

# 基于正交试验法研究开发的缸盖用灰铸铁材料

李涛<sup>1</sup>, 沙羽<sup>1</sup>, 赵勇<sup>1</sup>, 李金辉<sup>1</sup>, 郭毅<sup>1</sup>, 于珍<sup>2</sup>

(1. 中国重汽济南动力有限公司铸锻中心, 山东济南 250200; 2. 山东大学机械工程学院, 山东济南 250061)

**摘要:** 运用正交试验设计方案, 通过四因素三水平的试验数据, 进行极差分析和合金元素对性能的排序分析, 开发出新型缸盖用灰铸铁材料。结果表明: 在不同合金成分的CuCrMoSn灰铸铁中, 片状石墨形态各异(以A型石墨为主, 局部出现少量的D、E型石墨), 分布比较均匀。CuCrMoSn合金元素可明显强化基体的组织, 改善基体中珠光体的含量, 增加基体组织中小尺寸的片状石墨的数量, 加大石墨的弯曲程度。综合考虑硬度、抗拉强度、伸长率, 用于新型缸盖的高强度灰铸铁的最优合金化元素的组合为: 0.4%~0.8%Cu、0.2%~0.4% Cr、0.4%~0.6% Mo、0~0.06% Sn。

**关键词:** 灰铸铁; 缸盖; 正交试验; 最优配比; 极差分析

铸铁材料作为工程材料在国防和民用工业中有着不可替代的作用, 其在金属材料的应用中居于重要地位<sup>[1-3]</sup>。随着柴油发动机功率的不断提升, 对其关键部位的材料组织和性能提出更高要求。在提高发动机功率的过程中, 发动机缸体基体材料会出现与功率的提升不匹配的情况, 进而引发缸体发生热裂等现象<sup>[4-5]</sup>。因此, 采用传统均质铸铁材料制造的柴油发动机缸盖存在较大挑战, 制备优质的基体材料, 保证缸盖的安全使用性是一个亟需解决的难题。

## 1 成分控制和设计正交试验

为了提高灰铸铁的综合性能, 需要充分考虑合金元素以及各元素之间对铸铁的影响规律。Mo和Cu在铸铁中主要起到固溶强化的作用, 增加铸铁的强度和硬度, 具有一定的高温稳定效果。Cr元素在铸铁中促使珠光体形成, 细化石墨。Cr元素在凝固过程中大部分偏析于液相, 容易产生晶间碳化物, 导致韧性降低。Sn可以稳定并细化珠光体, Sn含量约为0.06%, 珠光体含量超过90%, Sn含量超过0.12%, 铸铁的组织中会析出游离渗碳体<sup>[6-11]</sup>。综合研究后, 确定主要合金元素的试验范围:  $w(\text{Mo})=0.2\% \sim 0.6\%$ 、 $w(\text{Cu})=0.4\% \sim 0.8\%$ 、 $w(\text{Cr})=0 \sim 0.4\%$ 、 $w(\text{Sn})=0 \sim 0.09\%$ 。正交试验因素水平表见表1。

## 2 试验材料及方法

采用正交试验(四因素三水平)方法, 选取正交表L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>), 运用电脑随机组合形式, 设计了MoCuCrSn高强度合金灰铸铁, 成分设计见表2。熔炼在GGW-0.012中频感应炉内进行。采用红外测温仪测温, 铁液在1 480~1 500 °C静止3~5 min, 1 450~1 460 °C用75SiFe孕育剂(加入量0.4%)包底冲入法处理, 1 380~1 400 °C浇注试棒(见图1)。用HB-3000型布氏硬度计(取6个点)测量试验合金的硬度。用Nicon300型金相显微镜观察合金的铸态组织(腐蚀液为4%硝酸酒精)。按GB/T7216—2009《灰铸铁金相检验》和GB/T 9439—2010《灰铸铁件》评定试验合金的石墨等级、组织分布和力学性能。

作者简介:

