多元合金化SiMo球墨铸铁在汽车发动机排气歧管中的应用研究

金通[1,2] 蒋路军[2] 陈旭[1] 卢柳林[2] 刘胜[2] 蔡启舟[1]

（1.华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室,武汉 430074；2.东风商用车技术中心,武汉 442000）

摘要：合金化是改善SiMo球墨铸铁力学性能和耐热性能的重要措施之一,综述了合金元素对SiMo球墨铸铁组织和性能的影响,以高爆压柴油发动机和气体发动机排气歧管为对象,开展了多元合金化SiMo球墨铸铁的研究工作。结果表明:Mo质量分数由0.9%提高至1.46%时,组织中碳化物数量增加,SiMo球墨铸铁的抗拉强度、屈服强度和硬度提高,但延伸率下降了50%;V合金化使SiMo球墨铸铁的抗拉强度升高、延伸率下降,V质量分数为0.4%时SiMo球墨铸铁获得良好的常温力学性能;800 ℃短时抗拉强度随V量的增加而增大,V质量分数超过0.4%后无明显变化;多元合金化SiMo球墨铸铁中,V-Nb合金化SiMo球墨铸铁的高温抗拉强度为59 MPa,而V-Cr和V-Nb-Cr合金化SiMo球墨铸铁的高温强度为61~64 MPa,满足高爆压柴油发动机和气体发动机排气歧管对SiMo球墨铸铁高温抗拉强度的要求。

关键词：SiMo球墨铸铁 排气歧管 多元合金化 常温强度 高温强度

中图分类号：TG255 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250257

Research on Application of Multi-Element Alloyed SiMo Ductile Iron in Exhaust Manifolds of Automotive Engine

Jin Tong[1,2], Jiang Lujun[2], Chen Xu[1], Lu Liulin[2], Liu Sheng[2], Cai Qizhou[1]

(1. Dongfeng Commercial Vehicle Technology Center, Wuhan 442000; 2. State Key Laboratory of Materials Processing and Die& Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: Alloying is one of the key approaches to improve the mechanical properties and thermal resistance of SiMo ductile iron. This paper reviews the effects of alloying elements on the microstructure and properties of SiMo ductile iron. A systematic study on multi-element alloyed SiMo ductile iron was carried out targeting exhaust manifolds of high peak-pressure diesel engines and gas engines. The results show that when the mass fraction of Mo increases from 0.9% to 1.46%, the volume fraction of carbides in the microstructure rises, leading to increases in the tensile strength, yield strength and hardness of SiMo ductile iron, while the elongation decreases by 50%. Vanadium alloying elevates the tensile strength but reduces the elongation of SiMo ductile iron; the material achieves satisfactory room-temperature mechanical properties at a V mass fraction of 0.4%. The short-term tensile strength at 800 ℃ increases with the rise of V content, yet no significant change is observed when the V mass fraction exceeds 0.4%. Among the multi-element alloyed SiMo ductile irons, the V-Nb alloyed SiMo ductile iron reaches a high-temperature tensile strength of 59 MPa, while the V-Cr and V-Nb-Cr alloyed variants exhibit high-temperature strengths of 61~64 MPa. These values meet the high-temperature tensile strength requirements for SiMo ductile iron applied in exhaust manifolds of high peak-pressure diesel engines and gas engines.

Key words: SiMo ductile iron, Exhaust manifold, Multi-element alloying, Room-temperature strength, High temperature strength

1 前言

汽车发动机排气歧管是将发动机各气缸排出的废气汇集排出车外的重要部件,工作时需承受高温气流的热循环冲击、高温氧化以及环境腐蚀等,因此,要求发动机排气歧管的材料具有良好的

作者简介：金通(1990—),男,博士学位,高级工程师,研究方向为汽车黑色铸造材料开发与应用。

参考文献引用格式：

金通, 蒋路军, 陈旭, 等. 多元合金化SiMo球墨铸铁在汽车发动机排气歧管中的应用研究[J]. 汽车工艺与材料, 2026(2): 1-9.

JIN T, JIANG L J, CHEN X, et al. Research on Application of Multi-Element Alloyed SiMo Ductile Iron in Exhaust Manifolds of Automotive Engine[J]. Automobile Technology & Material, 2026(2): 1-9.

高温强度、热疲劳稳定性、抗氧化性、加工成形性。随着发动机效率和排放标准的不断提高，汽车用排气歧管材质主要经历了普通灰铸铁、高强度灰铸铁、普通球墨铸铁（简称球铁）、蠕墨铸铁、普通不锈钢、SiMo球铁、高镍球铁、耐热不锈钢的发展过程[1]。

近年来，高爆压柴油发动机、天然气发动机和氢/氨发动机是商用车发动机重点关注的技术，商用车发动机的排气温度会越来越高，逐渐达到800 ℃及以上，对排气歧管的耐热性能、耐疲劳性能、抗生长性能和抗氧化性能等提出了更高的要求[2-4]。

本文在综述合金元素对SiMo球铁组织和性能影响的基础上，以800 ℃高温下抗拉强度R_m≥60 MPa为目标，研究多元合金化对SiMo球铁组织和性能的影响，为高爆压柴油发动机和气体发动机排气歧管提供技术支持。

