

发动机缸盖用蠕墨铸铁高温性能研究

伍启华¹, 李娜娜¹, 王 健², 李玉娟¹, 姜爱龙¹, 彭广涛¹, 冀露露¹

(1. 潍柴动力股份有限公司, 山东潍坊 261061; 2. 潍柴(潍坊)材料成型制造中心有限公司, 山东潍坊 261061)

摘要: 以蠕化率80%以上的发动机缸盖用蠕墨铸铁材料为研究对象, 研究了RuT400和RuT450在室温至600℃时的拉伸性能和室温至450℃时的物理性能变化规律, 并与HT280进行了对比。结果表明: 蠕墨铸铁抗拉强度随温度升高缓慢下降, 400~450℃后强度快速下降; 灰铸铁抗拉强度随温度升高基本不变, 但400℃以后强度下降明显; 随温度升高, 蠕墨铸铁和灰铸铁断后伸长率变化不大, 但在350℃左右断后伸长率突然降低, 之后快速增加, 500℃达到最大值后急剧下降; 室温到450℃时, 蠕墨铸铁导热系数基本不变, 但在300℃左右最高; 灰铸铁导热系数直线下降; 蠕墨铸铁热膨胀系数和比热容及变化趋势与灰铸铁基本一致, 随温度升高而增加。

关键词: 缸盖; 蠕墨铸铁; 高温拉伸性能; 物理性能; 灰铸铁

作者简介:

伍启华(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事内燃机及液压关键零部件制造技术研究工作。E-mail:

wuqh@weichai.com

通信作者:

李娜娜, 女, 高级工程师。电话: 15376365498, E-mail:

linn@weichai.com

中图分类号: TG25

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

01-0033-05

基金项目:

山东省自然科学基金项目(ZR2021ZD22)。

收稿日期:

2023-12-18 收到初稿,

2024-01-16 收到修订稿。

当前中国制造正在转型升级迈向高端, 同时新一轮的排放升级工作也已经全面开始, 发动机排放、爆发压力及轻量化要求不断提高, 新一代发动机各项技术指标大幅提升, 产品更新换代加快。蠕墨铸铁兼有灰铸铁和球墨铸铁的优良性能, 其抗拉强度高于灰铸铁而低于球墨铸铁, 热传导性能又接近于一般灰铸铁, 适用于高温下以及有较大的温度梯度下工作的零件, 将取代传统的灰铸铁材料, 成为未来大功率高端发动机关键零部件缸体缸盖批量应用的首选材料^[1-3]。

大功率发动机缸盖结构复杂, 服役条件恶劣, 随着强化程度的提高, 其承受的机械负荷和热负荷不断增加, 要求材料具有良好的高温力学性能和物理性能。世界上大多数采用蠕墨铸铁缸盖的发动机都是根据蠕墨铸铁的性能专门设计的^[4-5]。掌握材料的真实数据, 能够帮助设计人员在设计蠕墨铸铁缸盖时有针对性地对比借鉴灰铸铁缸盖的设计经验, 并不断研究总结出蠕墨铸铁缸盖设计标准。因此, 研究蠕墨铸铁力学性能和物理性能随温度变化规律对发动机缸盖产品设计选材、仿真计算和生产验证具有重要的指导意义^[6]。

