车行业的比例也从原来的 20% 增加到现在的 30% 以上。

汽车零部件中的许多关键产品是通过铸造工艺制造的, 特别是一些结构复杂、热力学性能要求较高的零部件如发动机缸盖、缸体等。铸造优异的成型工艺是其它制造方法无法实现的, 同时铸件的材料性能又能满足这些零部件的使用性能要求, 且价格低廉,

*资助信息: 作者感谢山东省“泰山学者”和国家“千人计划”项目资助。

这是铸件得以在汽车零部件上应用并在相当长的时间内得以延续的重要原因^[1]。

为了适应汽车轻量化、节能环保的要求，铝、镁合金和铸铁材料相比由于比重方面的优势，并且铝合金高压铸造等近净成型技术能够适应薄壁化、精准化的产品制造要求，所以在汽车产品中得到越来越多的应用。随着对轿车的低油耗和低排放的严格要求，轿车必须更多地采用轻量化的铸件即铝、镁合金铸件。汽车自重每减少 10%，其油耗可减少 5.5%，排放可减少 10%。因此，中国汽车业，尤其是轿车业的发展，必将导致铝、镁铸件的与日俱增。为使汽车减轻自重，便要求汽车铸件必须轻量化、薄壁化、精确化、强韧化。所以，汽车上的铸铁件不断被重量轻的铝铸件取代。我国目前每辆轿车的铝合金用量仅在 100 Kg 左右，还达不到欧美等发达国家平均水平的 50%。随着环保、节能、安全、舒适等要求的提高，轿车的轻量化项目势在必行。铝合金由于具有较高的比强度和良好的导热性和耐腐蚀性，因此很多汽车公司多采用全铝型的发动机缸体和缸盖。

1.1. 发动机缸盖中高压油道预铸背景

在发动机正常工作状态下，为了减少发动机摩擦阻力，降低功率消耗，提高其耐久性，发动机内部会设计复杂的润滑系统。润滑系统需要在缸体、缸盖等发动机本体上开设油道，这些运送润滑油的油道都有一个共同的特点就是细长孔。一般直径为 $\phi 3.5\sim\phi 8$ mm，长度在 400 mm 左右(四缸机)。

目前这些油道基本都是先铸造成实体，然后通过加工来得到的，这种方式固然有其优点，但同时也存在很多典型问题，比如：细长加工易断刀；加工工时较长，以本文所取铝合金缸盖为例，加工其高压油道($\phi 8$ mm \times 400 mm)的工时需要 80 s，大约占缸盖总加工工时的 12%；油道泄漏造成的废品只能等加工后进行试漏实验才能判别，这些废品无疑将增加主机厂和铸造厂的生产成本。

所以对于铝合金缸盖来讲，高压油道预铸技术的应用不仅可以提产品质量还可以解决加工技术瓶颈，提高劳动生产率，同时也可以降低主机厂和铸造公司的生产、管理和质量成本。更重要的是可以为同类型产品的设计开发提供术参照。

1.2. 发动机缸盖中火花塞孔预铸背景

缸盖作为发动机重要零部件之一，其燃烧室承受着发动机工作时近 70 MPa 的爆发压力和高达近 300 °C 的壁面温度，工作环境十分恶劣。为了满足 DOHC、GDI 等发动机新技术的应用，缸盖的气道、水套、油道等结构设计越来越复杂。复杂结构虽然满足产品的功能要求，但给铸造工艺带来了较大的难度。比如较为突出的火花塞附近的油水混合问题。这类问题一般是铸件内的裂纹造成的，而裂纹的产生大多与在交变应力和冷热冲击载荷共同作用下铸件内部的氧化物夹杂、组织疏松以及粗大 Si 相导致裂纹扩展等有关^[2]。在对不良品进行取样分析时，发现火花塞孔壁处存在裂纹。裂纹处取样化学成分分析正常，但金相分析发现 α 铝固溶体枝晶发达，二次枝晶间距(SDAS)高达 60 μm ，晶间有大量微观缩孔存在(见图 1)。分析标明疏松的存在与局部结构厚大，铸造时产生热节，不能实现顺序凝固有关。

