DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.06.002

# 铸铁合金凝固过程中石墨演化过程研究

## 杨贵春<sup>1,2</sup>,张树勇<sup>2</sup>,梁兴雨<sup>2</sup>

(1. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072; 2. 中国北方发动机研究所, 天津 300400)

摘 要:以柴油机缸盖用铸铁材料(HT300、RuT300、QT600)为研究对象,采用液淬的方法制备不同凝固阶段的试 样,并分析其凝固过程。研究铸铁的显微组织、相组成,分析显微组织演变机理,特别对石墨的生长过程进行了研究。结 果表明,共晶反应阶段蟜墨铸铁释放的热量较多,球墨铸铁次之,灰口铸铁释放的热量最少。铸铁合金石墨初始形貌均 为球状,且石墨球独立生长,在共晶反应阶段发生变异形成片状、球状或蠕虫状。石墨内部和外部元素差异较大,石墨内 部碳含量很高,四周出现 O、S、Si、Mg 等合金元素的富集现象。石墨核心碳元素的原子百分比为 91.72%;石墨靠外部分 的碳原子百分比降至 77.95%,S 元素原子百分增加 4.74%,Mg 元素原子百分比增加 5.09%。

关键词:铸铁合金;凝固曲线;淬火温度;石墨形貌

中图分类号: TG244

文章编号:1000-8365(2021)06-0445-05

## Microstructure Evolution of Cast Iron Alloys during Solidification

### YANG Guichun<sup>1,2</sup>, ZHANG Shuyong<sup>2</sup>, LIANG Xingyu<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin Ulniversity, Tianjin 300072, China; 2. China North Engine Research Institute, Tianjin 300400, China)

**Abstract**: Cast iron (HT300, Rut300, QT600) for diesel engine cylinder head was used as the research object. The solidification process of cast iron samples in different solidification stages was analyzed by liquid quenching. The microstructure and phase composition of cast iron were studied, and the evolution mechanism of microstructure was analyzed. The growth process of graphite was also studied. The results show that the heat release of vermicular cast iron alloy is spheroidal in its initial morphology, and the graphite spheroidal grows independently. During the eutectic reaction stage, the graphite spheroidal or vermicular shape changes. The internal and external elements of graphite are very different, the internal carbon content is very high, and the enrichment phenomenon of O, S, Si, Mg and other alloying elements appears around the graphite. The atomic percentage of carbon element in graphite core is 91.72%. The percentage of carbon atom in the outer part of graphite decreases to 77.95%, the percentage of S element atom increases by 4.74%, and the percentage of Mg element atom increases by 5.09%.

Key words: cast iron alloy; solidification curve; quenching temperature; graphite morphology

文献标识码:A

随着科技的不断发展,对于发动机比功率提出 更加严苛要求,导致缸体、缸盖之间的载荷越来越 大。尤其是对高功率柴油发动机来说,发动机在连 续工作时,缸体和缸盖的工作温度将会持续超过 200℃,局部温度超过500℃,该工况下铝合金的强 度会迅速降低,使缸体失去支撑作用,导致发动机 失效。研究发现,高性能蠕墨铸铁合金具备高强度、 良导热且综合性能优异等特点,这使得铸铁材料又 重新成为高功率柴油发动机的主要材料,并且日益 为人们所期待<sup>[1-3]</sup>。截止目前,大量学者研究合金元 素、冷却条件、制备工艺等对铸铁组织及性能的影

收稿日期: 2021-03-09 作者简介:杨贵春(1980—),山西代县人,研究员.研究方向:柴 油机设计及制造.电话:15291683286, Email:1842193222@qq.com 响规律<sup>[5-12]</sup>,但对铸铁凝固过程仍不能完全的了解, 尤其是对石墨的形核及生长过程研究更为缺乏,值 得深入研究。

## 1 实验材料及方案

表1为铸铁合金的化学成分。在中频感应电炉 中熔炼,将生铁和废钢放入感应电炉中进行熔炼,待 原材料热熔化后加入 Cu、V-Fe、Mo-Fe、Sn 等。采用 红外测温仪测量铁液温度,1470~1480℃扒渣后出 炉,采用包底冲入法,0.6% Fe-75Si 孕育剂(蠕墨铸

表1	铸铁合	金材料的	的化学成分	w(%)
		• /	• •	

Tab	.1 Ch	emical	comp	ositio	n of ca	st iron	alloys	
合金种类	С	Si	Mn	Мо	Cu	V	Sn	Fe
灰铸铁	3.4	1.8	0.6	0.3	0.05	0.065	0.095	余量
蠕墨铸铁	3.9	1.8		0.2	0.4			余量
球墨铸铁	3.8	2.4			0.6		0.03	余量

铁加入 0.54% MgRE 蠕化剂, 球墨铸铁加入 0.42% MgRE 球化剂, 均匀撒在浇包底部后用孕育剂覆盖)。待反应完成之后浇入树脂砂样杯(直径 30 mm, 高 50 mm),通过热分析仪记录热分析曲线,根据热分析曲线的不同凝固阶段选取温度点进行液淬。