2 排气歧管常用材料

目前，高爆压柴油发动机、天然气发动机和氢/氨发动机的排气歧管材料主要包括高镍奥氏体球铁、不锈钢和SiMo球铁，每种材料都有其独特的优势和应用场景。

2.1 高镍奥氏体球铁

高镍球铁Ni质量分数为13%~36%，当Ni质量分数≥18%时，室温下可获得到奥氏体基体组织，增加了材料的高温稳定性，使其具有良好的高温强度、抗热疲劳性能、抗氧化性能、抗耐蚀性能、抗蠕变性能[5]。高镍球铁900 ℃的短时拉伸断裂强度可达55 MPa，比SiMo球铁800 ℃短时拉伸时高46 MPa。如表1和表2所示来自美国标准ASTM A439-83《Standard Specification for Austentite Ductile Iron Castings》，其中D-5S（标准GB/T 26648—2011《奥氏体铸铁件》中QTANi35Si5Cr2、DIN 1694《Austenitic cast iron》中GGG-NiSiCr35-5-2采用该标准）具有优异的高温力学性能、抗氧化性和相对较低的热膨胀性等特点，可适应800 ℃以上长期高温工作环境，最高工作温度可达950 ℃，是高级轿车排气歧管的首选材料[6]。

但高镍奥氏体球铁铸造工艺性较差，易出现缩孔、浇不足缺陷。此外，材料成本较高，约为SiMo球铁的2倍，且热导率、线膨胀系数等性能也较SiMo球铁更差，在一定程度上限制了高镍奥氏体球铁应用。

表1 高镍球铁的成分（质量分数） %

元素	D-2	D-2B	D-2C	D-3	D-3A	D-4	D-5	D-5B	D-5S
C	3.00	3.00	2.90	2.60	2.60	2.60	2.40	2.40	2.30
Si	1.50~3.00	1.50~3.00	1.00~3.00	1.00~2.80	1.00~2.80	5.00~6.00	1.00~2.80	1.00~2.80	4.90~5.50
Mn	0.70~1.25	0.70~1.25	1.80~2.40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
P	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Ni	18.00~22.00	18.00~22.00	21.00~24.00	28.00~32.00	28.00~32.00	28.00~32.00	34.00~36.00	34.00~36.00	34.00~37.00
Cr	1.75~2.75	2.75~4.00	0.50	2.50~3.50	1.00~1.50	4.50~5.50	0.10	2.00~3.00	1.75~2.25

表2 高镍奥氏体铸铁最低力学性能要求

性能参数	D-2	D-2B	D-2C	D-3	D-3A	D-4	D-5	D-5B	D-5S
R_m/MPa	400	400	400	379	379	414	379	379	449
$R_{p0.2}$/MPa	207	207	193	207	207		207	207	207
A/%	8.0	7.0	20.0	6.0	10.0		20.0	6.0	10.0
硬度/HBW3000	139~202	148~211	121~171	139~202	131~193	202~273	131~185	139~193	131~193

2.2 不锈钢排气歧管

不锈钢和高镍球铁相比具有更高的抗氧化性、抗热蠕变性、耐腐蚀性以及尺寸稳定性，采用不锈钢排气歧管可减轻零件质量30%~50%。目前，排气歧管使用的不锈钢材料主要有奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢。

2.2.1　奥氏体不锈钢

当Cr质量分数18%、Ni质量分数在8%时,基体组织为奥氏体,与铁素体不锈钢相比高温强度和塑性更高,高温下的耐蚀性能更强;当Ni的质量分数>23%、Cr的质量分数>10%时,其最高可使用温度达1 150 ℃,具有较好的抗热冲击和热疲劳性能[7],表3所示为部分奥氏体不锈钢的主要成分及工作温度。

奥氏体不锈钢具有良好的高温强度,但是,在高温下奥氏体的稳定性和抗高温氧化性低于铁素体;而且,奥氏体不锈钢热膨胀系数大,在反复加热和冷却的条件下工作,其氧化层容易脱落而影响排气管的寿命。

表3　部分奥氏体不锈钢的主要成分及工作温度[8]

牌号	材料号	质量分数/%					最高耐热温度/℃
		C	Si	Cr	Ni	其它	
GX40CrNiSi22-9	1.4826	0.30~0.50	1.0~2.5	21~23	9~10		950
GX40CrNiSi25-18	1.4837	0.30~0.50	1.0~2.5	24~26	11~14		1 050
GX40CrNiSi25-20	1.4848	0.30~0.50	1.0~2.5	24~26	19~21		1 100
GX40NiCrSiNb38-18	1.4849	0.30~0.50	1.0~2.5	17~19	36~39	Nb1.2~1.8	1 000
G-NiCr28W	2.4879	0.35~0.50	0.5~2.0	27~30	47~50	W4.0~5.5	1 150

2.2.2　铁素体不锈钢

铁素体不锈钢在高温条件下尺寸稳定、抗氧化能力强、热膨胀系数低。相对于奥氏体不锈钢,铁素体不锈钢含Ni元素少、成本较低。铁素体不锈钢排气歧管材料主要有SUS409、SUS436,为提高高温强度,可以使用Cr含量高的SUS441、SUS444铁素体不锈钢[9]。

