DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.11.006

CNG 发动机用耐热疲劳高硅蠕墨铸铁材料研究

纪汉成[1],吴启洪[2]

(1.科华控股溧阳市联华机械制造有限公司,江苏 常州 213351;2.溧阳市绿色铸造产业技术创新战略联盟,江苏 常州 213351)

摘　要:研究开发了 CNG 发动机用耐热疲劳高性能的高硅耐热蠕墨铸铁,采用壳型铸造制备涡轮增压器壳铸件及本体试样。通过多种合金元素最优化复合搭配使用,使该蠕墨铸铁的常温及高温综合机械性能良好,并具有优良的耐热疲劳性能、抗氧化性能、高温强度及在高温中具有良好的尺寸稳定性和良好的导热能力。经过发动机试验台耐久试验及装车试验证明,其蠕墨铸铁产品能够经受周期性载荷及热应力的作用,满足 CNG 发动机频繁停车怠速冷热冲击的工况条件,使用寿命比现有铸铁材料大幅度提高。

关键词:高硅耐热蠕墨铸铁;涡轮增压器壳;耐热疲劳性

中图分类号:TG253　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)11-0952-06

Research on High Si Heat Resistant Vermicular Graphite Cast Iron Material for CNG Engine

JI Hancheng[1], WU Qihong[2]

(1. Kehua Holdings Liyang Lianhua Machinery Manufacturing Co., Ltd., Changzhou 213351, China; 2. Liyang Green Foundry Industry Technology Innovation Strategic Alliance, Changzhou 213351, China)

Abstract: performance for CNG engines. Shell casting was used to prepare turbocharger housing castings and body samples. Through the use of multiple alloying elements optimized and combined, the vermicular graphite cast iron has good comprehensive mechanical properties at room temperature and high temperature, and has excellent heat fatigue resistance, oxidation resistance, high temperature strength and good dimensional stability at high temperatures. And good thermal conductivity. The endurance test and loading test of the engine test bench prove that its vermicular graphite cast iron products can withstand the effects of periodic load and thermal stress, meet the working conditions of frequent idling and cold and heat shock of CNG engines, and have a longer service life than existing cast iron materials substantial improvement.

Key words: high silicon heat-resistant vermicular graphite cast iron; turbocharger housing; thermal fatigue resistance

能源危机和环境污染已成为我们面临的迫切需要解决的问题。在城市大气污染方面,柴油机和汽油机的内燃机是大气污染的主要来源之一。因此,近年来天然气作为一种新型能源在国内外受到广泛的关注。天然气资源的开发和车用技术研究作为新的前沿,正在迅速发展。天然气专用发动机通过良好的控制可以比同等的汽油机和柴油机具有更低的排放,有利于解决日益严重的大气污染问题。与传统发动机燃料柴油和汽油相比,天然气作为气体燃料,与空气的混合气混合更为均匀,燃烧比较完全,从而对净化环境和缓解能源危机颇为有益。

提高发动机效率和降低废气排放是汽车发动机技术发展的主要方向,涡轮增压器技术的使用是提高发动机效率、降低燃油消耗的有效手段。涡轮增压器的工作温度较高,柴油机用涡轮增压器的工作温度一般在 650 ℃左右,汽油发动机用涡轮增压器工作温度为 800～900 ℃,特种车辆发动机用涡轮增压器工作温度为 900～1 050 ℃。应用于 CNG(Compressed Natural Gas)车用发动机(部分特性接近汽油机):发动机排气温度上限 850 ℃(高原),怠速温度

收稿日期:2021-09-29

基金项目:常州市溧阳市科技计划(培育创新)资助项目(XMSB 20200010)

作者简介:纪汉成(1966—),陕西富平人,研究员级高工,总工程师.主要从事工程机械及汽车零部件的铸造工艺技术开发及质量管理工作.电话:18915811093,Email:jihancheng@163.com

通讯作者:吴启洪(1968—),江苏溧阳人,本科,经济师.主要从事铸造企业的管理咨询服务及铸造产业集群的规划建设研究等工作,成功创建了"江苏省绿色铸造特色小镇"、全国唯一"中国绿色铸造小镇"、科技部火炬中心溧阳绿色铸造特色产业基地.电话:13914310002,Email:1434817418@qq.com