目前, 针对发动机缸体、缸盖、制动鼓以及排气管用蠕墨铸铁高温性能和物理性能已有部分研究, 但大多基于试验条件下开展的不同元素的影响研究以及热疲劳性能研究^[7-10], 同时试样蠕化率分布范围较宽。针对蠕化率80%以上的蠕墨铸铁性能研究, 林勇传等^[11]通过试验得出, 当蠕化率大于80%的情况下, 蠕化率的变化并不能显著影响蠕墨铸铁抗拉强度和硬度等力学性能, 降低石墨长宽比可以有效提升蠕墨铸铁抗拉强度和硬度, 珠光体体积分数对蠕墨铸铁抗拉强度和硬度等力学性能的影响最显著, 珠光体体积分数越高, 抗拉强度和硬度等力学性能越好。杨忠等^[12]采用正交试验研究Cr、Mo、Cu三元复合作用对蠕墨铸铁的蠕化率以及力学性能的影响, 结果表明: 复合合金化蠕墨铸铁的抗拉强度和伸长率受Mo含量的影响最大、Cr次之。随着Mo含量和Cr含量提高, 抗拉强度越高, 伸长率越差。李基华等^[13]以钒钛生铁为原材料经蠕化处理得到钒钛蠕墨铸铁, 其试验结果表明钒钛蠕墨铸铁金相组织中蠕化率和基体中的珠光体含量均较高, 具有优良的常温力学性能。

本课题主要针对蠕化率80%以上的发动机缸盖用蠕墨铸铁材料开展高温力学性能和物理性能随温度变化规律的研究, 并与灰铸铁进行简单对比。

1 试验方案及方法

1.1 试验方案

为增强试验数据的可应用性,选取稳定工艺状态下生产的RuT400和RuT450蠕墨铸铁单体缸盖和联体缸盖火力面作为试样来源,见图1。测量室温到600℃下蠕墨铸铁试样的抗拉强度和断后伸长率,总结分析其变化趋势,并与灰铸铁进行对比。具体试验温度及样本数量见表1。目前发动机铸铁缸盖设计最高限值温度一般为380℃,超过限值温度,需进行相应的设计修

改,因此试验着重关注350℃、400℃和450℃下材料的力学性能。

缸盖材料的比热容、导热系数和热膨胀系数是发动机缸盖设计的重要技术参数。方案设计时,选择与拉伸试验同批次的RuT400和HT280进行室温到450℃下导热系数、热膨胀系数和比热容的变化趋势研究,具体试验方案见表2。由于蠕墨铸铁的导热系数随蠕化率的增加而增加,因此选择蠕化率接近80%的RuT450试样进行检测,以获取符合标准的材料的物理性能最小值。

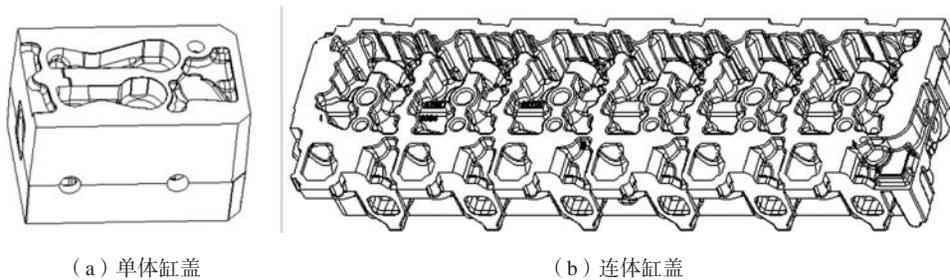


图1 发动机单体缸盖和连体缸盖
Fig. 1 Single cylinder head and one-piece cylinder head of Engine

表1 蠕墨铸铁和灰铸铁拉伸试验方案
Tab. 1 Tensile test schemes of vermicular cast irons and gray irons

缸盖	牌号	试验温度下的样本量/件							
		20℃	200℃	300℃	350℃	400℃	450℃	500℃	600℃
单体缸盖	RuT400	3	3	3	3	3	3	2	1
	RuT450	3	3	3	-	3	3	2	1
联体缸盖	RuT400	3	3	3	3	3	3	2	1
	RuT450	3	3	3	3	3	3	2	1
灰铁缸盖	HT280	3	3	3	3	3	3	2	1

表2 蠕墨铸铁和灰铸铁物理性能测试方案
Tab. 2 Physical property test schemes of vermicular cast irons and gray cast irons

物理性能	测试温度点/℃						试样数量
导热系数	20	100	200	300	400	450	6
热膨胀系数	20~100	20~200	20~300	20~400	20~450		1
比热容	20	100	200	300	400	450	6