Pierre S等[10]对一系列铁素体不锈钢和奥氏体不锈钢的性能进行了对比研究,结果表明,奥氏体不锈钢的高温(750 ℃以上)强度显著高于铁素体不锈钢,但其热导率较铁素体不锈钢差,热膨胀系数高于铁素体不锈钢,在高温下的抗氧化能力与铁素体不锈钢相比较差。

2.3　SiMo球铁

对于高温应用的铁素体球铁,常通过添加Si和Mo改善高温力学性能。Si固溶强化铁素体基体,提高屈服强度和抗拉强度,但Si的质量分数≥5.0%后,塑性显著降低;Si提高共析转变温度(当硅质量分数为4.88%时,Al转变温度提高至900 ℃),可避免因共析转变而引起的相变应力和铸铁生长。Si还可在铸件的表面生成以Si的氧化物为主体的致密氧化膜,提高铸铁的抗氧化性。适宜的Si质量分数为4%~5%。Si的固溶强化作用持续到540 ℃,但高于540 ℃时,高Si球铁的抗拉强度下降。Mo通过形成碳化物而提高球铁的抗拉强度、热疲劳寿命和抗蠕变性能。但为避免脆性和收缩缺陷,Mo的质量分数添加量被限制在≤1.0%,从而最大限度提高对热疲劳的抵抗力[11]。

GB/T 9437—2009《耐热铸铁件》中有2个牌号的SiMo球铁,如表4所示为其化学成分要求。如图1所示为QTRSi4Mo的铸态显微组织,其基体包含铁素体+少量珠光体+少量富Mo碳化物。QTRSi4Mo1室温抗拉强度R_m≥550 MPa,硬度200~240 HBW,700 ℃短时抗拉强度R_m≥101 MPa,800 ℃时R_m≥46 MPa。

表4　耐热铸铁件中SiMo球铁的化学成分(质量分数)%

牌号	C	Si	Mn	P	S	Mo
QTRSi 4Mo	2.7~3.5	3.5~4.5	≤0.5	≤0.07	0.015	0.5~0.9
QTRSi 4Mo1	2.7~3.5	3.5~4.5	≤0.3	≤0.05	0.015	1.0~1.5

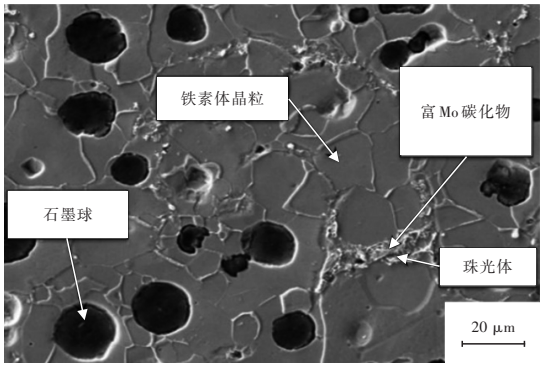


图1　QTRSi4Mo球铁的典型组织

SiMo球铁具有良好的热疲劳性、高温力学性能，良好的高温抗蠕变性能以及优异的抗氧化、生长性，常用于制造高热负荷（≥600 ℃）柴油发动机排气歧管。20世纪90年代，加拿大Wescast工业公司采用SiMo球铁制造排气歧管[12]；雪铁龙公司制造排气歧管的材质有2种，一种为普通铁素体球铁，另一种为SiMo球铁，同时要求工作温度在750 ℃以上时必须采用SiMo球铁[13]。

