

中硅钼铌球墨铸铁排气歧管研制与应用

史玉锋, 张银生, 田书涛, 李超, 张翼

西峡县内燃机进排气管责任有限公司 河南南阳 474500

摘要: 通过对现有硅钼球墨铸铁材料及高镍奥氏体球墨铸铁材料成分配比的优化及微量合金元素添加与试验验证研究, 获得了一种新型中硅钼铌球墨铸铁材料, 并成功应用于当前多种中高端发动机排气歧管制造与产业化。该新型中硅钼铌球墨铸铁具有优越的耐温性和抗热疲劳性能, 替代了760~820℃耐温要求下采用高镍奥氏体球墨铸铁制造的相应产品, 大幅降低了对应产品的制造成本, 相应产品在780℃高温下, 抗拉强度 $\geq 70\text{MPa}$ 、屈服强度 $\geq 50\text{MPa}$ 。同时, 新型中硅钼铌球墨铸铁在一汽解放、弗吉亚等客户产品的研制和应用过程中, 取得了良好的经济效益和社会效益。

关键词: 中硅钼铌球墨铸铁; 耐温820℃; 热疲劳性能; 排气歧管

Development and application of medium silicon molybdenum niobium ductile iron exhaust manifold

SHI Yufeng, ZHANG Yinsheng, TIAN Shutao, LI Chao, ZHANG Yi

Xixia Internal Combustion Engine Intake and Exhaust Pipe Co., Ltd., Nanyang 474500, Henan, China

Abstract: Through the research on the optimization of the composition ratio of existing silicon-molybdenum ductile iron materials and high-nickel austenitic ductile iron materials, as well as the addition and experimental verification of trace alloying elements, a new type of medium-silicon molybdenum niobium ductile iron material has been obtained and successfully applied to the manufacturing and industrialization of various medium and high-end engine exhaust manifolds. This new type of medium-silicon molybdenum niobium ductile iron material has superior temperature resistance and thermal fatigue resistance, replacing the corresponding products made of high-nickel austenitic ductile iron materials at temperatures of 760~820℃, significantly reducing the manufacturing cost of the corresponding products. At 780℃, the tensile strength of the corresponding products is $\geq 70\text{MPa}$, and the yield strength is $\geq 50\text{MPa}$. Meanwhile, in the process of developing and applying this new type of medium-silicon molybdenum niobium ductile iron material in the products of customers such as FAW Jiefang and Faurecia, the research and application of related technologies have achieved good economic and social benefits.

Keywords: medium-silicon molybdenum niobium ductile iron; temperature resistance up to 820℃; thermal fatigue resistance; exhaust manifold

1 序言

目前, 国内外硅钼球墨铸铁产品的耐热温度 $\leq 760^\circ\text{C}$, 抗拉强度为400~550MPa; 高镍奥氏体球墨铸铁产品的耐热温度 $\leq 880^\circ\text{C}$, 抗拉强度为370~

第一作者: 史玉锋, 高级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为汽车零部件制造及其相关材料开发与应用, E-mail: syf88818@126.com。

500MPa^[1]。近几年，我公司接到的中高端发动机的排气歧管越来越多，而中高端发动机排气温度一般均为800~820℃，因此其排气管产品需满足820℃不变形开裂的要求，耐热性要求在780℃时达到抗拉强度≥70MPa。依据中高端发动机排气温度及相关技术要求，硅钼球墨铸铁材质则不能满足，几乎全部中高端排气歧管材料均是选择高镍奥氏体球墨铸铁^[2]，当前每年有近百万件产品，且逐年递增。但由于高镍奥氏体球墨铸铁的本质特性，其产品制造成本居高不下，相应产品价格高昂，客户也多次提出产品降价问题。因此，公司决定研发一种新型耐温材料以适应当前“国六”中高端汽车发动机耐热零部件的制造趋势，同时有效降低产品的制造成本。

本文通过对现有硅钼球墨铸铁、高镍奥氏体球墨铸铁的性能及成分对比分析，选择拟代用材料、技术方案论证。再对拟代用材料进行成分优化及改善、拓展，使其性能达到或超越当前中高端发动机耐热零部件对材料的高温性能技术要求。