为了解决上述问题，使得缸盖铸件内部结构尽量均匀，通过实现自下而上顺序凝固、然后通过冒口补缩解决火花塞孔周围疏松导致泄漏的问题，我们尝试了重力铸造铝合金缸盖的火花塞孔预铸技术。即：在现有工艺条件下，根据缸盖的结构特点，在冒口芯上直接增加火花塞孔预铸砂芯，或单独制作火花塞孔预铸砂芯，再将其定位装配在冒口芯上。由于火花塞孔在主机厂还要机加工，所以预铸技术的应用不仅可以提产品质量还可以提高金属材料的利用率，降低铸造公司的生产成本。

2. 高压油道和火花塞孔预铸可行性

2.1. 铝合金缸盖高压油道预铸可行性分析

2.1.1. 产品结构分析

本文试验用的发动机缸盖结构为双顶置凸轮轴

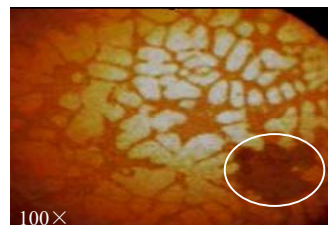


Figure 1. Microstructure of spark plug zone in aluminum cylinder head with defects
图 1. 带有缺陷的铝合金缸盖火花塞孔位置金相组织

四缸十六气门，高压油道布置如图 2。该缸盖中平行设置两个高压油道。高压油道长 400 mm，直径只有 8 mm，高压油道上均布着 16 个 $\phi 12$ mm 液压挺杆孔和 8 个 $\phi 4$ mm 凸轮轴档润滑油孔(此尺寸都为加工后的尺寸)。挺杆孔和高压油道前后两端都有加工装配要求，此处需要通过后续加工来得到。另外，对整只缸盖有 12 mg 清洁度的产品技术要求。由于铸造表面和加工表面毕竟不同，我们还需要检测缸盖高压油道采用预铸后对发动机油压建立时间的影响。

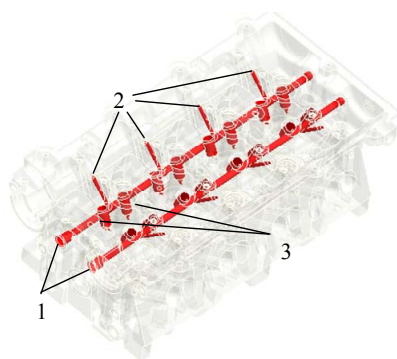
2.1.2. 型芯结构分析

如图 3 所示，如果只预铸两个高压油道，400 mm 长的型芯容易产生变形，从而导致铸件壁厚不足造成油道泄漏问题，而且在缸盖前后端模上设计定位不太容易实现，故不能仅仅预铸两个高压油道。高压油道还均布着挺杆孔($\phi 12$ mm \times 16 个)和凸轮轴档润滑油孔($\phi 4$ mm \times 8 个)，显然凸轮轴档润滑油孔芯由于太细长易断芯，且其轴线不与挺杆孔平行，制作型芯时不能同时分型出模，故只能将高压油道和液压挺杆孔进行预铸。型芯定位考虑在挺杆孔型芯上布置芯头(部分用于定位，部分用于支撑)，并定位在现有的冒口芯上(冒口芯上留有芯头座)，冒口芯再定位在外模，从而完成型芯的定位。

另外，由于挺杆孔和高压油道两端有加工装配要求，故设计型芯时留有单边 2 mm 的加工余量。非加工装配表面实现型芯预铸。预铸型芯(高压油道型芯)的结构如图 4 所示。