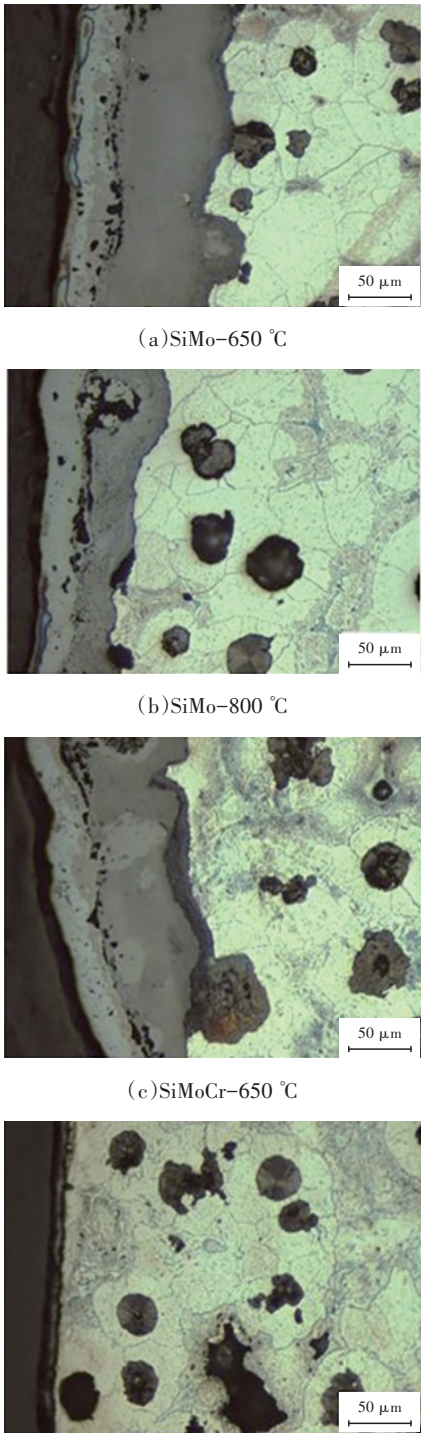
3 SiMo球铁的合金化强化

本世纪初，高爆压发动机和气体发动机快速发展，普通SiMo球铁的排气歧管在使用中出现了大量的变形，甚至产生龟裂及排气外泄现象。然而，SiMo球铁中，过高的Si和Mo含量分别会导致基体脆化和晶间脆化，仅通过增加Si和Mo的含量来提高高温性能非常困难，因此，需要寻找其他能显著提高SiMo球铁高温性能的合金元素，所选择的合金元素应具有通过热稳定相产生固溶强化和析出强化的特性，常用的元素有Cr、Ni、V、Nb、Al等。

3.1 Cr合金化

在SiMo球铁中添加Cr，可促进珠光体，形成合金渗碳体，提高材料的强度，Cr可提高共析转变温度、改善材料的抗热疲劳性并通过形成有效的氧化屏障来提高其抗氧化性。Delprete等[11]研究了Cr对Si-Mo球铁（Fe-2.4C-4.6Si-0.7Mo-1.2Cr）性能的影响，发现该合金在500 ℃时表现出良好的力学性能，其抗拉强度相对于160 ℃时降低了40%，但800 ℃时的强度明显下降；由于Si含量较高，疲劳试验中出现了脆性断裂。乾坤才等[14]的研究结果表明，Cr能显著增加中SiMo球铁的珠光体和碳化物含量，加入0.60%左右质量分数的Cr后，强度比普通中硅钼提高了50 MPa，但伸长率下降了约50%。Lekakh[15]在4.55Si-0.97Mo球铁中添加1.0%质量分数Cr，如图2所示，Cr在基体与氧化膜截面上形成热稳定性更好的氧化膜，抑制了铸铁的脱碳，该铸铁的安全工作温度可达750 ℃。

但过量的Cr会导致珠光体含量增加、材料韧性降低、冷裂和收缩倾向增大等问题。在实际应用过程中，要综合考虑Cr各方面的影响，从而满足排气歧管在高温、复杂工况下的使用要求。



(a)SiMo-650 ℃

(b)SiMo-800 ℃

(c)SiMoCr-650 ℃

(d)SiMoCr-800 ℃

图2 Cr对SiMo球铁氧化的影响[15]

3.2 V合金化

在铸铁凝固过程中，V在奥氏体中的完全溶解导致形成直径小于0.1 μm的VC颗粒。超细VC颗粒会分散在铁素体中，起到沉淀强化的作用；其他

析出的碳化钒颗粒为V_4C_3型,可为渗碳体的成核提供成核位置和驱动力,从而增加珠光体含量,提高基体强度。

Yamauchi R 等[16]对在常规铸铁中添加各种合金元素的试验材料进行评价,并通过优化 V 和 Si 的添加量,发现添加 V 对常规铸铁的高温强度提高极为有效。如图 3 所示为 Si 和 V 含量对 SiMo 球铁延伸率的影响。开发的 V 合金化 SiMo 球铁(C 质量分数为 3.2%~3.4%, Si 为 4.1%~4.4%, Mn≤0.35%, Mo 为 0.45%~0.55%, V 为 0.25%~0.50%)在 200~800 ℃范围内,抗拉强度和屈服强度提高 50%以上,在室温下保持延展性。此外,在排气歧管表面温度超过 880 ℃的苛刻耐久性台架试验中,具有优于高镍奥氏体球铁的热疲劳寿命。开发的 V 合金化 SiMo 球铁替代高镍奥氏体球铁制造高热应力排气歧管,成本降低约 60%。

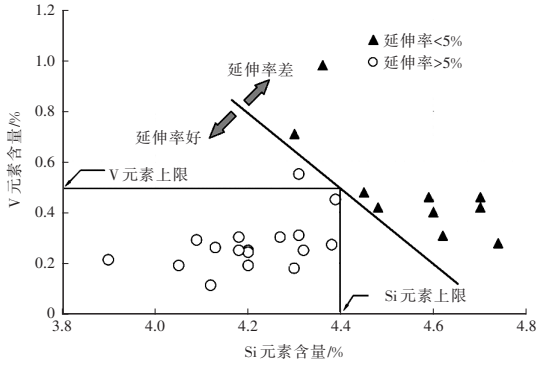


图 3　Si 和 V 含量对 SiMo 球铁延伸率的影响[16]

钱坤才等[14]的研究结果显示,质量分数为 0.5%的 V 合金化 SiMo 球铁的强度比中 SiMo 球铁和 Si-Mo-Cr 球铁提高 10%~15%,延伸率略有增加,获得了高强度、高韧性。韩非等的研究发现,V 元素的添加会削弱 Cr 元素的抗氧化性能。