2 材料研究

2.1 技术方案的制定及设置目标

产品需满足排气温度820℃，经400h高温耐久性台架试验，在2000h变工况负荷循环下台架试验不发生断裂、变形、开裂；常温条件下抗拉强度≥600MPa，屈服强度≥500MPa；780℃条件下的力学性能满足抗拉强度≥70MPa、屈服强度≥50MPa的指标要求。

经多方分析论证，确定从两方面着手研究：一方面，调整高镍奥氏体球墨铸铁中Ni含量，以降低

其生产成本；另一方面，优化硅钼球墨铸铁化学成分及生产工艺，通过微量合金元素的添加，提升硅钼球墨铸铁的耐温性及高温力学性能^[3, 4]。

2.2 方案的实施与验证

根据材料元素的化学性能，制定试制方案，工艺措施为如下。

(1) 方案选择 方案1：硅钼球墨铸铁（以下简称“材质1”）；方案2：硅钼球墨铸铁材料+少量微量合金元素Ni（以下简称“材质2”）；方案3：高镍奥氏体球墨铸铁（以下简称“材质3”）。

(2) 熔炼工艺 使用现有原材料，在熔炼过程中加入碳化硅，采用300kg中频感应电炉熔炼，材质1、材质2浇注温度为1360~1400℃，材质3浇注温度为1440~1480℃。

(3) 实施结果 对以上3种材质进行调试生产，并对化学成分、常温力学性能和高温力学性能进行分析和试验，结果见表1~表3。

表1 化学成分（质量分数） (%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cr
材质1	3.25	4.28	0.0121	0.0337	0.00486	0.823	—	0.0532
材质2	3.38	4.01	0.135	0.0294	0.0475	0.816	0.559	0.0392
材质3	2.03	5.06	0.54	0.0223	0.0142	0.355	34.49	1.74

表2 常温力学性能

项目	R _m /MPa		R _p /MPa		A (%)	
材质1	599	601	509	501	7.5	7.5
材质2	615	610	500	505	9.5	9.5
材质3	420	418	240	240	22.	22

表3 高温力学性能

项目	780℃			820℃（材质3为880℃）		
	R _m /MPa	R _p /MPa	A (%)	R _m /MPa	R _p /MPa	A (%)
材质1	55、55、54	33、33、33	41.5、42、46.5	45、46、44	27、28、26	50、48.5、49
材质2	57、56、57	36、33、35	47、46、42	44、46、46	26、28、27	48.5、49、40.5
材质3	149、146、136	82、82、75	23.5、25、28.5	84、79、76	48、45、53	25.5、24.5、25

从表1~表3数据分析可以得出如下结论。
1) 材质2的化学成分与既定目标值符合性最好，材质1和材质3偏离值较大。
2) 材质1、材质2的常温力学性能接近既定目标值要求，但高温力学性能值偏离既定目标值较大，

材质3的高温力学性能远超过技术标准要求，但是常温力学性能偏离较大，且材质3中Ni含量较高，制造成本高，加工工艺性较差。
3) 材质2的常温及高温力学性能略优于材质1。
经过10余次的试验与验证，在硅钼球墨铸铁中

添加了Ni、V合金元素,并进一步优化了材料成分含量,结果高温和常温力学性能均有所改善,优化后化学成分和力学性能见表4、表5。

表4 优化后化学成分(质量分数) (%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	V
实测值1	2.94	4.31	0.162	0.0216	0.0076	0.837	0.789	0.198
实测值2	3.22	4.08	0.131	0.0393	0.00668	0.867	0.836	0.205

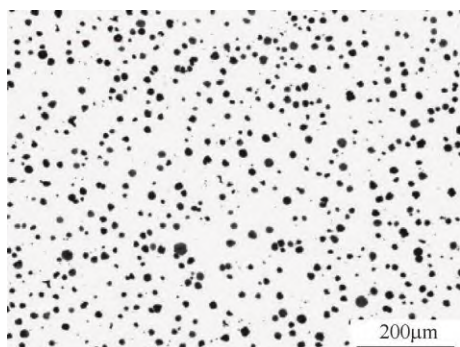
表5 优化后力学性能

项目	R_m /MPa	R_p /MPa	A (%)
常温(20℃)	645、660	535、540	1.0、2.0
高温(780℃)	68、73	53、55	26、29