用金相显微镜、扫描电子显微镜、能谱检测等 分析铸铁的显微组织、相组成,研究铸铁合金的显 微组织演变机理;使用 X 射线三维成像技术对灰铸 铁石墨的生长过程进行了研究。

## 2 试验结果及分析

#### 2.1 铸铁材料凝固过程热分析研究

图 1 为 3 种铸铁合金的热分析曲线。可以看 出,铸铁合金凝固过程中冷却曲线分为温度快速降 低、趋于平稳和再快速降低 3 个阶段,共晶反应阶 段存在明显差异。HT300 凝固曲线分为快速降低 区、初晶平台区和共晶反应区,共晶反应较为平稳 且未出现再辉现象。QT600 凝固曲线分为快速凝固 区和共晶反应区,共晶反应阶段铁液温度回升约为 4℃,出现再辉现象。RT450 的凝固曲线与灰铸铁一 致,均出现快速降低区、初晶平台区和共晶反应区, RT450 共晶阶段反应剧烈且出现明显再辉现象,铁 液温度升高约 18℃。因此,结合共晶反应阶段的再 辉现象可以判断不同类型铸铁的凝固过程,共晶反 应阶段蠕墨铸铁释放的热量较多、球墨铸铁次之、 灰铁的释放的热量最少。

## 2.2 铸铁合金凝固过程中组织演化过程研究

图 2 为 HT300 凝固过程中的淬火显微组织。可 以看出,HT300 凝固过程中石墨形貌由球状转变为 片状,并逐渐形成石墨共晶团。温度为 1 270 ℃,未 发现石墨析出;温度降至 1 210 ℃,析出少量球状石 墨,尺寸为 7~10 µm;温度降至 1 160 ℃,石墨尺寸 逐渐增大且数量增加;温度 1 150 ℃时石墨发生变 异,形貌由球状转变为片状;当温度小于 1 150 ℃, 初步形成石墨共晶团。在共晶反应后期,石墨共晶 团长大并连接在一起。结合 Fe-C 相图分析,1210~ 1 270 ℃时铁液完全处于液态,1 210 ℃铁液中由于 碳的聚集形成石墨形核质点。1 145~1 160 ℃,该阶 段发生共晶反应,初生石墨进一步长大为片状石墨。

图 3 为 HT300 不同淬火温度 XRT 的石墨显微 组织,XRT 真实反映石墨在凝固过程中的三维生长 过程。可以看出,随着淬火温度的降低,石墨由球状 石墨独立生长逐渐长大形成长片状石墨,均匀分布 在 HT300 基体。温度为 1 170 ℃,石墨以球状析出 为主,球状石墨独立生长;随着球状石墨的进一步长 大,白色箭头区域石墨(长径 93 µm)已连接生长形 成一个长片状石墨。温度降至 1 150 ℃,石墨形貌以 长片状为主,出现少量的球状石墨,石墨的数量及尺 寸均明显的增加,最大石墨长径为 179 µm。随着温 度降至 1 143 ℃,球状石墨和长片状石墨的生长空 间受到限制,最大石墨长径为 266 µm,石墨彼此之 间相互连接形成片状石墨。

图 4 为凝固过程中淬火温度为 1 143 ℃石墨微 区的 XRT 照片。此温度下组织中的石墨既有片状 的,又有球状的。选取框内石墨进行三维形貌分析, 可以看到,空间中存在 3 个圆球状的石墨,且石墨球 相互连接在形成一个石墨。石墨在初始析出时是相 互独立存在,灰铸铁石墨长大过程中,由于石墨上不 同位置处石墨以 a 向生长的速度不同,各个独立形 核的石墨球中快速向外生长的片状石墨会先相遇, 由于同为石墨相,在满足一定的共格条件时,两个片 状石墨会生长为一个,将两个石墨球连接在一起。

图 5 为 QT600 凝固过程中不同温度淬火的显 微组织。可以看出,QT600 中的石墨从刚开始形核 析出至最终凝固,石墨呈球状且石墨尺寸逐渐增加。 当温度在 1 270 ℃以上时,仅有少量球状石墨,球状 石墨直径约为 3 μm。温度介于 1 180~1 200 ℃时,球 状石墨数量明显增加,球状石墨直径约为 5~10 μm。 共晶反应阶段中,石墨球尺寸显著增加,球状石墨直 径约为 10~25 μm。

图 6 为 RT450 凝固过程中淬火的显微组织。可 以看出, RT450 凝固过程中石墨形貌由球状转变为





图 4 HT300 凝固过程中 1 143 ℃石墨微区的 XRT 照片 Fig.4 XRT images of the 1 143 ℃ graphite microzone during solidification of HT300

(b)微区

(c)立体

(a)选区



状形核析出,优先析出的石墨会以球状长大。当凝 固进行到一定程度的时候,铁液冷却至1150℃左 右时,石墨的形貌会发生变化,由球状逐渐变为蠕虫 状。此后共晶反应阶段,蠕虫状石墨大量增加,至共晶 反应结束时,组织中的石墨基本都转变为蠕虫状,共 晶反应是蠕虫状石墨的主要变化及生长阶段。