3.3　Ni 合金化

Ni 是一种在共晶凝固过程中促进石墨化的常用元素,对球铁的韧性和耐热性具有积极作用。此外,Ni 通常以固溶体原子形式存在,与 Fe 的半径比为 1.071,对基体有较好的强化作用。如图 4 所示,郭二军等[17]研究了 Ni 含量对 SiMo 球铁显微组织、力学性能及耐热性能的影响,结果表明:随着 Ni 含量增加,石墨球尺寸有所减小、数量略有增加。Ni 质量分数由 0%增加至 1.9%后,珠光体含量增加 20%。Ni 能够显著提 SiMo 球铁的强度和硬度,但降低其塑性,且不利于耐热性能的提高。

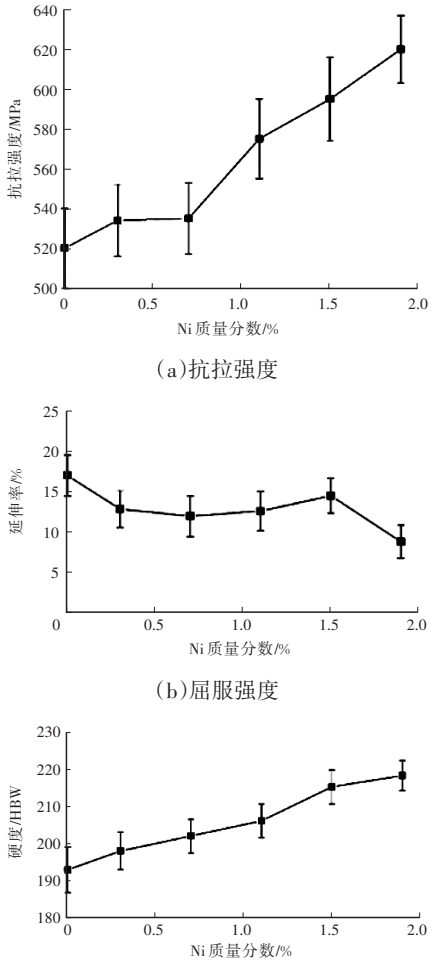


图 4　Ni 含量对 SiMo 球铁力学性能的影响

3.4　Nb 合金化

Nb 对石墨组织影响较小,能够增加珠光体的含量,细化晶粒。Nb 与 C、N 等元素结合形成的 Nb(C·N)化物在基体中弥散分布,这些析出相作为第二相强化质点,能一定程度提升球铁材料的力学性能。在高温环境下,Nb 的固溶强化和析出强化作用能够有效阻碍晶界的迁移和裂纹的扩展,保持材料的组织稳定性,提高材料的抗热疲劳性能。De Magalhaes 等[18]用 Nb 替代部分 Mo,发现在室温或高温下,Nb 的强化效果不如 Mo。如图 5 所示,Yi 等[19]的研究结果表明,Nb 能提高 SiMo 球铁的常温和高温性能,但其强化效果不如 V。Çelik 等[20]开发了新型 SiNb-xAl(x:0%~4%)球铁用作排气歧管材料,新开发的球铁与 Si-Mo 球铁相比具有更高的抗氧化性,可以用作 SiMo

球铁的替代材料。

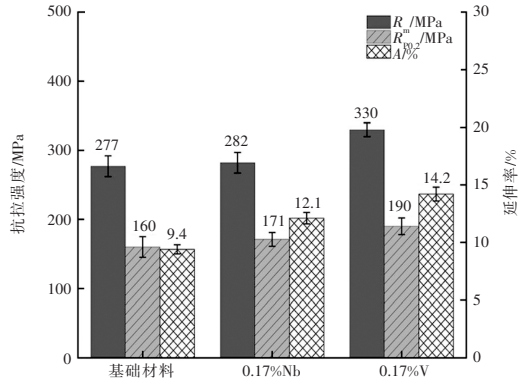
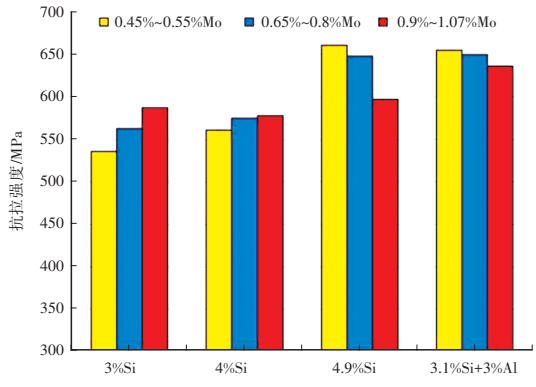


图 5 Nb 和 V 对 SiMo 球铁 550 ℃高温力学性能的影响[19]