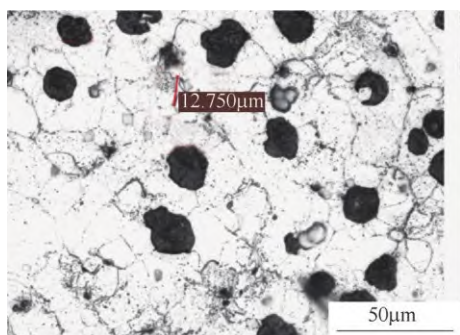
从表4、表5分析可得出,新材料的常温力学性能和高温力学性有大幅改善,但存在不稳定性。

3 中硅钼铌球墨铸铁排气歧管产品研究

结合项目产品(锡柴某型排气歧管),将中硅钼铌球墨铸铁应用于该产品的试制。由于该产品属于薄壁、异形复杂管件,在试制过程中,总是在产品本身材料取样部位与标准试样之间出现成分、内部组织(见图1、图2)和性能的偏差^[5]。

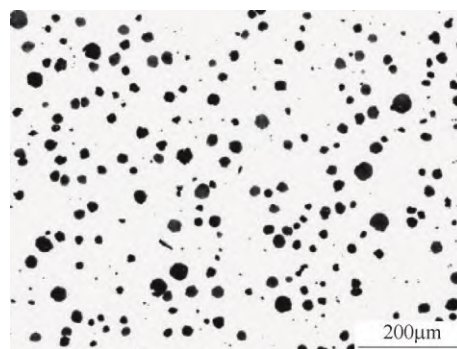


a) 200 ×

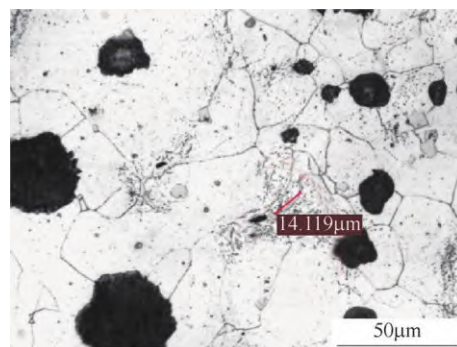


b) 500 ×

图1 管身薄壁部位金相组织



a) 200 ×



b) 500 ×

图2 法兰厚壁部位金相组织

为此,研发了一种炉前快速取样装置(见图3),熔炼处理后的铁液浇注入模壳中冷却后形成试样,试样的厚大部位代表排气歧管的厚大壁厚(法兰位置),过渡部位代表排气歧管厚大与管壁的过渡位置,薄壁部位代表产品的管壁薄壁处,使得所取试样近似于产品的结构特性,在炉前快速取样检测时,通过不同部位的检测对比,可适时监控到所浇注产品成分及内部组织情况,并进行适时纠偏,确保所制产品与标准试样的成品检测最大限度地一致,进而保障产品材料性能检测的准确性,且方便产品的试制。