李涛(1981-), 男, 硕士, 主要研究方向为熔炼、材料性能及数值模拟。E-mail: 15910109915@126.com

中图分类号: TG251

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)08-0828-06

收稿日期:

2020-03-30 收到初稿,  
2020-04-29 收到修订稿。

### 3 结果与分析

#### 3.1 金相组织

图2为不同合金成分的CuCrMoSn灰铸铁铸态凝固组织形貌(未腐蚀)。表3为对应组织石墨特征等级。可以看出,随着CuCrMoSn成分的变化,片状石墨形态各异,分布比较均匀。石墨主要以A型石墨为主,局部出现少量的D、E型石墨,石墨等级为3~4级,平均尺寸20~23 μm。Mo0.2Cu0.4和Mo0.2Cu0.6Cr0.2Sn0.06合金的石墨平均尺寸超过24 μm, Mo0.4Cu0.6Cr0.4石墨平均尺寸低于19 μm。CuCrMoSn成分体系下,均出现较为弯曲且尺寸介于5~10 μm的片状石墨,石墨生长受到限制。主要原因是CuCrMoSn在凝固过程中在微区产生溶质元素富集造成较大的成分过冷,改变石墨生长方向和生长能力。

表1 正交试验因素水平表

Table 1 Horizontal table of orthogonal test factors

水平/因素	Mo	Cu	Cr	Sn
1	A <sub>1</sub> (0.2)	B <sub>1</sub> (0.4)	C <sub>1</sub> (0)	D <sub>1</sub> (0)
2	A <sub>2</sub> (0.4)	B <sub>2</sub> (0.6)	C <sub>2</sub> (0.2)	D <sub>2</sub> (0.06)
3	A <sub>3</sub> (0.6)	B <sub>3</sub> (0.8)	C <sub>3</sub> (0.4)	D <sub>3</sub> (0.09)

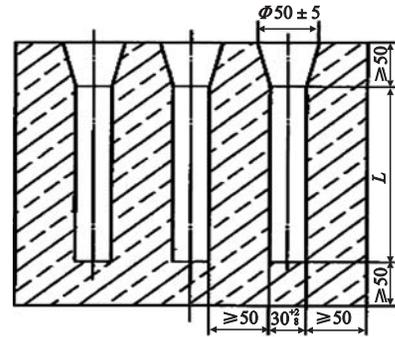


图1 试棒砂型图

Fig. 1 Sand mold of test bar

表2 高强度灰铸铁正交试验化学成分

Table 2 Chemical composition of high strength gray iron for orthogonal test

试验号	Mo	Cu	Cr	Sn	w <sub>B</sub> /%
1	0.2	0.4	0	0	0
2	0.2	0.6	0.2	0.06	0.06
3	0.2	0.8	0.4	0.09	0.09
4	0.4	0.4	0.2	0.09	0.09
5	0.4	0.6	0.4	0	0
6	0.4	0.8	0	0.06	0.06
7	0.6	0.4	0.4	0.06	0.06
8	0.6	0.6	0	0.09	0.09
9	0.6	0.8	0.2	0	0