超 100 ℃（冬天刚启动），正常道路行驶温度在 400～700 ℃（换挡，怠速），排气主要成分：N_2、CO_2、O_2、NOX、CH4、CO、H_2O、C 颗粒。随着涡轮增压器工作温度要求的提高及各种工况使用条件的特殊性，制造涡轮增压器的材质也在不断的更新换代。目前国内外市场上的汽油发动机涡轮增压器涡轮壳材质主要以硅钼球铁、硅钼铬球铁、高镍球铁及耐热钢为主，其耐热温度为硅钼球铁在 700~850 ℃，高镍球铁在 850~950 ℃，耐热钢在 950~1 110 ℃。

高效绿色节能 CNG（Compressed Natural Gas）压缩天然气发动机使用涡轮增压技术，提高了发动机效率，降低了燃油消耗。用作城市汽车 CNG 增压发动机因城市公交行驶路况的特殊性，虽然其涡轮增压器工况条件的使用温度不超过 850 ℃，怠速温度超 100 ℃，正常道路行驶温度在 400~700 ℃，但车辆大部分在低速运行且频繁停车，发动机大部分时间处于怠速状态，其搭载的涡轮增压器涡轮壳不仅需要能够耐受足够的高温强度，还要在不间断的频繁停车服役的冷热交变的载荷下具有优良的抗热疲劳性能、高温强度及在高温中具有良好的尺寸稳定性和良好的导热能力。使用现有的硅钼球铁、硅钼蠕铁、高镍球铁甚至耐热钢制作的此类涡轮增压器涡轮壳材料，经过多次发动机试验台耐久试验及在城市汽车上装车试验，其涡轮壳及排气管均产生不同程度的热疲劳开裂，影响发动机的性能，甚至产生功能性失效。这就要求制造涡轮增压器材质满足冷热冲击的工况条件及性能需要，需要一种抗热疲劳高性及抗氧化性高的新型铸铁材料。

对 CNG 发动机涡轮壳蠕墨铸铁进行了一定成效的研究，但到目前为止，经过科技查新，尚未发现有新型 CNG 发动机涡轮壳蠕墨铸铁材料能满足 CNG 发动机频繁停车怠速的工况条件及性能需要，又满足制造成本较低的要求。因此研发一种性价比高、能满足特殊工况条件及性能需要的新型蠕墨铸铁材料是亟待解决的技术任务。

主要通过多种合金元素成分最优化复合搭配及壳型铸造制备蠕墨铸铁涡轮壳铸件及本体试样，经过客户公司发动机试验台耐久试验及搭装汽车跑车试验，检测蠕墨铸铁材料的耐热疲劳及抗氧化性能。经过一年的反复试验摸索，已掌握了高硅耐热蠕墨铸铁材料生产工艺技术，试制出了合格涡轮壳铸件。样件经客户公司发动机试验台耐久试验及搭装汽车跑车试验，耐热疲劳性、抗氧化性、高温稳定性良好，满足了客户对 CNG 发动机冷热冲击工况条件需要，延长了涡轮壳的使用寿命。本耐热疲劳高硅蠕墨铸铁材料研究处于国际领先水平，具有广阔的市场前景和重要的推广价值，并产生了良好的经济效益和社会效益。

1　试验材料要求及零件结构

1.1　试验材料要求

试验材料选用多合金高硅蠕墨铸铁材料，具体设计的高硅蠕墨铸铁的化学成分如表 1 所示。

试验涡轮壳产品技术要求：

力学性能及金相组织：蠕化率≥80%，铁素体量≥90%，珠光体+碳化物≤2%，室温抗拉强度≥520 MPa，屈服强度≥420 MPa，伸长率≥1.0%，布氏硬度 230～275 HBW。

耐热疲劳试验：零件发动机试验台耐久试验要求持续 600～700 ℃运行 1 000 h 以上，循环 100 ℃、800 ℃（各 5 或 10 min）冷热冲击运行 8 000 次，耐热疲劳性好，零件不产生疲劳裂纹、不氧化脱落；搭装涡轮壳跑车试验要求抗热疲劳性、抗氧化性、热稳定性良好。