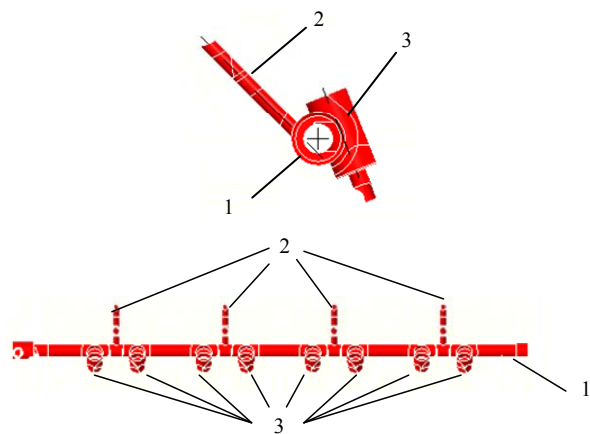
2.1.3. 型芯材料和制芯工艺的选择

目前广泛应用于铸造细长孔的型芯材料主要有



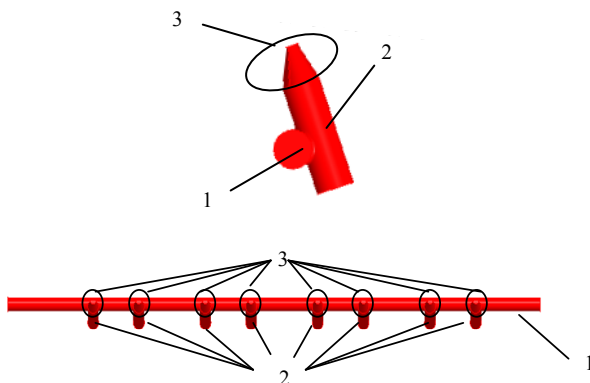
1: 铝合金缸盖高压油道; 2: 凸轮轴档润滑油孔; 3: 液压挺杆孔。

Figure 2. High-pressure oil roads in cylinder head
图 2. 铝合金缸盖油道示意图



1: 铝合金缸盖高压油道; 2: 凸轮轴档润滑油孔; 3: 液压挺杆孔。

Figure 3. High-pressure oil road, hydraulic tappet hole and lubrication holes
图 3. 缸盖加工后高压油道、液压挺杆孔及凸轮轴档润滑油孔位置示意图



1-铝合金缸盖高压油道型芯; 2-液压挺杆孔型芯; 3-型芯用于定位支撑的芯头。

Figure 4. 3D model of pre-casting core for high pressure oil road in cylinder head
图 4. 缸盖高压油道预铸型芯 3D 模型

石墨、树脂砂、可溶性和非可溶性复合材料等，这些型芯材料都各有其优点，但以上材料制造工艺复杂、生产过程难控制，并且在尺寸精度、力学性能、铸造后续清理工艺和质量成本等指标不能满足批量生产铝合金缸盖高压油道预铸的要求^[2-7]。应用于铝合金高压油道预铸工艺的型芯材料必须具有较高的强度、较低的发气量，此材料制造的型芯必须满足制造工艺简单易于实现，并具有较好的尺寸精度、表面粗糙度及尺寸稳定性，还必须具有良好的溃散性，以便于清理。

我们知道，覆膜砂热芯盒工艺凭借它高强度、低发气量、成型表面质量好、易溃散和存放时间长等优点普遍应用发动机缸体缸盖等零部件的铸造，尤其广泛应用于缸盖水套芯和气道芯的制造。结合造型材料

公司提供的高强度低发气量覆膜砂的数据(抗弯强度 $\geq 4 \text{ MPa}$, 发气量 $\leq 12 \text{ ml}\cdot\text{g}^{-1}$, 灼减量 $\leq 2.3\%$, 所铸铝合金表面粗糙度达到 Rz63),我们决定采用此材料并选择比较普遍的热芯盒工艺。