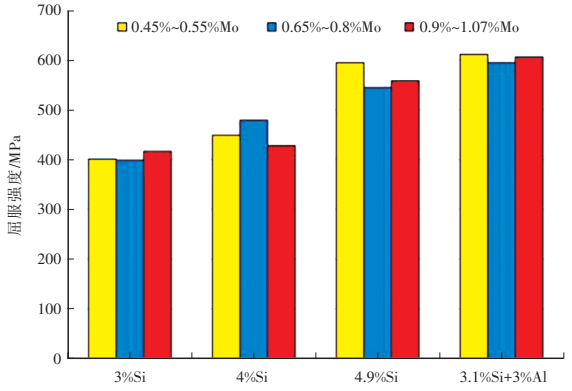
3.5 Al 合金化

Al 的加入会促使耐热球铁形成铁素体组织，并可能减少珠光体的含量，降低珠光体高温分解带来的影响。Al 在高温下易与氧反应，在铸件表面生成致密的氧化铝膜，从而阻止氧的进一步侵入，显著提高 SiMo 球铁的抗氧化性能。Chandra-Ambhorn 等[21]开发出 Al 质量分数为 5.45% 的 SiMo 铸铁，850 ℃条件下在 5%CO_2 + 12%O_2 + 83%N_2 和 10%CO_2 + 12%O_2 + 78%N_2 循环氧化试验中显著优于 SiMo 球铁材料。如图 6 所示，Ibrahim 等[22]研究发现，Al 和 Si 的添加能增加共析转变温度，Al 元素影响石墨球化效果，增 Si 和增 Al 都能提高强度，但会降低延伸率。

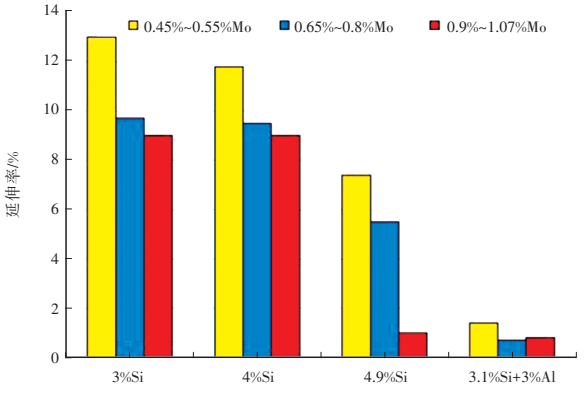
但是，Al 的添加会导致基体组织的硬化和脆化，伸长率随着 Al 含量的增加而逐渐减小。高温环境下，Al 可与其他合金元素形成不良的析出相，这些析出相可能会成为裂纹的源头，影响材料的整体性能。Al 添加到铸铁中还存在石墨漂浮、夹杂冷隔倾向大、缩松倾向大、冷裂倾向大、污染其他炉料等问题。



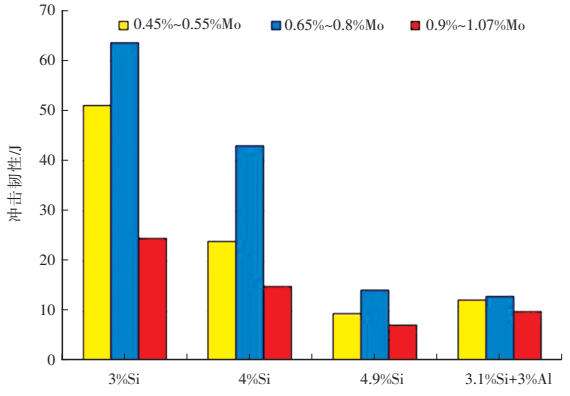
(a)抗拉强度



(b)屈服强度



(c)延伸率



(d)冲击韧性[23]

图 6 Al 和 Si 对 SiMo 球铁力学性能的影响

4 多元合金化 SiMo 球铁的开发

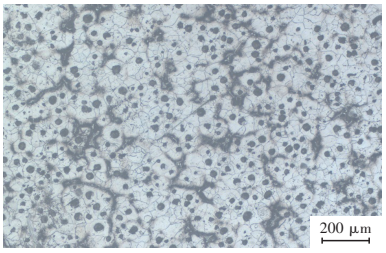
采用定制生铁、废钢和排气歧管回炉料配料，在中频感应电炉中熔炼，采用冲入法球化处理，球化剂为 N6013，硅铁随流孕育，浇注 25 mm Y 型试块，通过组织观察和性能测试，研究了合金元素 Mo、V、Cr、Ni、Nb 等对 SiMo 球铁组织和性能的影响。

4.1 Mo 的影响

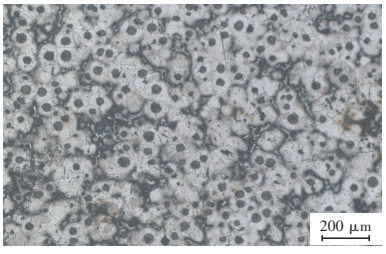
图 7 为不同 Mo 含量 SiMo 球铁的铸态显微组

织,结果显示,SiMo球铁的基体组织由铁素体和共晶团边界的珠光体和碳化物组成,合金元素偏析促进了珠光体和碳化物的形成。对比图7a和图7b可知,Mo质量分数由0.9%提高至1.46%,基体组织中的碳化物数量显著增加,而珠光体的增加不明显。