抗氧化性能：零件的耐高温及抗循环氧化性能达到 850 ℃。

1.2　试验零件结构

蠕墨铸铁涡轮壳毛坯重量 10 kg，零件质量 9.2 kg，轮廓外形尺寸 220 mm×220 mm×180 mm，铸件主要壁厚 4 mm，最大壁厚 20 mm，铸件结构复杂，呈双流道三维曲面流线结构。铸件质量要求高，不允许有任何铸造缺陷[6]，要经过荧光 PT、RT 探伤检测，气压试验：0.5 MPa，2 min，不得有泄露等现象。铸件结构见图 1。

2　试验方法

2.1　试验产品制备

（1）原辅材料准备　生铁、废钢、回炉料、硅铁合金、钛铁合金、钼铁合金、铬铁合金、钒铁合金、铌铁合金、电解镍板、增碳剂、蠕化剂、覆盖孕育剂和废钢

表1 高硅蠕墨铸铁化学成分 w(%)

Tab.1 Chemical composition of high silicon vermicular graphite cast iron

C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cr
2.5~3.5	4.5~5.5	≤0.3	≤0.05	≤0.02	0.6~0.9	0.5~0.9	0.4~0.8
V	Nb	Cu	Ti	Mg	RE	Al	Fe
0.3~0.6	0.2~0.4	≤ 0.2	0.1~0.2	0.01~0.03	≤0.05	≤0.05	余量

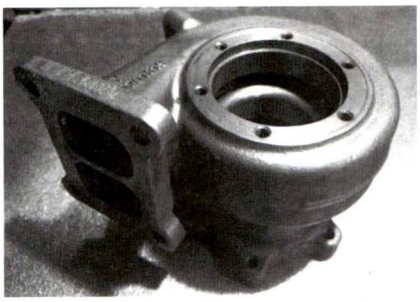

图 1 蠕墨铸铁涡轮增压器壳零件
Fig.1 Vermicular graphite cast iron turbocharger housing

片覆盖剂;其中生铁、废钢和回炉料的质量比为 4:2～4:2～4。

(2)电炉熔炼　将生铁、废钢、回炉料加入到中频电炉进行熔炼,再依次加入所需铁合金、电解镍板及补加增碳剂,铁液总质量控制在 500 kg。

(3)分析控制　熔炼过程中取铁液进行光谱分析及热分析检测，调整化学成分及熔炼温度,获得要求的原铁液化学成分及 1 520～1 550 ℃的熔炼出铁温度。

(4)蠕化处理　在浇注处理包的凹坑包底按蠕化剂、覆盖孕育剂和覆 盖剂的顺序装包,并捣紧实,覆盖剂将覆盖孕育剂全覆盖;将铁液倒入蠕化处理包,铁液与蠕化剂、孕育剂反应,扒渣获得待浇注的铁液[11]。

(5)浇注　采用自动浇注机将蠕化后的铁液浇注到铸型型腔中,控制铁液的浇注温度为 1 380～1 420 ℃。

(6)分析检测　蠕化处理完毕,取样光谱分析,获得蠕墨铸铁最终化学成分。冷却开箱,落砂清理得到高硅耐热蠕墨铸铁涡轮壳毛坯产品，从产品本体取样获得蠕墨铸铁力学性能及金相组织，其高硅耐热蠕墨铸铁涡轮壳的化学成分 w(%)为:2.98 C,4.85 Si,0.24 Mn,0.031 P,0.011 S,0.05 Cu，0.78 Mo,0.75 Ni,0.48 Cr,0.42 V,0.26 Nb，0.132 Ti,0.025 Ce,0.013 6 La,0.012 5 Mg,0.029 5 Al,余量为Fe。