图 7 为蠕墨铸铁在 1 210 ℃淬火试样石墨的扫 描显微组织。可以看出,石墨内部和外部元素差异 较大,石墨内部C元素含量较很高,石墨周边出现

O、S、Si、Mg等元素富集。结合 EDS 分析,石墨核心 位置其它元素含量较少,碳元素的原子百分比为 91.72%; 石墨靠外部分的碳原子百分比降低为 77.95%,S元素原子百分比较石墨内部增加 4.74%, Mg元素原子百分比较石墨内部增加 5.09%。结合石 墨线扫分析结果,O元素和 Si 元素的含量均为两端 高,内部低,且峰值相差较大;S元素和 Mg元素曲 线两端能比中间高,石墨周围出现合金元素富集。



(a)石墨

(b)线扫描成分分析位置与结果 图 7 淬火温度为 1210 ℃试样的石墨扫描照片与能谱分析结果 Fig.7 Graphite scanning photos and energy spectrum analysis of the sample quenched at 1 210 °C

## 3 结论

(1)铸铁合金凝固过程中冷却曲线分为温度 快速降低、趋于平稳和再快速降低3个阶段,共晶反 应阶段存在明显差异。共晶反应阶段的再辉现象可 以判断不同类型铸铁的凝固过程, 共晶反应阶段蠕 墨铸铁释放的热量较多,球墨铸铁次之,灰铁的释放 的热量最少。

(2)铸铁合金石墨初始形貌均为球状,且石墨球 独立生长,在共晶反应阶段发生变异形成片状、球状 和蠕虫状石墨。

(3)石墨内部和外部元素差异较大,石墨内部碳 元素含量较很高,周边出现合金元素富集现象。石墨 核心碳元素的原子百分比为 91.72%;石墨靠外部分 的碳原子百分比降低为 77.95%.S 元素原子百分比 较石墨内部增加 4.74%, Mg 元素原子百分比较石墨 内部增加 5.09%。

## 参考文献:

- [1] LIU J C. A reliable and consistent production technology for high volume compacted graphite iron castings [J]. China Foundry, 2014, 11(4): 339-350.
- [2] 刘金城. 蠕墨铸铁件在发动机领域应用持续增长[J]. 铸造, 2016 (3): 304-306.
- [3] 李涛,沙羽,赵勇,等.基于正交试验法研究开发的缸盖用灰铸 铁材料[J]. 铸造, 2020, 69(8): 828-833.
- [4] TANG K G, LI D. Application of 3D printing technology to the diesel engine vermicular cast iron cylinder head [J]. Foundry,

2015, 64(12): 1264-1266.

- [5] 杜文科. 高牌号、轻量化复杂气缸体 / 气缸盖铸件开发 //2020 中 国铸造活动周论文集[C]. 合肥, 2020.
- [6] 李晶晶,张国伟,张佳琪,等. 壁厚对蠕墨铸铁组织性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2016(23): 91-92.
- [7] GLAVAS Z, STRKALJ A, MALDINI K. Effects of Antimony and Wall Thickness on Graphite Morphology in Ductile Iron Castings [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47 (4): 2487-2497
- [8] RIPOSAN I, CHISAMERA M, STAN S. Control of Surface Graphite Degeneration in Ductile Iron for Windmill Applications [J]. International Journal of Metal Casting, 2013, 7(1): 9-20.
- [9] STAN S, CHISAMERA M, RIPOSAN I, et al. Technique Incorporating Cooling & Contraction / Expansion Analysis to Illustrate Shrinkage Tendency in Cast Irons [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 209(1): 12-17.
- [10] EDUARDO C Ga, CRUZ A, Castellanos G R, et al. Microstructural and Mechanical Assessment of Camshafts Produced by Ductile Cast Iron Low Alloyed with Vanadium [J]. Metals - Open Access Metallurgy Journal, 2021, 11(146): 1-18.
- [11] 吴德海, 王怀林, 张伯明. 铸铁的合金化及合金铸铁的分类[J]. 铸造工程, 2020, 44(3): 10-12.
- [12] 段洪波,朱永国,马志军,等.石墨连通性对蠕墨铸铁导热性能 影响的数值模拟[J]. 西安工业大学学报, 2019, 39(2): 81-86.
- [13] YIN Y, TU Z, ZHOU J. 3D Quantitative Analysis of Graphite Morphology in Ductile Cast Iron by X-ray Microtomography [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48(8): 3794-3803.
- [14] LACAZE J. Trace Elements and Graphite Shape Degeneracy in Nodular Graphite Cast Irons [J]. International Journal of Metalcasting, 2017, 11(1): 44-51.
- [15] 李远,杨忠,朱永国,等.静置时间对蠕墨铸铁凝固参数与石墨 衰退的影响[J]. 铸造, 2018, 67(12): 49-52.