1.2 试验方法

高温拉伸试验按照国家标准GB/T 4338—2006规定的金属材料高温拉伸试验方法进行。试验使用ZWICK-Z250型材料电子拉伸试验机,选用应力控制方法进行控制。具体试验参数参见表3。

材料物理性能测量和试样制备依据GB/T 4339—2008《金属材料热膨胀特征参数的测定》和GB/T 22588—2008《闪光法测量热扩散系数或导热系数》等相应的国家标准进行。

2 试样规格及制备

2.1 试样规格

拉伸试样和物理性能试样均取自缸盖火力面。高温拉伸试样按国家标准制备,具体规格尺寸见图2。

2.2 试样制备

稳定工艺状态下,采用热风冲天炉-电炉双联工艺生产,经Cu-Cr-Ni合金化后获得HT280材料缸盖。采

表3 蠕墨铸铁和灰铸铁试样高温拉伸试验参数
Tab. 3 High temperature tensile test parameters for vermicular cast iron and grey cast iron samples

预载应力/MPa	预载保载时间/s	试验温度参数		试验速度参数		引伸计标距/mm
		升温速度/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)	保温时间/min	$R_{p0.2}/(\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$	$R_m/(\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$	
10	60	8	10	5	5	24

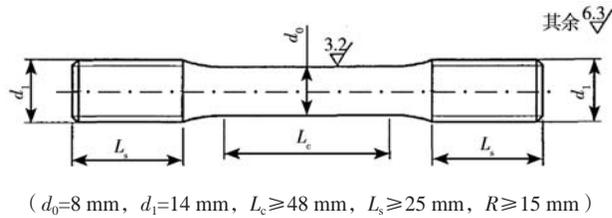


图2 拉伸试样规格

Fig. 2 Shape and size of tensile sample

用12 t中频感应电炉熔炼和蠕墨铸铁喂线工艺, Cu-Sn合金化后获得蠕化率高于80%的不同机型发动机缸盖, 包括单体缸盖和联体缸盖, 牌号分别为RuT400和RuT450, 其中蠕化率采用定量金相软件分析。金相组织和常温性能见表4。其中单体缸盖RuT450(蠕化率81%)用于进行物理性能测试。

表4 室温性能和组织
Tab. 4 Properties and microstructures at room temperature

缸盖	牌号	抗拉强度/MPa	硬度HBW	伸长率/%	蠕化率/%	基体珠光体含量/%
单体缸盖	RuT400	430	211	1.5	94	85
	RuT450	494	234	2.3	81	95
联体缸盖	RuT400	429	205	2.1	89	85
	RuT450	465	223	2.1	86	95
灰铁缸盖	HT280	261	197	0.91	A型石墨 4级	≥ 98

3 结果与讨论

3.1 抗拉强度随温度变化

图3为不同机型不同牌号的蠕墨铸铁与灰铸铁材料高温抗拉强度检测结果分布。温度20~600 $^{\circ}\text{C}$ 下, 蠕墨铸铁抗拉强度整体高于同温度下灰铸铁的抗拉强度, 这是由于蠕墨铸铁石墨短而粗, 端部圆钝, 对铸铁基体的割裂作用显著降低。温度在20~400 $^{\circ}\text{C}$ 时, 灰铸铁

抗拉强度随着温度升高变化不大, 400 $^{\circ}\text{C}$ 以后强度开始明显下降。

温度在20~450 $^{\circ}\text{C}$, 随温度升高, 蠕墨铸铁抗拉强度呈缓慢下降趋势, 约450 $^{\circ}\text{C}$ 以后强度急剧下降。600 $^{\circ}\text{C}$ 时, 不同牌号的蠕墨铸铁抗拉强度基本一致, 约200 MPa。其中蠕化率达到90%以上时, 其抗拉强度下降拐点会提前到400 $^{\circ}\text{C}$, 说明蠕化率对高温强度变化趋势有一定的影响。