其蠕化剂及孕育剂的选用与制备,蠕化剂成分为 43%~47% Si,3.0%~3.5% Mg,8.6%~9.0% RE,0.8%~1.20% Ca,Al≤1.2%,余量为铁,其中蠕化剂的质量为熔炼液质量的 0.6%。覆盖孕育剂的成分为 60%~70% Si,0.5%~2.0% Ca,6.0%~11.0% Ba,0.5%~1.7% Al,余量为铁;其中覆盖孕育剂的质量为熔炼液质量的 0.6%。随流孕育剂的成分:70%~76% Si,1.0%~2.0% Ca,1.0%~3.0% Ba,1.0%~2.0% Al,余量为铁,其中随流孕育剂的质量为熔炼液质量的0.15%。

铁液的出炉温度控制在 1 520～1 550 ℃,浇注温度控制在 1 380～1 420 ℃,蠕化铁液的浇注时间控制在≤8 min。

2.2　内部缺陷检测

(1)将涡轮壳按要求进行线切割解剖,采用荧光检测其内部缺陷情况，其缩松及夹渣缺陷级别要求达到二级以上。

(2)将涡轮壳按要求进行 X-ray 检测,其缩松及夹渣缺陷级别要求达到二级以上。

2.3　常温力学性能及金相组织检测

从涡轮壳铸件产品厚壁法兰面上，截取本体试样进行拉伸试验及硬度金相检测，从涡轮壳的薄壁及舌部处取样进行金相检测。力学性能:室温抗拉强度为 555、560、558 MPa；屈服强度为 445、450、447 MPa,伸长率为 2.4%、2.0%、2.2%,布氏硬度在 250、255、258 HBW。金相组织：厚壁处蠕化率为 85%,基体中铁素体为 90%;薄壁处蠕化率为 75%,基体中铁素体为 95%;舌部处蠕化率为 85%,基体中铁素体为 90%。图 2 为高硅耐热蠕墨铸铁的石墨组织,图 3 为高硅耐热蠕墨铸铁的基体组织。

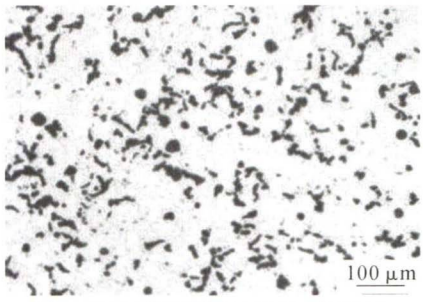

图 2 高硅耐热蠕墨铸铁的石墨组织
Fig.2 Graphite structure of high silicon heat-resistance vermicular graphite cast iron

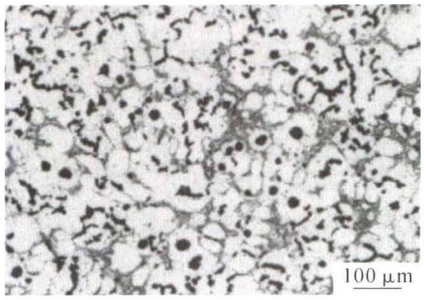

图 3 高硅耐热蠕墨铸铁的基体组织
Fig.3 Matrix structure of high silicon heat-resistance vermicular graphite cast iron

2.4　抗热疲劳性能及抗氧化性能测试

将涡轮壳铸件按要求进行机械加工，成品零件装配到发动机试验台进行耐久试验。

耐热疲劳试验：零件发动机试验台耐久试验要求持续 600～700 ℃运行 1 000 h 以上,循环 100 ℃、800 ℃(各 5 或 10 min)冷热冲击运行 8 000 次,零件不产生疲劳裂纹、不氧化脱落;搭装涡轮壳跑车试验要求抗热疲劳性、抗氧化性、热稳定性良好。抗氧化

性能：零件的耐高温及抗循环氧化性能达到850 ℃。重汽 MT13 增压器 8 000 次气站台位冷热交替热负荷耐久试验：图 4 所示为冷热冲击试验曲线，图 5 所示为涡轮壳喉口处单边与涡轮壳碰擦。

