

# 高强韧性球墨铸铁曲轴铸造技术研究及应用

杨思一<sup>1</sup>, 丛建臣<sup>2</sup>, 孙海涛<sup>2</sup>, 李端玲<sup>3</sup>, 于海明<sup>2</sup>, 慈惟红<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学机械工程学院, 山东 淄博 255049;

2. 天润曲轴股份有限公司, 山东 文登 264400; 3. 北京邮电大学自动化学院, 北京 100876)

**摘要:** 为了提高球墨铸铁曲轴的强韧性和铸造质量, 降低铸造废品率, 研究了曲轴的微合金化技术、铁液共晶点控制技术、球化处理技术、曲轴无型芯铸造技术和组织均匀化正火处理技术, 成功研制出高强韧性球墨铸铁曲轴。提出了锡以孕育形式加入铁水中进行合金化的方法, 既增强了合金化作用, 又促进了孕育效果, 发现了锡对铜在基体中分布的作用规律, 提高了材料的强度和韧性。提出了铁液共晶点控制技术, 曲轴铸件缩松缺陷由原来的 1.44% 降到 0.19%, 远低于日本 10%、德国 15% 的废品率指标。该技术节能、减排、降耗, 在铸造行业具有重要推广价值。

**关键词:** 曲轴; 球墨铸铁; 微合金化; 共晶点; 球化处理

## 1 前言

发动机广泛应用于汽车、工程机械、农业机械和国防装备等领域中。曲轴作为发动机核心部件在能量转换和功率输出过程中起关键性作用, 球墨铸铁曲轴具有良好的耐磨性、减震性、加工性以及性价比高等优点, 在国内被广泛应用。为满足节能减排的更高要求, 新型中等功率发动机向着高速、增压、高功率密度方向发展, 曲轴所承受的载荷增加, 要求曲轴具有更优良的综合机械性能。

高性能球铁通常有两类, 一是铜钼球铁<sup>[1-2]</sup>; 二是等温淬火球铁 (ADI)<sup>[3]</sup>。铜钼合金、镍铜合金及镍钼合金铜钼球铁具有高的抗拉强度, 铜含量为 0.5% 左右, 钼含量为 0.35% 左右, 其熔点非常高, 只能在电炉中加入, 仅起到合金化的作用。钼是一种强碳化物形成元素, 并易在晶界偏析, 如图 1 (a) 所示, 经热处理也不能消除, 随着钼的增多, 虽然材料强度上升, 但韧性下降, 如图 2 (a) 所示, 满足不了新型发动机曲轴服役的要求。ADI 的性能虽然可以和锻钢相媲美, 但其工艺复杂, 技术难点至今无法克服, 且需要加入大量贵重合金元素, 国内外虽有研究但很少应用在曲轴上。传统球铁曲轴存在两大问题, 不能在保证高强度的同时具备高韧性, 其次, 无法实现曲轴的高质量一致性, 满足不了新型发动机的需求, 成为制约发动机发展的瓶颈。

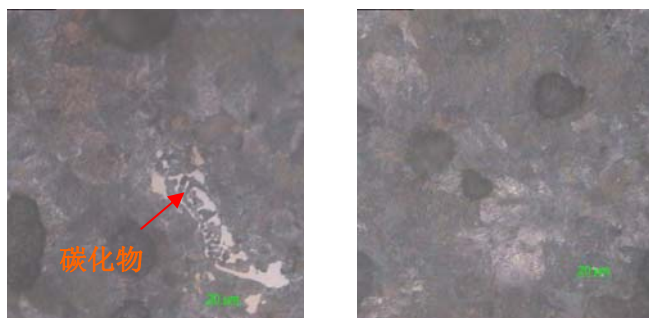
因此, 必须通过技术创新与科学实验, 在保证高强度的情况下获得高韧性, 开发出性能稳定的球墨铸铁曲轴。本研究以实现球墨铸铁曲轴在新型发动机方面的大规模应用为目标, 以自主创新研究为手段, 围绕球墨铸铁曲轴的材质和铸造工艺技术方面进行了大量的试验研究, 取得了重大突破, 开发出了的高强韧性球墨铸铁生产关键技术。