2.2. 火花塞孔预铸前后的铸造模拟分析

我们对此缸盖预铸前后状态的模型进行了对比凝固模拟分析。图 5(a)是非预铸缸盖毛坯分析模型; 如图 5(b)是该模型 180 s 瞬时凝固模拟的结果, 可以看出火花塞柱局部温度较高, 凝固缓慢, 也就是说该区域晚于冒口区域而最后凝固。正如图 5(c)显示那样, 非预铸缸盖模型疏松缩孔预测区域, 火花塞柱内部出现多处缩松。图 5(d)为预铸缸盖模型 180 s 时深色未凝固区域全部移至冒口。从模拟分析结果可以看出, 火花塞孔预铸技术使铝合金缸盖火花塞孔处的壁厚

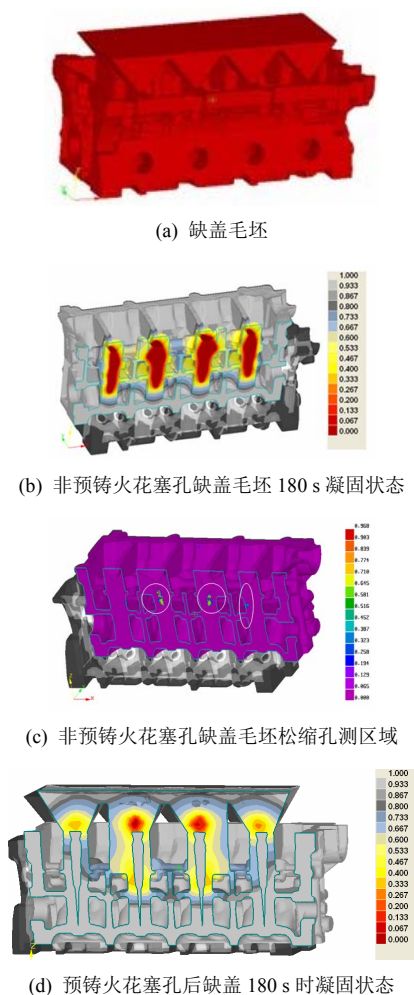


Figure 5. Casting simulation model and comparison
图 5. 铸造模拟模型与对比

均匀, 消除了热节, 加快了局部冷却速度, 在整个缸盖从燃烧室面到补缩冒口方向基本实现了顺序凝固。

3. 结构优化前后 SDAS 和力学性能对比结果

3.1. 火花塞孔预铸对 SDAS 的影响

图 6 为火花塞孔预铸前后的缸盖实物照片。

为了研究火花塞孔预铸对 SDAS 的影响, 如图 7 所示对缸盖进行解剖, 以比较预铸和非预铸两种状态 SDAS 的大小。

SDAS 检测结果表明:

1) 无论预铸或非预铸状态缸盖, 每一组从第 1 到第 4 剖面, SDAS 均呈减小趋势, 平均下降 36%。两种状态的曲线形状基本一致, 说明火花塞孔预铸技术并未对现有铸造工艺产生负面影响。

2) 与非预铸状态相比, 预铸后每组火花塞孔各剖面的 SDAS 更小, 约减小 5~15 μm 。即火花塞孔预铸技术加快了缸盖局部的冷却速度。

3) 观察第一、二组非预铸缸盖的数据, 可以看出 2、3 剖面几乎是同时凝固或非顺序凝固状态。而同组预铸状态的数据实现了铸件的顺序凝固。

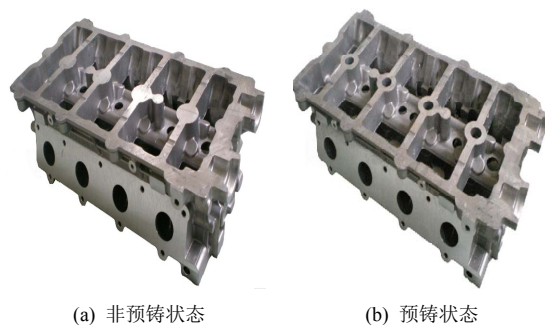


Figure 6. Cylinder head castings with and without spark plug holes
图 6. 非预铸与预铸状态缸盖毛坯实物图