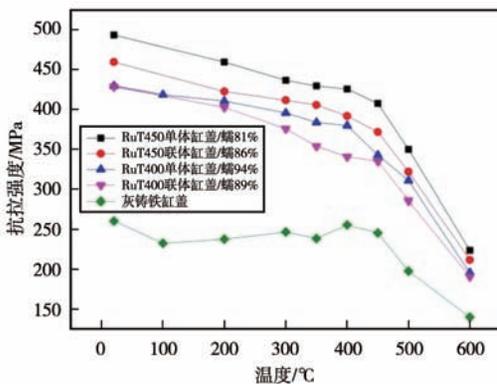


图3 蠕墨铸铁与灰铸铁抗拉强度随温度变化

Fig. 3 The tensile strength changes of vermicular cast irons and grey cast irons with temperature

3.2 断后伸长率随温度变化

延性是决定高温低循环疲劳寿命的主要因素。图4为蠕墨铸铁与灰铸铁断后伸长率随温度变化趋势。为精确分析数据, 所有试验伸长率数据没有修正到0.5%。20~300 $^{\circ}\text{C}$ 时, 随温度的升高, 抗拉强度降低, 蠕墨铸铁和灰铸铁伸长率均变化不大, 但在300~400 $^{\circ}\text{C}$ 时, 两种材料伸长率均出现一个比较明显的最低点, 一般在350 $^{\circ}\text{C}$ 。然后, 随着温度的继续升高, 伸长率大幅增加, 约在500 $^{\circ}\text{C}$ 时伸长率达到最大, 之后蠕墨铸铁的伸长率开始急剧下降, 说明约350~400 $^{\circ}\text{C}$ 时, 铸铁材料的组织开始发生明显的转变, 导致断后伸长率提高。

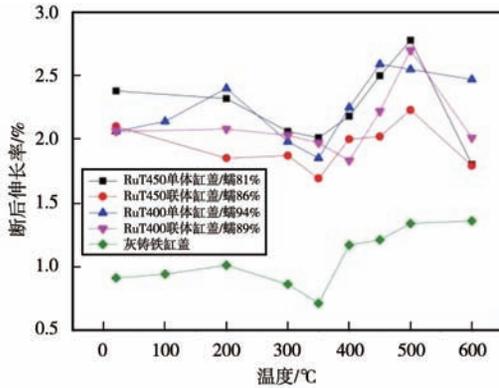


图4 蠕墨铸铁与灰铸铁断后伸长率随温度变化

Fig. 4 The elongation changes of vermicular cast irons and grey cast irons with temperature

3.3 导热系数随温度变化

图5为RuT450（蠕化率81%）和HT280两种材料的导热系数随温度变化趋势。室温至450℃时，HT280的导热系数高于RuT450的导热系数。随着温度的升高，HT280导热系数基本上呈线性下降趋势，下降幅度较大，与RuT450的差距减小。随着温度的升高，虽然蠕墨铸铁的导热系数先增加后降低，并且在300℃时有一个最大值，但是导热系数整体变化不大，稳定性较强。

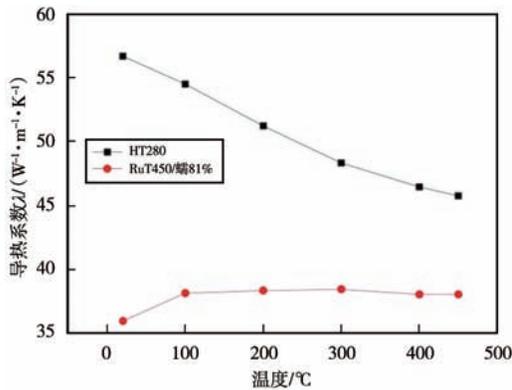


图5 蠕墨铸铁和灰铸铁导热系数随温度变化

Fig. 5 The thermal conductivity changes of vermicular cast iron and grey cast iron with temperature