## 2 研究过程

### 2.1 微合金化技术

分析研究了铜、镍、锡、铬、铌等合金元素的优缺点, 采用正交试验法, 按不同配比进行了近百次试验, 获得了大量技术数据。最终确定铜锡合金代替铜钼合金。

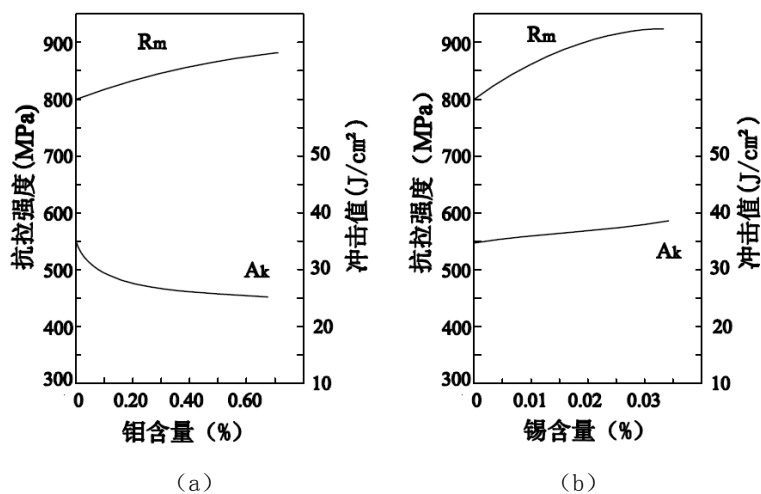
基于锡的熔点只有 230℃，在铁水中能够即时熔化并完全扩散的特征。通过将锡配制到孕育剂中，不仅充分发挥了锡的合金化作用，又强化了孕育效果。铁水凝固时，锡原子被吸附在共晶团和石墨球周围，形成壳型状态，阻碍原子扩散，破坏了晶粒长大条件，使晶粒得到细化。包围在石墨球周围的锡原子，减缓了碳从基体向石墨球的扩散，从而促进珠光体形成，增加珠光体稳定性，使石墨球细小均匀，如图 1 (b) 所示，提高了材料的强度和韧性，如图 2 (b) 所示。



(a) 加钼

(b) 加锡

图 1 正火后金相组织对比 (500×)



(a)

(b)

图 2 合金元素对球铁机械性能的影响

借助于扫描电镜和电子探针进一步研究发现，由于锡的加入，改变了铜的组织偏析状态，铜元素在材料基体内的分布变得很均匀，如图 3 所示。改善了组织的均匀性，提高了曲轴的力学性能。试验确定，锡的含量控制在 0.02% 左右，铜含量仍控制在 0.5% 左右，取消 0.6% 钼铁的加入，每年节约钼铁 80 余吨，曲轴吨成本下降 15%。

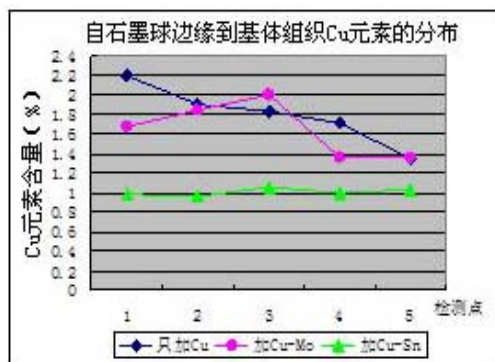


图3 铜元素在铸件内的分布

从表1可以看出,与国内铜钼球铁球铁曲轴相比,本项目球铁曲轴的抗拉强度、延伸率和冲击韧性明显提高。提高了曲轴的承载能力和可靠性,使用寿命延长。本项目生产的微锡合金化球铁性能超过了铜钼合金球铁的水平,达到了锻钢曲轴水平。