如表5所示为不同Mo含量SiMo球铁的常温和高温力学性能。由表中的数据可以看出,Mo含量增加,球铁的抗拉强度、屈服强度和硬度升高,而延伸率降低了一半,这是由于Mo含量增加,组织中碳化物数量增加所致。Mo质量分数由0.9%提至1.46%,800 ℃的短时高温强度提高了15%,说明Mo具有显著提高SiMo球铁高温强度的作用。



(a)4.24%Si,0.90%Mo



(b)4.30%Si,1.46%Mo

图7　不同Mo含量SiMo球铁的铸态显微组织

表5　不同Mo含量对SiMo球铁常温和高温力学性能

质量分数/%		室温力学性能				800 ℃抗拉强度 R_m/MPa
Si	Mo	R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	A/%	硬度/HBW5/750/12	
4.24	0.90	625	498	10	222	48
4.30	1.46	635	522	5	235	55

4.2　V的影响

如图8所示为V含量对Mo质量分数0.90%的SiMo球铁常温力学性能的影响。图8结果显示,SiMo球铁的抗拉强度随V量增加而升高,但V质量分数超过0.4%后呈下降趋势。延伸率随V含量的增加而下降,V质量分数超过0.4%后急剧下降。球铁的硬度随V含量增加而增大。

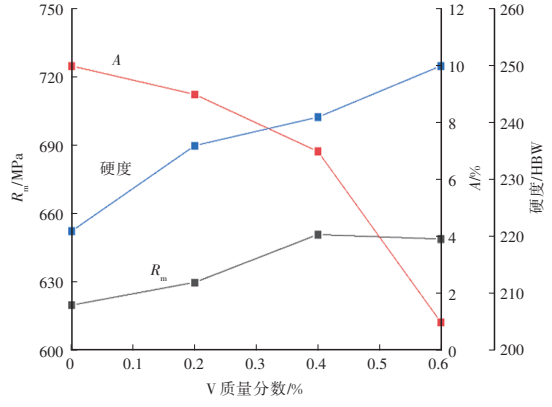


图8　V量对SiMo球铁常温力学性能的影响

图9所示为V对SiMo球铁800 ℃抗拉强度的影响。由图9可知,随着V量增加,SiMo球铁的800 ℃抗拉强度升高,V质量分数超过0.4%后无明显变化。

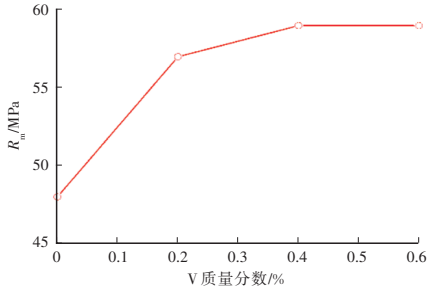


图9　V量对SiMo球铁800 ℃抗拉强度的影响

4.3　多元合金化SiMo球铁

上述试验结果表明,在SiMo球铁中添加0.4%质量分数的V可获得良好的常温和高温性能,但800 ℃的高温抗拉强度仍低于60 MPa,为提高高温强度以满足高爆压柴油机和气体发动机排气歧管的要求,在V合金化的基础上添加Nb、Cr合金元素,研制了多元合金化SiMo球铁。

表6为多元合金化SiMo球铁的高温性能。由表6可知V-Nb合金SiMo球铁的高温抗拉强度为59 MPa,低于目标值60 MPa;而V-Cr合金化和V-Nb-Cr合金化SiMo球铁的高温强度分别为61~62 MPa、63~64 MPa,满足高爆压柴油机和气体发动机对排气歧管的高温抗拉强度要求。

表6 多元合金化SiMo球铁的高温性能

材料组分	R_m/MPa	R_p/MPa	A/%
SiMo + V	56	50	48
	58	52	44
SiMo + V-Nb	59	53	37
	59	52	38
SiMo + V-Cr	61	54	37
	62	55	44
SiMo + V-Nb-Cr	63	55	40
	64	54	38

目前，已试制了DGi13天然气发动机和DDi75、DDi90柴油机排气歧管，将进行台架试验，并根据台架试验结果、并结合微观组织分析，探讨多元合金化对SiMo球铁高温性能的影响机制。

5 结论

a. SiMo球铁中的Mo质量分数由0.9%提高至1.46%时，组织中碳化物数量增加。SiMo球铁的抗拉强度、屈服强度和硬度增加，但延伸率下降了50%。

b. 随着V含量的增加，SiMo球铁的抗拉强度升高、延伸率下降，但V质量分数超过0.4%后强度呈下降趋势、延伸率急剧下降，硬度随V量增加而增大。

c. SiMo球铁的800 ℃短时抗拉强度随V质量分数的增加而增大，V质量分数超过0.4%后无明显变化。

d. V合金化和V-Nb合金化SiMo球铁的高温抗拉强度为56~59 MPa，而V-Cr、V-Nb-Cr合金化SiMo球铁的高温强度为61~64 MPa，满足高爆压柴油发动机和气体发动机排气歧管对SiMo球铁高温抗拉强度的要求。

e. 为应对未来柴油发动机排气温度的持续升高，SiMo球铁材料必须在高温力学性能、抗氧化性及抗热疲劳性能之间实现协同优化。V、Nb、Cr的多元复合添加在提升高温强度方面表现出协同效应，而Si、Cr与Al则通过促进表面形成致密氧化膜，显著增强材料的长期抗氧化能力。后续应系统研究材料在热循环与高温氧化耦合作用下的组织演化规律与性能衰减机制，依据发动机实际服役条件精准调控合金成分与配比，在保障综合性能的同时，有效避免因碳化物过量或基体脆化所引起的韧性及抗热疲劳性能下降。

参考文献：

[1] 王业双. 汽车发动机排气歧管材料、成形及其发展[J]. 铸造技术, 2018, 39(1): 220-225.