3.4 热膨胀系数随温度变化

图6为RuT450和HT280两种材料的热膨胀系数随温度变化趋势。RuT450和HT280的热膨胀系数及其随温度变化趋势基本一致，均随温度升高而不断升高，300℃以后，RuT450的热膨胀系数略高于HT280。

3.5 比热容随温度变化

图7为RuT450和HT280两种材料的比热容随温度变化趋势。RuT450和HT280比热容及比热容随温度变化

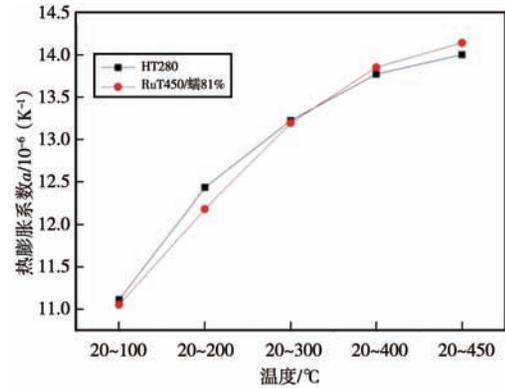


图6 蠕墨铸铁和灰铸铁热膨胀系数随温度变化

Fig. 6 The thermal expansion coefficient changes of vermicular cast iron and grey cast iron with temperature

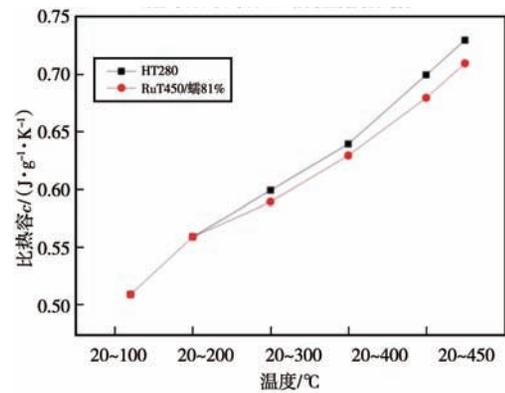


图7 蠕墨铸铁和灰铸铁比热容随温度变化

Fig. 7 The specific heat capacity changes of vermicular cast iron and grey cast iron with temperature

趋势基本一致，随温度的升高而增加。高温时，蠕墨铸铁的比热容略低于灰铸铁。

综合以上试验结果，缸盖用蠕墨铸铁实际稳定应用温度应不高于450℃，最好低于400℃。这虽然与目前一般认为发动机缸盖用铸铁的最高应用温度低于380℃是吻合的，但要想使其真正工作在400℃，还需深入开展缸盖用蠕墨铸铁热疲劳性能的研究和发动机的试验验证。此外，试验结果还表明，缸盖用蠕墨铸铁在350℃左右会出现断后伸长率的一个最低点，并在继续升温之后大幅上升，因此，在发动机设计考核时应综合考虑。

4 结论

(1) 室温至600℃时，蠕墨铸铁的抗拉强度要远高于相同温度下灰铸铁的抗拉强度。蠕墨铸铁抗拉强度随温度升高缓慢下降，450℃以后强度急剧下降，600℃时，不同牌号、不同蠕化率的蠕墨铸铁抗拉强度基本一致，约200 MPa。蠕化率高于90%以后，其强度

急剧下降的拐点会提前至400℃。灰铸铁随温度升高抗拉强度变化不大,400℃以后强度发生明显下降。

(2) 随温度的升高,蠕墨铸铁和灰铸铁断后伸长率均变化不大,但在300~400℃时,两种材料伸长率均出现一个比较明显的最低点,一般在350℃。然后随着温度的继续升高,伸长率大幅增加,500℃时伸长率达

到最大后开始急剧下降。

(3) 室温至450℃时,蠕墨铸铁的热膨胀系数和比热容随着温度的升高而增加,导热系数随着温度的升高基本不变;灰铸铁的导热系数随温度升高呈线性下降。蠕墨铸铁的热膨胀系数和比热容与灰铸铁相差不多,但导热系数低于灰铸铁。