表1 机械性能比较

指标	材质	
	铜钼球铁曲轴	铜锡球铁曲轴 (本项目)
抗拉强度 (MPa)	872	927
延伸率 (%)	2.6	3.6
冲击值 (J/cm <sup>2</sup> )	26	37

## 2.2 铁液共晶点控制技术

具有共晶成分的铁液,结晶范围窄,易补缩,工艺性最好。生产过程中通常将铁液碳当量(C+1/3Si)控制在共晶点附近,以获得优质铸件。生产过程中,在碳当量、浇注温度等条件相同的条件下,不同来源的炉料(生铁厂家变换或加入比例改变等),其缩松的废品率相差很大,有时缩松废品率在1%以下,有时却高达30%。

经过研究发现,铁厂无论是矿粉改变还是炉料加进废旧钢渣,铁水五大元素(C、Si、Mn、S、P)均为保证指标,都会调整到要求的范围之内,而众多微量元素没有控制且根本无法控制。尤其是在国内矿粉紧张、大量依赖进口的情况下,铁厂所用矿粉更是来自“五湖四海”,造成生铁中微量元素呈多样性与多变性,更使铸造企业无章可循,质量波动大。

铸铁的实际共晶点不仅与C、Si有关,而且与铁液中所有的元素有关,阻碍石墨化元素Mn、Cr、V、Mo等,会使共晶点右移(碳当量减少),促进石墨化元素Si、S、P、Al、Cu、Sn、Ni等会使共晶点左移(碳当量提高)<sup>[4]</sup>。由于对微量元素的作用无法进行控制,实际碳当量经常偏离共晶点,铸件缩松缺陷非常多。

针对微量元素含量变化引起铸件内在质量大幅波动问题,本项目综合铁水中各元素对共晶点的影响,

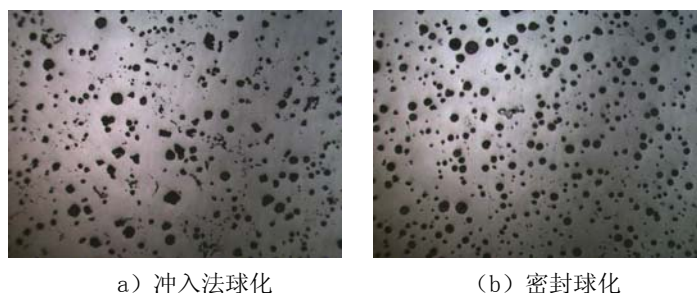
结合铁水凝固曲线，研发了原铁液共晶点控制技术，解决了微量元素变化对铁液共晶点影响的难题，使铁水碳当量真实可控，内在质量得到了有效保证。缩松缺陷由原来的 1.44% 降到 0.19%，远低于日本、德国知名企业的指标。大大提高了曲轴内在质量的一致性，曲轴疲劳断裂倾向明显降低，曲轴断轴率由原来的 450PPM 降到 120PPM。

### 2.3 球化处理技术

铸造企业一直沿用冲入法进行铁水球化处理，球化剂中镁元素烧损严重，球化剂使用量大，球化质量不稳定，组织内含有大量片状和蠕虫状石墨，对基体割裂作用大，影响性能，温度损失大，渣量多，铸造废品率高。

依据球化剂中的镁元素高温气化的特点，设计了集球化、浇注为一体的铁水包，研制了适合大批量流水作业的密封球化成套装置。使球化处理在密封的包内进行，球化剂遇高温铁水产生大量镁蒸气，包内压力瞬间上升，形成正压，促使球化反应在正压无氧状态下进行，防止了镁的氧化烧损，球化质量稳定可控。

镁的吸收率由原来 30~40% 提高到 64%，球化剂平均加入量减少 50%，球化率高达 90% 以上，石墨球圆整，球化质量好，如图 4 所示；球化过程铁水温度损失由原来的 70℃ 降低到 40℃，有利于夹杂物上浮，减少夹渣缺陷，极大地降低了镁在反应过程中形成的烟光尘，劳动环境大大改善，如图 5 所示，节能减排效果十分显著。



a) 冲入法球化

(b) 密封球化

图 4 球化金相组织 (100×)