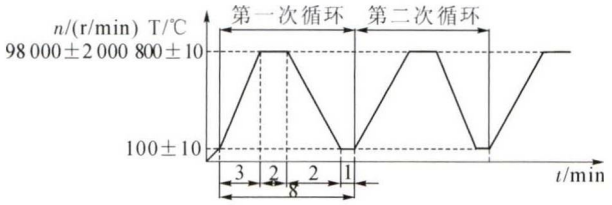

图 4 冷热冲击试验曲线

Fig.4 Thermal shock test curve

图 5 涡轮壳喉口处单边与涡轮碰擦

Fig.5 The unilateral collision of the turbine casing with the turbine

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

(1)采用高硅钼球铁、高硅合金(钼镍)蠕铁、高镍球铁制作的涡轮壳产品进行发动机试验台耐久试验：持续 600～700 ℃运行 1 000 h，循环 100 ℃、800 ℃(各 5 或 10 min)冷热冲击 5 000 次，涡轮壳流道就会疲劳开裂。其抗热疲劳性能数据远远达不到 CNG 发动机特殊抗热疲劳性能要求[3]。究其原因是钼镍蠕铁的耐高温性及抗氧化性差，热疲劳性不够。如图 6 所示，持续温度 600～700 ℃，1 000 h 后：①涡轮壳喉口处单边与涡轮碰擦；②与涡轮配合的光滑面变粗糙，且氧化层脱落，严重的表现为穴蚀状（全是凹坑）。冷热冲击试验后，流道分隔墙热疲劳开裂；开裂严重的布满裂纹，且氧化层脱落。

(2)采用多种合金 Mo、Ni、Cr、V、Nb 的优化复合匹配的高硅耐热蠕墨铸铁，制作的涡轮壳产品进行发动机试验台耐久试验：持续 600～700 ℃运行 1 000 h，循环 100 ℃、800 ℃(各 5 或 10 min)冷热冲击 8 000 次，涡轮壳流道分隔墙良好，且无氧化脱落现象，达到了 CNG 发动机特殊抗热疲劳性能要求。

图 7 为涡轮增压器样件装配完成准备进行台架实验，图 8 为完成台架实验的涡轮增压器样件壳体，无疲劳裂纹和氧化脱落。

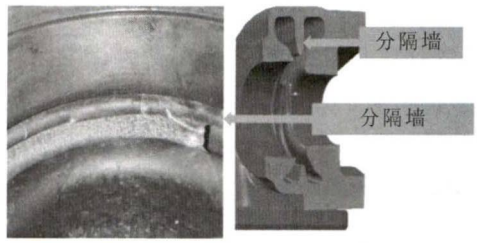

图 6 高硅钼球铁，高硅(钼镍)蠕铁和高硅球铁涡轮增压器壳体台架实验出现的疲劳裂纹及氧化脱落

Fig.6 After bench test, fatigue cracks and oxide scales falling-off in high SiMo SG iron, high Si (MoNi) CGI and high Si SG iron turbocharger housing

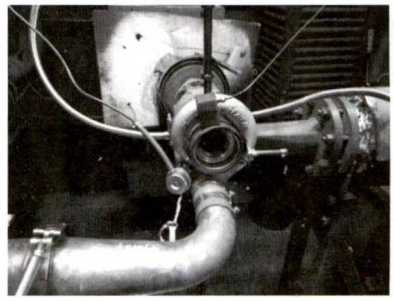

图 7 装配好的涡轮增压器样件准备进行台架实验

Fig.7 Assembled turbocharger prototype ready for engine bench test

图 8 台架实验后的涡轮增压器壳体，未发现疲劳裂纹和氧化脱落

Fig.8 After bench testing, turbocharger prototype housing no fatigue cracks and oxide scales falling off

3.2 结果分析

热疲劳的本质是由交变应力的反复作用而引起的材料损伤或破坏。影响材料热疲劳性能的因素较多，主要有两种：一种是外部因素，指实验设备和实验环境，如试验加热与冷却的速度及频率，加热和冷却之间的温度差；二是内部因素，指材料本身的影响，如微观组织、物理性能、化学成分、力学性能等。这里实验加工样品装配于发动机试验台时外部条件相同，故此处不考虑外部因素的影响。