同时,为进一步提升新型材料的耐温性、高温

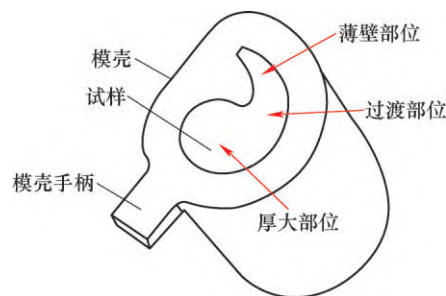


图3 炉前快速取样装置

性能及稳定性，对产品材料成分做进一步优化，加入了适量的微量元素Nb，并在熔炼工艺上做了进一步优化与规范。

1) 根据材料性能的设定目标值及原材料成分含量制定好所用材料种类及相应的配料单。

2) 控制原材料的规格（碳化硅粒度控制在1~3mm，C04高纯生铁、回炉料抛丸处理）。

3) 控制原材料加入顺序及加入量，先加高纯生铁启熔，见铁液后将SiC（1/2量）加入，然后加入废钢、回炉料及钼铁，熔化过程中将增碳剂分2批加入，并用废钢压入，待熔炼至2/3时加入余下SiC，所有炉料熔清后，加入镍板、硅铁、钼铁和钒铁，铁液温度在1450~1460℃时进行快速取样，炉前光谱检测并适时纠偏。从熔炼到浇注完毕1.5h以内，采用快速浇注，浇注温度控制在1390~1440℃。

针对产品的孤立热节处出现缩松、缩孔缺陷，采用了发热冒口和冷铁、排气针设置的复合工艺进行处理，解决了异形复杂薄壁管件孤立热节缩松、缩孔缺陷，经过多次、多产品的试验与验证，效果良好^[6]。

经反复材料成分优化、产品试验与验证，采用中硅钼铌球墨铸铁后，其化学成分控制值见表6，相关产品满足力学性能要求，见表7。

表6 中硅钼铌球墨铸铁化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Nb	V
2.7~3.2	4.1~4.3	0.1~0.2	≤0.04	≤0.01	0.8~0.9	0.7~0.9	0.6~0.7	0.19~0.23

表7 中硅钼铌球墨铸铁产品力学性能

项目	R _m /MPa	R _p /MPa	A (%)	硬度HBW
常温（20℃）	630~746	530~580	1~4	220~295
高温（780℃）	70~79	51~57	24~36	—

上述技术、规范先后应用于一汽解放、弗吉亚、上汽通用等客户的不同排气歧管产品，经第三方检测，以及客户技术检测、试验和装机运行（在820℃高温下正常工作）、台架试验（400h高温耐久性台架试验、250h热冲击试验和2000h变工况负荷循环台架试验，均未发生断裂、变形、开裂），质量达标，目前已经成功地开发了40余种新型排气歧管产品，满足了10余个系列中高端发动机排气歧管

制造需求，替代了760~820℃度高温下采用高镍奥氏体球墨铸铁材料相应产品制造，使得其制造成本得到大幅度下降，有效降低了排气歧管开发及制造成本，得到客户的高度评价。

在相关的排气歧管产品研发与试制过程中，发现微量合金元素Nb、V对产品材料高温（780℃）下抗拉强度和屈服强度有较大的提升作用。

4 结束语

1) 开发了一种全新的材料(中硅钼铌球墨铸铁)，满足“国六”排放的中高端发动机排气歧管耐温820℃的技术要求，替代了相同温度下高镍奥氏体球墨铸铁的排气歧管制造，成本是高镍奥氏体球墨铸铁排气歧管制造的不足1/3，现已广泛应用于中高端发动机排气歧管及涡轮增压器壳体等耐热机械零部件产品的制造，产值达每年3亿元以上，效益显著。

2) 通过新材料下发动机排气歧管的研制与应用，形成了一套完整的中硅钼铌球墨铸铁排气歧管铸造工艺。

3) 开发了炉前快速取样模壳，解决了当前产品铸造过程中铁液熔炼成分检测时，标准试样与产品本体试样检测出现较大偏差的技术难题，实现了所制产品与标准试样检测的一致性，进而保障了产品材料性能检测的准确性。

参考文献：

[1] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册（第5卷）：铸造工艺[M]. 北京：机械工业出版社，2021.

[2] 全国铸造标准化技术委员会. 排气歧管铸铁件：GB/T 26653—2011[S]. 北京：中国标准出版社，2011.

[3] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册（第1卷）铸铁[M]. 3版. 北京：机械工业出版社，2010.

[4] 杨叔子. 机械加工工艺师手册[M]. 北京：机械工业出版社，2001.

[5] 黄志光. 铸件内在缺陷分析与防止[M]. 北京：机械工业出版社，2011.

[6] 魏兵，袁森，张卫华. 铸件均衡凝固技术与应用实例[M]. 北京：机械工业出版社，1998.

（收稿日期：20250120）