(a) 冲入法球化

(b) 密封球化

图 5 球化工作环境比较

### 2.4 曲轴无型芯铸造技术

对连杆不在同一截面的曲轴，国内外生产企业至今仍采用型芯的方法铸造，曲轴铸造通常采用整体对开、平面分型，如图 6 所示，就六缸曲轴而言，会造成 b、c、d、e 连杆轴处在分型线夹角一百二十度的

上、下空间中，四个连杆轴颈需要砂芯来形成。制芯需要专门的设备及工装，制芯过程包括配砂、加树脂、混制、检验、射芯、刷涂料、干燥。工序繁琐，工人劳动强度高，生产率低，生产成本低，环境污染严重，并且芯子高温燃烧易产生气孔等，下芯经常造成曲轴夹砂缺陷，曲轴废品率高。

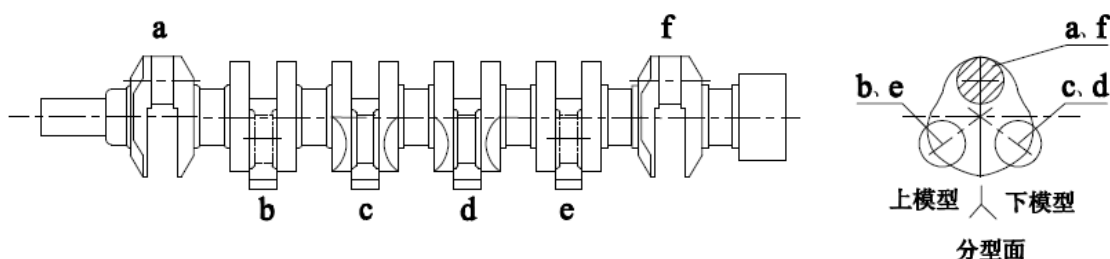


图6 六缸曲轴分型示意图

为了解决上述问题，发明了无型芯铸造技术，工装设计时沿两端主轴与连杆轴中心线，对于无法起模的连杆轴颈 b、c、d、e 部分，在连杆轴颈中心与中间位置选择一个面，将连杆轴颈分成两型，将拔模斜度由原来的直线型改为圆弧斜线型，在造型过程中避免尖角的产生，不易掉砂，同时圆弧面可以增加型砂强度，便于起模，这样原先由芯子形成部分在造型时自动形成，取消了型芯，改善了温度场，并在此基础上设计新的浇注系统，实现控制凝固。省去了制芯、下芯、下冷铁三道工序，实现无型芯铸造。

该项技术简化了操作工序，避免了夹砂等铸造缺陷；节约原辅材料，铸造成本下降 6% 左右；劳动强度低，生产效率高；根除了型芯产生的有害气体，工作环境得到大程度改善，保证了工人的身心健康。

## 2.5 组织均匀化正火处理技术与装备

通常正火方式是工件采用箱式电炉加热，正火出炉温度达 800℃ 以上，工件出炉后平放风雾冷却。风雾只能从一个方向吹向工件，工件正对风雾方向和背面不能同时均匀冷却，存在阴阳面。由于冷却条件不同，工件正火后各部位珠光体含量、珠光体片间距和晶粒大小均存在很大差异，导致工件不同部位机械性能差异极大。同时，冷却条件不同，组织应力和热应力也存在很大差异，造成工件变形较大。

本研究开发了自动旋转风雾冷却技术，如图 7 所示，工件垂直悬挂并旋转，采取侧向喷雾冷却，自动调整风雾量。使各部位冷却均匀一致，正火后的组织一致性得到提高，保证了材料性能均匀一致，本体硬度差由 50HB 降低到 20HB。同时，均匀冷却后工件的热应力和组织应力分布均匀，减少了工件变形。