影响热疲劳的主要内部因素在于材料本身的性能因素作用。

(1)材料物理性能影响　材料热疲劳产生的根本原因是热应力和循环应力，而材料的热应力由

于材料的物理性能有着密不可分的关系。热应力的大小与线膨胀系数 α、材料的纵弹性系数 E、温度差 ΔT 成正比关系，而 ΔT 又与材料的导热系数决定，因而热应力与线膨胀系数和导热系数直接相关，此外，材料的热疲劳还与弹性模量、屈服强度、密度、几何因素都有关系。

(2)材料化学成分的影响　材料的化学成分不同，其抗疲劳的性能也不同。一些合金元素的含量和存在的状态对材料的抗热疲劳性能影响较大。在钢铁中，合金元素与碳元素形成碳化物，这些碳化物的形状、尺寸和数量都严重影响着材料的抗热疲劳性能，有些就是裂纹源，加快裂纹萌生。还有一些夹杂物与基体材料的线膨胀系数相差较大，在材料发生热胀冷缩时二者不同步，从而造成裂纹的萌生[4]。

(3)材料的力学性能　力学性能对抗热疲劳性能影响最大的是材料的强度和塑性。高的抗拉强度有利于减小疲劳过程的塑性应变，提高材料的抗热疲劳能力。强度和塑性在不同的热疲劳阶段起到的作用也不同，高的强度有利于抑制热疲劳裂纹的萌生，高的塑性有利于抑制疲劳裂纹的扩展，只有二者有效的结合起来，材料才具有更优的抗热疲劳能力，提高材料的热疲劳寿命。

(4)材料的微观组织的影响　其中主要是相的组成和晶粒度的大小。不同的组成相的强度和塑性都不相同，不同相的收缩率也不相同，在材料发生热胀冷缩时产生的应力也不同，因而材料的抗热疲劳能力也不同。越细小的晶粒越有利于阻碍热疲劳裂纹的萌生和扩展，晶界对裂纹的扩展也就有阻碍作用。而且晶粒越细小，材料的强度和塑性也就越好，因而细化晶粒有利于提高材料的抗热疲劳能力[7]。

蠕墨铸铁具有球墨铸铁的强度，和灰铸铁相比有类似的减震、导热能力及铸造性能，又比灰铸铁有更好的塑性和耐热疲劳性能。蠕墨铸铁具有优良的综合性能，已成为 CNG 发动机涡轮增压器涡轮壳产品的理想材料。

蠕墨铸铁提供了一种力学性能与导热性能的完美结合，满足了承受交变应力零件的热疲劳性能要求。影响蠕墨铸铁抗热疲劳性能的主要因素：

(1)基体组织对热疲劳性能的影响　蠕铁中热疲劳裂纹的扩展和萌生有很大的不同，裂纹的萌生受铸铁中石墨的形态的影响较大，而裂纹的扩展主要受基体组织的影响。铸铁基体组织中主要是铁素体和珠光体，其中铁素体具有较好的塑韧性，低的缺口敏感性，因而裂纹生长的比较缓慢；而珠光体具有强度高，塑性低，缺口敏感性强的缺点，因而裂纹比较容易扩展。在反复的加热和冷却过程中，材料内部产生很大的热应力，并产生较大的热应变，在这些周期性变化的热应力和热应变的作用下，材料不断地膨胀、收缩变化而产生塑性变形。铸铁基体中的铁素体，由于塑性较好会跟随着材料的热胀冷缩发生塑性变形，抵抗热应力的作用缓解铸铁材料的塑性形变，阻碍裂纹的扩展。而珠光体基体由于塑性较小，在材料反复的变形过程中，出现塑性积累，最终会发生珠光体的疲劳断裂，促进裂纹的扩展。因而蠕墨铸铁基体中的珠光体量越高，裂纹扩展的越快，裂纹长度也就越长。故此蠕墨铸铁的基体组织中要求铁素体≥90%，珠光体+碳化物≤10%。

(2)力学性能对热疲劳性能的影响　高的高温强度、屈服强度及良好的韧性对热疲劳抗力均有贡献。热疲劳抗力与材料的蠕变抗力有关，抗蠕变性能越好，裂纹越不易扩展，其抗热疲劳性能越好。故此蠕墨铸铁的力学性能要求：室温抗拉强度≥520 MPa，屈服强度≥420 MPa，伸长率≥1.0%，布氏硬度在 230~275 HBW。