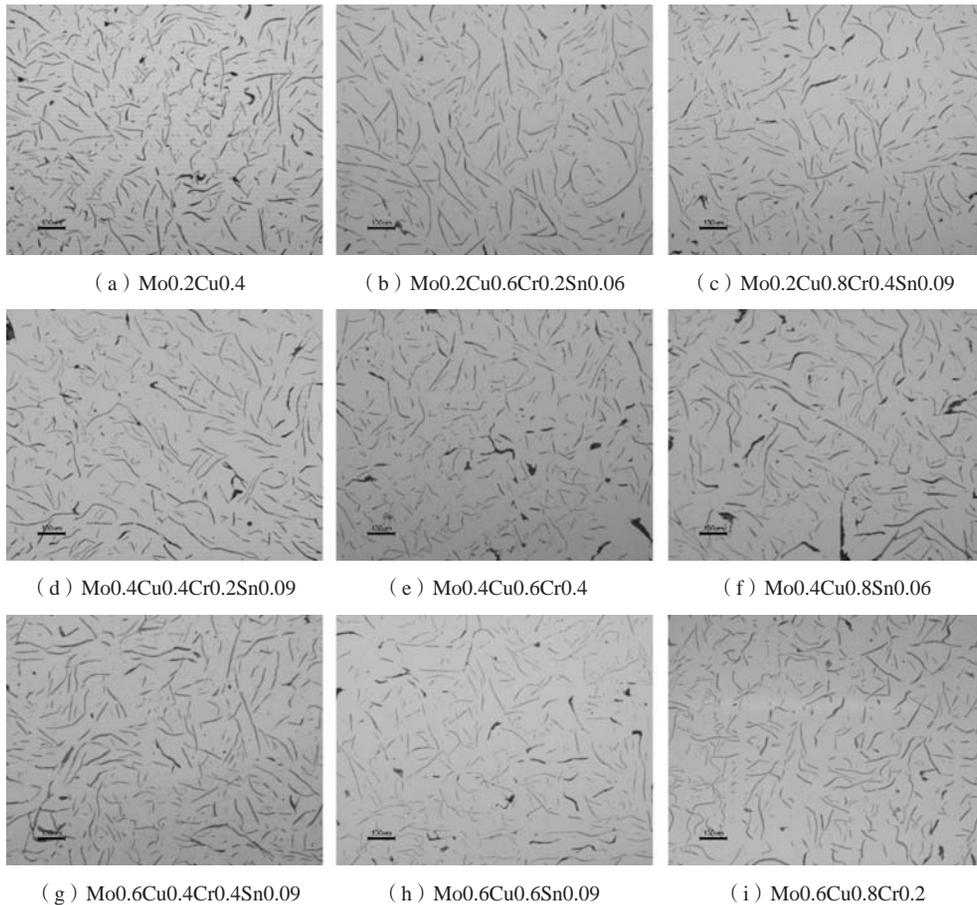


图2 不同合金成分CuCrMoSn灰铸铁铸态显微组织(未腐蚀: 100×)

Fig. 2 Metallographs of CuCrMoSn-alloyed gray cast irons (without corrosion)

图3为不同合金成分的CuCrMoSn灰铸铁铸态凝固组织(腐蚀)。可以看出,随着CuCrMoSn成分的变化,基体主要为珠光体和铁素体,珠光体量均大于90%。从中可以进一步看出,片状石墨以铁素体晶界处和晶粒内部两种形式存在,且同一石墨弯曲程度、粗细程度不同,绝大部分石墨的端部尖凸。

### 3.2 正交试验结果与分析

根据各项性能指标在不同水平平均值的最大值和最小值之差,检验各个指标与水平对应的关系,确定各因素的优化水平组合。极差越大,则表示该因素在试验范围内的数值变化对试验指标数值的变化影响越大<sup>[12-13]</sup>。因而,根据硬度、抗拉强度、伸长率3项性能指标,可分析该项指标影响程度的先后排序。表4为不同合金成分的CuCrMoSn灰铸铁力学性能试验结果。

表5为不同合金成分的CuCrMoSn灰铸铁硬度分析表,图4为因子水平的变化对合金硬度的影响。可以看

出,硬度指标中Cr影响因素最大,其次是Cu元素,不加入Sn元素灰铸铁的硬度性能最优,Mo的加入影响最小,最佳硬度的配比为Cr0.2Cu0.8Mo0.6,该成分为试

表3 不同合金成分CuCrMoSn石墨等级  
Table 3 Graphite grades of gray cast irons with different CuCrMoSn alloy compositions

试验号	石墨长度平均值/ $\mu\text{m}$	石墨等级
1	24.00	4
2	25.30	3
3	20.27	4
4	21.27	4
5	18.87	4
6	20.40	4
7	23.60	4
8	20.70	4
9	21.20	4