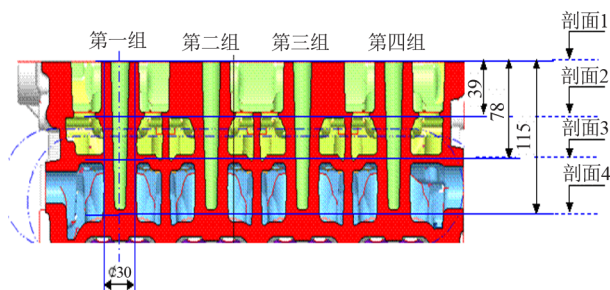


Figure 7. Sections for microstructure samples (mm)
图 7. 显微结构取样剖面位置(mm)

合金成分和铸造工艺参数一定时,影响 SDAS 的主要因素是冷却速率(凝固时间)^[3]。枝晶生长过程中,较粗的二次枝晶臂不断壮大,较细的枝晶臂逐渐溶解。每溶解一个细枝晶,SDAS 即增大一倍。局部凝固时间增长,枝晶粗化越充分,SDAS 愈大^[4,6]。火花塞孔实现预铸可以有效消除热节,使铸件壁厚均匀,提高局部的冷却速度,从而 SDAS 会变小。从凝固模拟和实测结果都证实了这一点。

如图 8 所示,火花塞孔预铸技术的应用有效地改善了火花塞孔附近的金相组织。

3.2. 火花塞孔预铸对机械性能的影响

火花塞孔周围取样抗拉强度的测试结果表明:

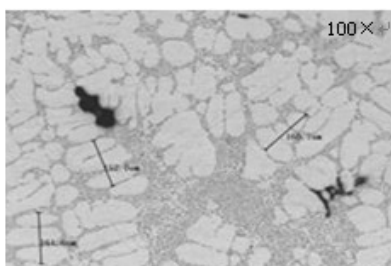
预铸状态的缸盖火花塞孔位置的抗拉强度较非预铸状态的平均值提高 7%,特别是第 1、2 缸提高较多,分别达到了 13%、8%(见图 9)。

火花塞孔预铸状态的缸盖机械性能能够提高的主要原因是得利于预铸后二次枝晶间距的缩小。

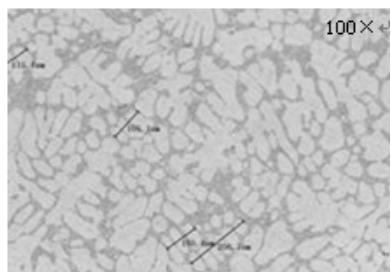
3.3. 高压油道预铸对缸盖关键尺寸、清洁度和表面粗糙度的影响

3.3.1. 尺寸检测结果

对两件缸盖毛坯进行了划线检测,尺寸检测能满



(a) 火花塞孔预铸前金相组织



(b) 火花塞孔预铸后金相组织

Figure 8. Microstructure comparison before and after pre-cast spark plug holes

图 8. 火花塞孔预铸前后金相组织对比

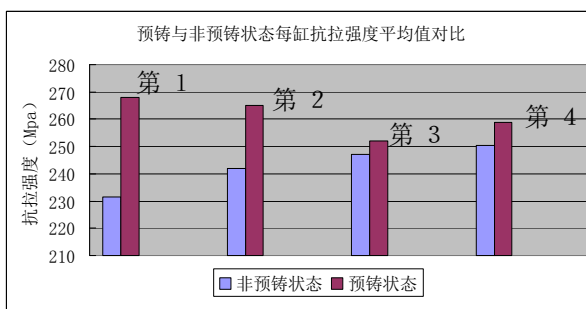
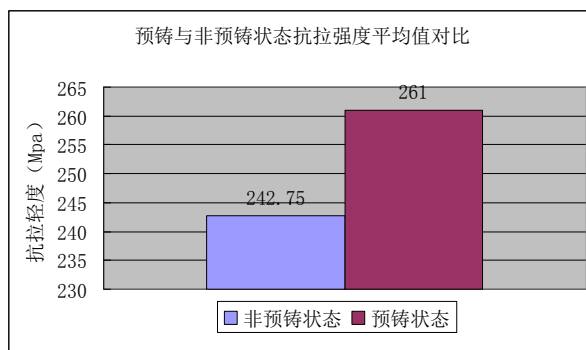