(3)蠕化率对热疲劳性能的影响　蠕虫状石墨的多少，对基体的热疲劳性有明显的影响。蠕化率越高，热疲劳性能越差，主要是铸铁蠕化率越高，其特征越接近于片状石墨铸铁之故。但综合涡轮壳结构特征，蠕化率选择在 70%～85%为宜，抗热疲劳性能最好[5-6]。

(4)合金元素对热疲劳性能的影响　随着高硅耐热蠕墨铸铁中多种合金元素 Mo、Ni、Cr、V、Nb 含量的增加及优化复合匹配，提高了蠕墨铸铁的室温、高温综合力学性能，提高了基体组织的高温稳定性、抗蠕变能力及抗氧化性能，强化了铁素体基体组织，细化了组织的晶粒度，进一步提高了新型蠕铁材料的抗热疲劳性能。

我们研究开发了 4 种材质的涡轮壳，如高硅钼球铁、高硅合金蠕铁、高镍球铁、高硅多合金蠕铁。将这 4 种材质的涡轮壳加工样品装配到发动机试验台，进行耐久试验作抗热疲劳性能测试，其抗热疲劳结果见表 2。

从表 2 可以看出，多合金高硅蠕墨铸铁的抗热疲劳性能最好，高硅钼球铁的抗热疲劳性能最差，高镍球铁虽然比其它材质的耐高温性能好的，但由于导热性能较差，其抗热疲劳性能差些。试验结果表明，材质的抗热疲劳性能与力学性能及导热性能有着密切关系，材质的抗拉强度越高，抗热疲劳性能越好；材质的导热性能好，加之抗拉强度高，其综合性能好，其抗疲劳性能越好。材质的耐高温性能好并不见得抗热疲劳性就好。

表 2 高硅钼球铁、高硅合金蠕铁、高镍球铁、高硅多合金蠕铁热疲劳试验结果

Tab.2 Thermal fatigue test results of high silicon molybdenum ductile iron, high silicon alloy vermicular iron, high nickel ductile iron, and high silicon multi-alloy vermicular iron

铸态	成分 w(%)												室温性能				金相		首次裂纹循环次数及持续高温运行氧化脱落	
	C	Si	Mn	S	P	Mg	Re	Mo	Ni	Cr	V	Nb	δ_b/MPa	$\delta_{0.2}$/MPa	HB	ε	石墨形态	基体	100 ℃、800 ℃（各 5 或者说 0 min）	600~700 ℃持续运行
高硅钼球铁	3.45	4.20	0.26	0.012	0.03	0.04	0.01	0.61	0.05	0.04	0.02	0.01	535.0	420.0	200.0	12.0	球化 2~3 级	铁素体 90%	1 000 次	300 h
高硅合金蠕铁	3.10	4.80	0.25	0.013	0.04	0.014	0.05	0.75	0.68	0.04	0.01	0.01	538.0	430.0	210.0	2.5	蠕虫状 85%	铁素体 90%	1 800 次	400 h
高镍球铁	2.10	5.00	0.60	0.014	0.04	0.08	0.01	0.02	35.0	1.80	0.01	0.01	400.0	230.0	170.0	10.0	球化 2~3 级	奥氏体 90%	1 500 次	500 h
高硅多合金蠕铁	2.95	5.00	0.25	0.011	0.03	0.01	0.05	0.78	0.71	0.45	0.42	0.26	555.0	448.0	255.0	2.0	蠕虫状 85%	铁素体 90%	5 000 次无疲劳裂纹	1 000 h 无氧化脱落