[2] 徐向阳, 赵俊玮, 董鹏, 等. 双碳目标下商用车动力传动系统技术特征与展望[J]. 汽车安全与节能学报, 2023, 14(4): 395-412.

[3] YOU J W, LIU Z C, WANG Z S, et al. Experimental Analysis of Inert Gases in EGR on Engine Power and Combustion Characteristics in A Stoichiometric Dual Fuel Heavy-duty Natural Gas Engine Ignited with Diesel[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 180.

[4] YOU J W, LIU Z C, WANG Z S, et al. Impact of Natural Gas Injection Strategies on Combustion and Emissions of A Dual Fuel Natural Gas Engine Ignited with Diesel at Low Loads[J]. Fuel, 2020, 260.

[5] 房敏, 吴小雄, 程圣洋, 等. 高镍奥氏体球铁排气管的生产[J]. 中国铸造装备与技术, 2016(1): 24-28.

[6] 金永锡, 范仲嘉. 高镍奥氏体球墨铸铁涡轮增压器壳体材质及工艺研究[J]. 铸造, 2005, 54(5): 494-500.

[7] NOBUYOSHI S, TORDOFF W L, KAZUYUKI K, et al. Thin-Wall Steel Casting Process for Exhaust Components[C]// International Body Engineering Conference and Exhibition and Automotive and Transportation Technology Conference. SAE International, 2002, 1.

[8] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册-第2卷 铸钢[M]. 第4版. 北京: 机械工业出版社, 2021: 239-240.

[9] 胡光辉, 丁吉民, 左炜晨, 等. 汽车排气系统不锈钢材料的应用[J]. 汽车实用技术, 2017(10):120-122.

[10] SANTACREU P, SAEDLOU S, LAURENT F. Ferritic Stainlesssteel Grade with Improved Durability for High Temperature Exhaust manifold[C]// 10th International Conference on Engines and Vehicles, SAE International, 2011: 1.

[11] DELPRETE C, SESANA R. Experimental Characterization of A Si-Mo-Cr Ductile Cast Iron[J]. Materials and Design, 2014, 57: 528-537.

[12] 张鑫, 李伟, 田雨苗. 耐热铸造合金材料在汽车排气歧管上的应用[J]. 现代铸铁, 2014, 34(1): 62-66.

[13] 郭全领, 吴大春, 庞争群. 铸态耐热球墨铸铁排气歧管

的研发[J]. 金属加工(热加工), 2011(5): 21-25.

[14] 钱坤才, 高顺, 范建华. 铬、钒对中SiMo球铁组织和力学性能的影响[J]. 铸造, 2014, 63(12): 1250-1253.

[15] LEKAKH S N, BOFAH A, CHEN W T, et al. Prevention of High-Temperature Surface Degradation in SiMo Cast Irons by Cr and Al Alloying[J]. Metall Mater Trans B, 2020, 51: 2542-2554.

[16] YAMAUCHI R, SUZUKI N. Development of Vanadium-Added Heat Resistant Cast Iron for Exhaust Manifold[C]// SAE Small Engine Technology Conference.SAE International, 2010: 32-73.

[17] 郭二军, 丛建臣, 孙军, 等. Ni含量对中硅钼球墨铸铁显微组织及性能影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2023, 28(4): 1-7.

[18] DE MAGALHAES M M, LEMOS G V B, FROEHLICH A, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Si-Mo Ductile Cast Irons Alloys with Varied Mo and Nb Contents[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 6301-6308.

[19] YI C, JIANG W, WANG C, et al. Effect of Nb/V Alloying on the Microstructure and Mechanical Properties of SiMo Ductile Iron[J]. International Journal of Metalcasting, 2025, 19(1): 95-108.

[20] ÇELIK G A, ATAPEK S H, POLAT S. Initial Oxidation Stage of SiMo and SiNb-xAl Ductile Cast Irons in Air and CO_2-Containing Atmospheres[J]. International Journal of Metalcasting, 2023, 17(3): 1763-1777.

[21] CHANDRA A S, TUMMAPORN T, JIRADECH P. High Temperature Oxidation of Al-Alloyed SiMo Cast Iron in CO_2-Containing Atmospheres[J]. Advanced Materials Research, 2013, 813: 132-135.

[22] IBRAHIM M M, NOFAL A, MOURAD M M. Microstructure and Hot Oxidation Resistance of SiMo Ductile Cast Irons Containing Si-Mo-Al[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48: 1149-1157.

AT&M