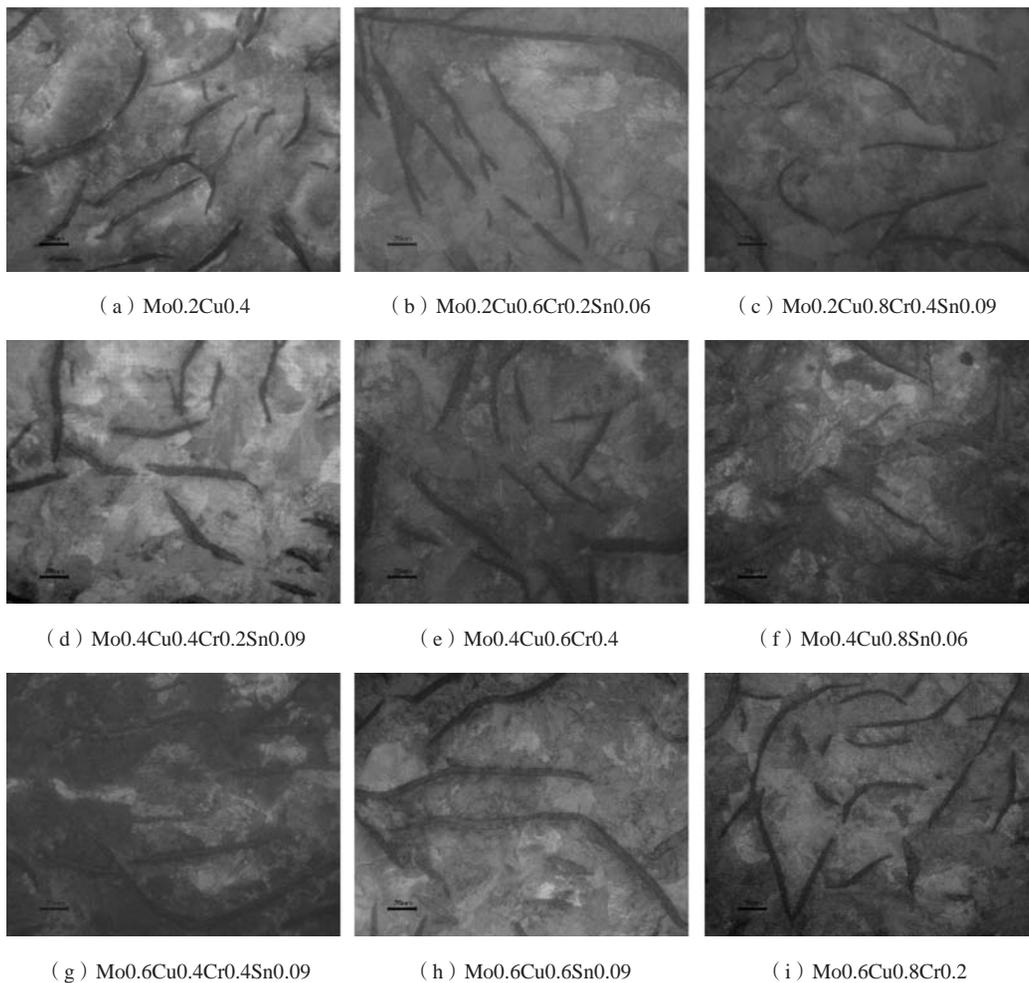


图3 不同合金成分CuCrMoSn铸态凝固组织(腐蚀; 100 $\times$ )

Fig. 3 Metallographs of CuCrMoSn-alloyed gray cast irons (corrosion)

验9的合金配比。结合金相组织可以看出，石墨为A型石墨且尺寸均一，珠光体含量超过96%，属于全珠光体基体，且珠光体层片间距较小，具有最佳的硬度指标。硬度的优化水平组合为Cr(0.2) > Cu(0.8) > Sn(0) > Mo(0.6)，最佳配比为Cr0.2Cu0.8Mo0.6。