4 合理选择化学成分及蠕化率

4.1 合理选择化学成分

高硅多合金蠕墨铸铁中 Mo、Ni、Cr、V、Nb 含量的存在对涡轮壳的抗热疲劳性能影响较大，材质的化学成分不同，其抗热疲劳性能也大不相同[9-10]。

CNG 发动机用高硅耐热蠕墨铸铁，优化合金配比，Si 的含量为 4.50%～5.50%，能固溶强化基体，提高组织的高温性能及抗氧化性；Mo 的含量为 0.50%～0.90%，提高基体组织的热稳定性及高温抗蠕变能力；Ni 的含量为 0.50%～0.90%，提高组织的高温强度及韧性（高的高温强度及韧性可以阻碍疲劳裂纹的扩展，其热疲劳性能良好），提高组织的高温抗蠕变性能（抗蠕变性能越好，疲劳裂纹越不易扩展，其热疲劳性能越好）；Cr 的含量为 0.40%～0.80%，提高组织的耐热性和减少氧化性；V 的含量为 0.30%～0.60%，能细化石墨，增加组织的高温稳定性，提高了蠕墨铸铁的强度和耐热疲劳性能；Nb 的含量为 0.20%～0.40%，能细化组织的晶粒度，提高高温基体组织的稳定性及耐热疲劳性能[8]。通过多种合金元素各组分间的相互协调与配合，使本发明的蠕墨铸铁具有优良的抗热疲劳性能、抗热裂性、抗氧化性、导热性能和较高的常温力学性能、高温强度及细小的铁素体金相组织[12]。

4.2 蠕化率选择

蠕化率越高，蠕铁基体组织中珠光体含量越大，在热疲劳循环过程中裂纹萌生的越早，裂纹的扩展也越快，抗热疲劳性也会越差。故蠕墨铸铁的蠕化率应控制在 70%～80%为宜。

5 结论

（1）高硅耐热蠕墨铸铁采用多种合金元素复合优化匹配的铁素体基体的蠕墨铸铁，其制作的涡轮壳常温、高温综合力学性能良好，其组织的高温稳定性及抗氧化性良好，故此抗热疲劳性好。

（2）蠕化率越高，蠕铁基体组织中珠光体含量越大，在热疲劳循环过程中裂纹萌生的越早，裂纹的扩展也越快，抗热疲劳性也会越差。故此蠕墨铸铁的蠕化率应控制在 70%～80%为宜。

（3）研究的高硅耐热蠕墨铸铁制造的CNG发动机用涡轮壳工作温度为 850 ℃以下。

参考文献：

[1] 林勇传，黄健友. 发动机特殊材质蠕墨铸铁 RuT400 的研发与应用[J]. 内燃机工程，2017(6)：86-91.

[2] 孙玉成，孟迪. 蠕墨铸铁性能及其在内燃机中应用的研究进展[J]. 铸造技术，2019，40(4)：417-422.

[3] 刘庆，王强. 发动机排气歧管用高硅钼球墨铸铁抗热疲劳性研究[J]. 热加工工艺，2018(14)：44-47.

[4] 姜爱龙，张孟泉. RuT400 蠕墨铸铁热疲劳性能研究[J].上海金属，2019(6)：80-84.

[5] 张佳琦，司乃潮. 蠕化率对蠕墨铸铁组织机构热疲劳性能的影响[J]. 材料导报，2013(7)：111-123.

[6] 熊毕伟，李远. 蠕化率对蠕墨铸铁组织机构热疲劳行为的影响[J]. 铸造技术，2019(11)：1149-1152.

[7] 谢同轮. 制动鼓用蠕墨铸铁及其耐磨性·抗热疲劳性能研究[M]. 吉林大学，2015.

[8] 邱汉泉. 蠕墨铸铁及其生产技术 [M]. 北京：化学工业出版社，2010.

[9] 杨忠，王金炜. Cu-Mo 蠕铁热疲劳性能研究 [J]. 热加工工艺，2018(24)：79-85.

[10] 杨忠，杨喜岗. Cr、Mo、Cu 复合合金化蠕墨铸铁的组织和性能[J]. 铸造技术，2015，36(6)：1518-1521.

[11] 唐力，袁礼东. 优质蠕墨铸铁的生产实践与体会[J]. 现代铸铁，2012(2)：41-47.

[12] 李文雅，谢海江. 汽车制动鼓用蠕墨铸铁的性能研究[J]. 铸造技术，2015(11)：2633-2635.