Figure 9. Mechanical property comparison in cylinder heads with and without pre-cast spark plug holes

图 9. 非预铸与预铸状态缸盖火花塞孔处机械性能对比

足产品图纸要求,并对样件进行了解剖检测,预铸油孔壁厚均在±0.2 范围内波动,未出现壁厚不均匀显现。

加工后的成品检测使用三坐标程序进行检测,与量产件不同的是增加了高压油道两端和液压挺杆孔的检测,检测报告均符合图纸要求,未出现异常。预铸孔加工后需装配的表面未出现“黑皮”现象。

3.3.2. 缸盖清洁度检测结果

相应标准对这款缸盖加工后的清洁度要求为 12 mg,我们抽检的 3 只高压油道预铸孔缸盖的清洁度分别为 8.2 mg, 8.5 mg, 8.0 mg,符合标准规定的技术要求。

3.3.3. 预铸孔表面的粗糙度检测结果

将高压油道预铸解剖样块与粗糙度样块进行对比,能够达到 R_z63 的要求,和我们现生产气道的表面相近。

另外,如火花塞孔预铸一样,高压油道预铸同样对周围的 SDAS 起到了降低的作用,有利于该位置金相组织的致密,减少泄漏。

4. 主要结论

1) 通过对产品结构和铸造、加工工艺的分析、实

验以及检测,充分验证了金属型重力铸造铝合金缸盖条件下高压油道和火花塞孔预铸工艺的可行性。这不仅对缸盖毛坯减重有着重要意义,同时在不改变现有的铸造工艺条件下,使铸件壁厚均匀,提高了铸件局部的冷却速度,缩短了局部的凝固时间,特别是火花塞孔预铸实现了缸盖的顺序凝固,有效地减小了二次枝晶间距值,从而可以提高该区域的合金致密度和力学性能。消除铸件厚大部位的热节,使铸件壁厚均匀,提高金属利用率,节约铸造公司的生产成本。

2) 铝合金缸盖高压油道预铸技术的应用解决了部分细长孔加工的技术难题,提高劳动效率,降低材料和加工成本。此技术的应用成功,也为将来同类产品的设计开发提供了宝贵的经验。

3) 火花塞孔预铸技术提高了铸件局部的冷却速度,缩短了局部的凝固时间。从而有效减小 SDAS 的值。二次枝晶间距普遍缩小 5~15 μm ,有效抑制了显微缩松的产生,解决了缸盖产品此位置的油水混合问题。因此不仅对现有工艺不产生负面影响,反而会提

高产品质量。

4) 通过火花塞孔预铸,明显提高了铝合金缸盖火花塞孔位置的机械性能。抗拉强度平均值提高 7%,有利于发动机的整机性能的提升。

参考文献 (References)

- [1] 王成刚,马顺龙.汽车铸件材质的应用现状与发展[A].2009年中国铸造活动周论文集[C].沈阳:中国机械工程学会铸造分会,2009.
- [2] 朱三湖.正样箱体精密铸造[J].特种铸造及有色合金,2002,1:32-34.
- [3] 谭昊,易出山.盐在铸造中的应用及其局限[J].铸造技术,1998,2:39-40.
- [4] 陈维平,郑洪伟.高压铸造用水溶性盐芯的研究进展[J].铸造技术,2010,2:241-244.
- [5] 划向东,易出山.可溶性型芯技术的发展及应用[J].现代铸铁,1998,3:15-17.
- [6] 刘小瀛,王宝生.张立同氧化铝基陶瓷型芯研究进展[J].航空制造技术,2005,7:26-29.
- [7] 熊建平,赵国庆.陶瓷型芯在航空发动机叶片生产中的应用与发展[J].江西科学,2007,25(6):801-806.