表6为不同合金成分的CuCrMoSn灰铸铁抗拉强度分析表，图5为因子水平的变化对抗拉强度的影响。可以看出，抗拉强度指标里Cr影响因素最大，其次是Mo和Cu，它们的影响介于Cr、Sn元素之间，Sn元素影响最小，抗拉强度的最佳配比为Cr0.4Mo0.4Cu0.8Sn0.06。结合图5可以明显看出，随着Cr、Mo元素增加，抗拉强度先增加后降低；随着Cu元素增加，抗拉强度先降低后增加，随着Sn元素增加，抗拉强度呈上升趋势。Cr、Sn属于强过冷元素，容易造成铁液过冷产生碳化物。因此综合考虑试验结果和实际生产情况，抗拉强度的最佳成分应为Cr0.4Mo0.4Cu0.8Sn0.06。

表7为不同合金成分的CuCrMoSn灰铸铁伸长率分析表，图6为因子水平的变化对伸长率的影响。可以看出，Mo元素伸长率极差最大，说明Mo的影响最大，Cu的伸长率影响最小。结合试验数据分析，Cr、Sn元

表4 不同合金成分的CuCrMoSn灰铸铁力学性能试验结果  
Table 4 The testing results of mechanical properties of CuCrMoSn-alloyed gray cast irons

试验号	Mo	Cu	Cr	Sn	硬度HBW	$R_m$ /MPa	$A_5$ /%
1	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	193.4	247	50.66
2	A <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	223.3	260	50.50
3	A <sub>1</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	226.8	278	50.58
4	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	222.6	270	50.74
5	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	213.3	283	50.77
6	A <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	205.9	278	50.68
7	A <sub>3</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	207.1	270	50.65
8	A <sub>3</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>3</sub>	197.2	238	50.69
9	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	255.0	268	50.68

表5 不同合金成分的CuCrMoSn灰铸铁硬度极差分析表  
Table 5 Hardness range analysis of CuCrMoSn-alloyed gray cast iron

水平综合	因素			
	Mo	Cu	Cr	Sn
均值				
$k_1$	214.57	207.74	198.87	220.61
$k_2$	213.97	211.32	233.68	212.14
$k_3$	219.79	229.28	215.79	215.58
极差R	5.82	21.54	34.81	8.47
R排序	4	2	1	3
优化组合	0.6%	0.8%	0.2%	0

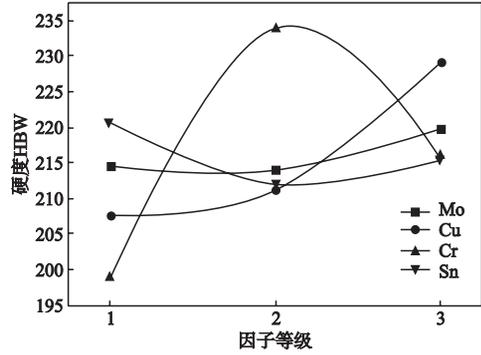


图4 因子水平的变化对合金灰铁硬度的影响  
Fig. 4 Effect of factor level change on hardness

表6 不同合金成分的CuCrMoSn灰铸铁抗拉强度极差分析表  
Table 6 Tensile strength range analysis of CuCrMoSn-alloyed gray cast iron

水平综合	因素			
	Mo	Cu	Cr	Sn
均值				
$k_1$	261.93	262.5	254.7	266.37
$k_2$	277.2	260.53	266.1	269.43
$k_3$	258.87	274.97	277.2	262.2
极差R	18.33	14.44	22.5	7.23
R排序	2	3	1	4
优化组合	0.4%	0.8%	0.4%	0.06%