图7 旋转风雾冷却

在此基础上研制了一条悬挂式连续自动生产线，解决了原箱式炉存在的能耗高、效率低、环境恶劣等问题，取代了 16 台箱式炉，生产效率大幅提高，采用自动控制系统，实现了工件自动入炉、出炉、冷却，控制冷却至 500℃，自动进入回火炉，利用余热进行回火处理，每年可节电 1200 万度。

### 3 研究结果

#### 3.1 工艺指标

从表 2 可以看出，本项目球化工艺与国内外使用球化工艺相比，镁的吸收率提高，球化剂的使用量下降，铁水温度损失减小，球化质量好，劳动条件好。

表 2 工艺指标

球化方法 指标	球化指标			缩松废品率 (%)		
	国内 冲入法	国外 盖包法	本项目	日本	德国	本项目
Mg 的吸收率 (%)	35	60	64			
球化剂消耗量 (%)	1.9	1.2	0.9			
球化质量	差	优	优	10	15	0.19
铁水温度损失 (°C)	70	40	40			
劳动条件	差	好	好			

曲轴铸件缩松废品率仅为 0.19%，远低于日本、德国指标。

#### 3.2 性能、经济指标

通过以上研究，球铁曲轴抗拉强度由原来的 872 MPa 提高到 927 MPa，韧性由 26 J/cm<sup>2</sup> 提高到 40 J/cm<sup>2</sup>。从表 3 可以看出，本项目球铁曲轴的疲劳弯矩分别提高了 38%、14.3%，安全系数提高，变异系数下降，性能优于锻钢曲轴，可靠性提高，使用寿命延长。主机厂采购价格分别下降 28%、35.7%。克服了锻钢曲轴设备投资大、加工复杂、能耗高、成本高等缺点，实现了以铁代钢。

表 3 WD615 曲轴指标比较

材质 指标	45# (国内外)	42CrMoA (国内外)	铜锡球铁曲轴 (本项目)
疲劳弯矩 (Nm)	3986	4814	5500
安全系数	1.72	2	2.5
变异系数	0.049	0.0405	0.0156
主机厂采购价 格 (元/支)	2500	2800	1800

## 4 结论

(1) 本研究针对曲轴韧性低、质量一致性差不能满足新型发动机需求问题进行了深入研究,在曲轴材质和铸造工艺技术方面做了大量工作,特别是在微锡代铝合金化孕育和铁水共晶点控制两大关键技术上取得了重大突破,曲轴无型芯铸造技术结束了铸造曲轴需要下芯的历史,开发的正压无氧球化技术、组织均匀化正火处理技术与装备,创新性强,解决了生产过程质量波动的问题,成功研制出高强韧性球墨铸铁曲轴。

(2) 球铁曲轴经过装机运行,曲轴的各项技术质量指标均达到了产品设计要求,球铁曲轴完全可以取代锻钢曲轴。该项研究解决了行业国际性难题,实现了球铁曲轴在新型发动机上的大规模应用,打破了锻钢曲轴在新型发动机上一统天下的局面。所配套发动机产品大量出口国际市场,提高了国际市场竞争力。

(3) 该系统技术提高了铸造质量,降低了铸造废品率,节约了铸造成本,节能、减排、降耗,在铸造行业具有重要推广价值,对推动我国由铸造大国向铸造强国转变具有重大意义。

### 参考文献:

- [1] 严水娟,铸态 QT850-3 球墨铸铁曲轴的生产. 现在铸铁, 2005, (5):54-55.
- [2] 刘光华,张永秀,尹晓舜,李瑞. 球墨铸铁曲轴应用前景的评估. 2005, (1):1-6.
- [3] 刘光华,王怀林. 增压柴油机等温淬火球铁曲轴的开发与应用. 现在铸铁, 2007, (2):13-18.
- [4] 吴德海,钱立,胡家骢. 灰铸铁球墨铸铁及其熔炼[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.