参考文献:

- [1] 张忠仇,李克锐,曾艺成.我国蠕墨铸铁的现状 & 展望[J].铸造,2012,61(11):1303-1307.
- [2] 吕贤枝.蠕墨铸铁缸盖的生产控制[J].现代铸铁,2017(5):41-43.
- [3] 张伯明.蠕墨铸铁在发动机上的应用[J].铸造技术与材料,2011(1):31-32.
- [4] FIRICAN C, RIPOSAN I. Graphite phase characteristics in compacted/vermicular graphite cast iron inoculated in the mould[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1128: 72-79.
- [5] 吴奎武,司乃潮,刘光磊,等.蠕化剂加入量对蠕墨铸铁组织和性能的影响[J].稀土,2016,37(4):67-73.
- [6] 王成刚,刘文辉,马顺龙,等.蠕墨铸铁缸体缸盖的铸造技术开发[J].铸造,2012,61(2):136-142.
- [7] 陈丹,秦先锋,闫明辉,等.上限温度对高SiMo蠕墨铸铁抗热疲劳性能的影响[J].铸造,2018,67(6):521-526.
- [8] 周永寿,徐卫国,廖顶松.66K蠕墨铸铁缸体的试制及疲劳强度研究[J].现代铸铁,2016(6):56-60.
- [9] 马志军,文琼,杨忠,等.石墨微观结构形态对蠕墨铸铁导热性能的影响[J].热加工工艺,2018,47(4):67-71.
- [10] 赵靖宇,吕焯哲,孙玉福,等.制动鼓用含锡蠕墨铸铁的冲击韧性[J].机械工程材料,2015,39(3):80-83.
- [11] 林勇传,王凯,黄健友,等.石墨形态及金相组织对蠕墨铸铁力学性能的影响[J].铸造技术,2017,38(11):2582-2585.
- [12] 杨忠,杨喜岗,赵玉厚,等.Cr、Mo、Cu复合合金化蠕墨铸铁的组织与性能[J].铸造技术,2015,36(6):1518-1521.
- [13] 李华基,洪观镇,杨志远.钒钛蠕墨铸铁的力学性能分析[J].铸造,2010,59(10):1076-1079.

Study on High Temperature Properties of Vermicular Cast Iron for Engine Cylinder Head

WU Qi-hua¹, LI Na-na¹, WANG Jian², LI Yu-juan¹, JIANG Ai-long¹, PENG Guang-tao¹, JI Lu-lu¹

(1. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, Shandong, China; 2. Weichai (Weifang) Material Molding Manufacturing Center Co., Ltd., Weifang 261061, Shandong, China)

Abstract:

Taking vermicular graphite cast iron material used for engine cylinder head with vermicularizing rate of more than 80% as the research object, and compared with HT280, the tensile properties of RuT400 and RuT450 at room temperature to 600℃ and their physical properties at room temperature to 450℃ were studied. The results show that the tensile strengths of vermicular graphite cast irons decrease slowly with increasing temperature, and decrease rapidly after 400-450℃. The tensile strengths of gray cast irons are basically unchanged with the increase of temperature, but the strengths decrease obviously after 400℃. The elongations of vermicular cast irons and gray cast irons after breaking change little with the increase of temperature, but the elongations suddenly decrease at 350℃, then increase rapidly, and drop sharply after reaching the maximum at 500℃. At room temperature to 450℃, the thermal conductivities of vermicular graphite cast irons are basically unchanged, but the highest at about 300℃, however the thermal conductivities of gray cast irons plummet, and the thermal expansion coefficients and specific heat capacities of vermicular graphite cast irons and the trend of change are basically the same as that of gray cast irons, and increase with the increase of temperature.

Key words:

cylinder head; vermicular cast iron; high temperature tensile properties; physical properties; gray cast iron