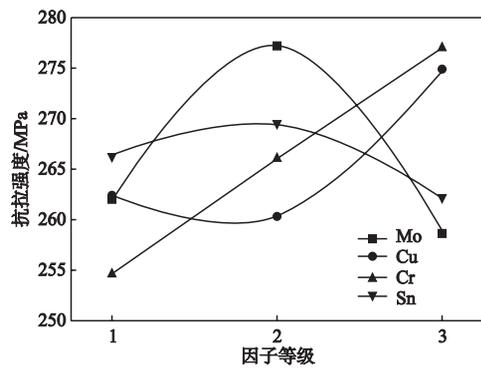


图5 因子水平的变化对抗拉强度的影响  
Fig. 5 Effect of factor level change on tensile strength

表7 不同合金成分的CuCrMoSn灰铸铁伸长率极差分析表  
Table 7 Elongation range analysis of CuCrMoSn-alloyed gray cast iron

水平综合	因素			
	Mo	Cu	Cr	Sn
均值				
$k_1$	50.58	50.68	50.68	50.7
$k_2$	50.7	50.65	50.64	50.61
$k_3$	50.67	50.65	50.67	50.67
极差R	0.12	0.03	0.04	0.09
R排序	1	4	3	2
优化组合	0.4%	0.4%	0	0

素对伸长率仍有较大影响, 最优化方案中含量均为0。  
伸长率最优配比为Mo0.4Cu0.4。

表8为不同合金成分的CuCrMoSn灰铸铁正交试验分析结果。可以看出: 硬度的优化水平组合排序为Cr (0.2) > Cu (0.8) > Sn (0) > Mo (0.6), 抗拉强度的优化水平组合排序为Cr (0.4) > Mo (0.4) > Cu (0.8) > Sn (0.06), 伸长率的优化水平组合排序为Mo (0.4) > Sn (0) > Cr (0) > Cu (0.4)。Cr元素对灰铸铁的硬度和抗拉强度的影响最大, Mo元素可以显著增加灰铸铁的伸长率。综合考虑硬度、抗拉强度、伸长率力学性能, 灰铸铁的最优化组合为: 0.2% ~ 0.4% Cr、0.4% ~ 0.8% Cu、0.4% ~ 0.6% Mo、0 ~ 0.06% Sn。

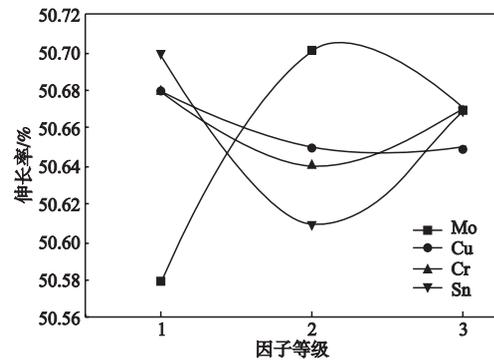


图6 因子水平的变化对抗拉强度的影响

Fig. 6 Effect of factor level change on tensile elongation

表8 不同合金成分的CuCrMoSn灰铸铁正交试验分析结果

Table 8 Orthogonal experimental analysis results of CuCrMoSn-alloyed gray cast iron

试验因素	主次顺序	优化水平组合
硬度	Cr > Cu > Sn > Mo	Cr (0.2) > Cu (0.8) > Sn (0) > Mo (0.6)
抗拉强度	Cr > Mo > Cu > Sn	Cr (0.4) > Mo (0.4) > Cu (0.8) > Sn (0.06)
伸长率	Mo > Sn > Cr > Cu	Mo (0.4) > Sn (0) > Cr (0) > Cu (0.4)

## 4 结论

(1) 在CuCrMoSn合金灰铸铁中, 片状石墨形态各异, 分布比较均匀(以A型石墨为主, 局部出现少量的D、E型石墨), 出现较为弯曲且尺寸5 ~ 10 μm的片状石墨, 石墨生长受到限制。CuCrMoSn合金化可明显强化基体的组织, 改善基体中珠光体的含量, 增加基体组织中小尺寸的片状石墨的数量, 加大石墨的弯曲程度。

(2) 通过极差分析法, 可以确定各个性能的最优配比: 硬度的最优配比为Cr0.2Cu0.8Mo0.6, 抗拉强度的最优配比为Cr0.4Mo0.4Cu0.8Sn0.06, 伸长率的最优配比为Mo0.4Cu0.4。综合考虑灰铸铁的硬度、抗拉强度、伸长率, 合金成分的优化组合为: 0.2% ~ 0.4% Cr、0.4%~0.8% Cu、0.4%~0.6% Mo、0 ~ 0.06% Sn。

### 参考文献:

- [1] CHOU J M, MIN H H, LEE J L. Effects of graphite morphology and matrix structure on mechanical properties of cast iron [J]. Journal of Materials Science, 1990, 25: 1965-1972.
- [2] STEVE D, INDRA F. Compacted graphite iron-a new material for highly stressed cylinder blocks and cylinder heads [J]. Internationales Wiener Motoren symposium, 2007, 28: 225-232.
- [3] 刘洋, 杨弋涛, 越凌, 等. 基于多重分形理论的球铁石墨颗粒分散均匀性的分析 [C]//第八届21省市铸造学术会议论文, 1994: 55-58.
- [4] 张延京. 缸盖用复合铸铁的制备工艺与组织性能研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2016.
- [5] 白亚平, 李建平, 田佳, 等. 某型铸铁缸盖组织和性能分析 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (10): 2132-2135.
- [6] 李辉, 陶春国. Cu元素对球墨铸铁力学性能和微观组织的影响 [C]//第十五届中国铸造协会年会论文集. 北京: 中国铸造协会, 2019: 240-247.

- [7] 李改玲, 吕家禹, 曹玉亭. Cr、Sn对灰铸铁组织和性能的影响及应用 [J]. 现代铸铁, 2019, 39 (3): 22-25.
- [8] 王敏毅, 黄颖, 林有希. 微量Sn对灰铸铁组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2012, 61 (1): 17-24.
- [9] 罗玉梅, 李慧亮. 合金元素Cu对灰铸铁组织性能影响的研究 [J]. 福建质量管理, 2015 (12): 254.
- [10] 李国钧. Cu-Cr合金化灰铸铁和含氮灰铸铁的对比分析 [J]. 铸造技术, 2015, 36 (11): 2626-2628.
- [11] 王永吉, 乔进国, 王安家, 等.  $w(\text{Cu})$ 对灰铸铁气缸体组织和性能的影响 [J]. 现代铸铁, 2015, 35 (3): 38-41.
- [12] 邵谦. 复合材料注塑成型工艺参数优化及宏观模拟与试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [13] 赵小强, 汪志伟, 许庆. 基于多指标正交实验设计的加热工艺参数优化 [J]. 中国新技术新产品, 2018 (20): 9-10.

---

## Study and Development of Gray Cast Iron Material for Cylinder Head Based on Orthogonal Test

LI Tao<sup>1</sup>, SHA Yu<sup>1</sup>, ZHAO Yong<sup>1</sup>, LI Jin-hui<sup>1</sup>, GUO Yi<sup>1</sup>, YU Zhen<sup>2</sup>

(1. Casting and Forging Center of Sinotruk Jinan Power Co., Ltd., Jinan 250200, Shandong, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

### Abstract:

This study developed a new type of gray cast iron material for cylinder head by using the orthogonal test method with four factors and three levels, range analysis and the data analysis of the mechanical properties. The results show that the flake graphite in gray cast irons with different CuCrMoSn alloy compositions has different shapes (mainly A-type graphite, a small amount of D-type and E-type graphite locally), and the distribution is relatively uniform. Cu, Cr, Mo and Sn alloy elements can obviously strengthen the structure of the matrix, improve the pearlite content in the matrix, increase the amount of small and medium-sized flake graphite, and increase the degree of graphite bending. Considering the mechanical properties of hardness, tensile strength and elongation, the optimal chemical composition of the CuCrMoSn-alloyed gray cast iron is Cu: 0.4%-0.8%, Cr: 0.2%-0.4%, Mo: 0.4%-0.6% and Sn: 0-0.06%.

### Key words:

gray cast iron; cylinder head; orthogonal test; optimal ratio; range analysis

---