DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3263

铁素体对蠕墨铸铁力学性能和导热性的影响

徐　卓[1],王桂权[1],刘仲礼[1],王明佳[1],陈　祥[2],马　聪[3],王志钦[3]

(1. 烟台大学 核装备与核工程学院,山东 烟台 264005;2. 清华大学 材料学院,北京 100084;3. 烟台美丰机械集团有限公司,山东 烟台 265112)

摘　要:蠕墨铸铁制动盘要求其材料兼具良好的力学性能和导热性以获得高的耐热疲劳和耐磨损性能。本文通过改变蠕墨铸铁中 Sn 和 Mo 元素的含量，研究了铁素体含量及其固溶强化程度对抗拉强度、布氏硬度和导热系数的影响。实验结果表明,Sn 元素显著改变了蠕墨铸铁中铁素体与珠光体的比例,并具有明显的固溶强化效果。Mo 元素同样具有固溶强化效果,但对铁素体含量影响较小。铁素体含量及其固溶强化程度对蠕墨铸铁力学性能和导热性的影响是互为矛盾的关系,因此提高铁素体含量的同时,通过固溶强化可以调控蠕墨铸铁的力学性能和导热性能以实现二者的平衡。

关键词:蠕墨铸铁;铁素体比例;固溶强化;力学性能;导热系数

中图分类号: TG143.5　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1000-8365(2023)12-1124-06

Effects of Ferrite on the Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Vermicular Graphite Cast Iron

XU Zhuo[1], WANG Guiquan[1], LIU Zhongli[1], WANG Mingjia[1], CHEN Xiang[2], MA Cong[3], WANG Zhiqin[3]

(1. School of Nuclear Equipment and Nuclear Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China; 2. School of Materials and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Yantai Mefine Machine Group Co., Ltd., Yantai 265112, China)

Abstract: Vermicular graphite cast iron used in brake discs demands a combination of improved mechanical properties and thermal conductivity to meet the requirements of high thermal fatigue and wear resistance. This study investigates the effects of the content and solution strengthening of ferrite on the tensile strength, Brinell hardness and thermal conductivity of vermicular graphite cast iron by changing the addition of Sn and Mo. The experimental results demonstrate that Sn significantly affects the proportion of pearlite and ferrite and strengthens the matrix of vermicular graphite cast iron. On the other hand, Mo can also strengthen the matrix but has less effect on the ratio of ferrite to pearlite. A contradictory relationship between the effects of ferrite (both its content and solution strengthening) on the mechanical properties and thermal conductivity of vermicular graphite cast iron is found. The results show that the balance of the mechanical and thermal properties of vermicular graphite cast iron can be regulated by increasing and strengthening the ferrite.

Key words: vermicular graphite cast iron; ferrite ratio; solution strengthening; mechanical properties; thermal conductivity

刹车盘依靠摩擦将制动能转化为热能并使之散失至空气中,是汽车制动系统的关键结构件[1]。优异的刹车盘材料应具有高的导热性能以降低温度梯度引起的热应力,以及良好的抗拉强度和硬度以提高耐热疲劳强度和耐磨损性能。对重载车辆而言，随着高负载化发展和盘式制动替代鼓式制动的安全要求，制动盘材料需要在更小的摩擦面积上承受更大的热应力循环载荷，这已趋近传统灰铸铁材料的性能极限。

蠕墨铸铁一直被认为是灰铸铁在耐热/机械疲

收稿日期: 2023-11-03

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME211);烟台市科技创新发展计划(2023ZDX016);2023 年度山东省重点扶持区域引进急需紧缺人才项目

作者简介: 徐　卓,1998 年生,硕士生.研究方向为高导热高耐磨蠕墨铸铁. Email: xuzhuo18505623376@163.com

通讯作者: 王桂权,1985 年生,博士,讲师.研究方向为高性能钢铁合金,多元多相合金凝固过程. Email: wgqly525@163.com

引用格式: 徐卓,王桂权,刘仲礼,等.铁素体对蠕墨铸铁力学性能和导热性的影响[J].铸造技术,2023,44(12): 1124-1129.

XU Z, WANG G Q, LIU Z L, et al. Effects of ferrite on the mechanical properties and thermal conductivity of vermicular graphite cast iron[J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1124-1129.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

劳领域的升级材料[2]，因为粗钝的蠕虫状石墨使蠕墨铸铁具有较灰铸铁更高的强度和韧性[3]。然而蠕虫状石墨也一定程度上降低了材料的导热性能，同时蠕虫状石墨周围的铁素体也对材料的耐磨损性能起到负面影响[4-5]。因此蠕墨铸铁在制动盘中的应用仍存在限制，在获得较高抗拉强度的同时提高蠕墨铸铁的导热性和耐磨损性能是开发高性能蠕墨铸铁制动盘的关键。

蠕墨铸铁的性能主要受蠕化率、铁素体比例以及合金元素的影响[6]。提高蠕化率有利于获得高的导热系数，但会降低材料的抗拉强度[7-9]。相较于层片状珠光体，铁素体具有高的导热性能以及低的强度和显微硬度[10-11]。因此提高铁素体/珠光体比例在提高材料导热系数的同时亦会降低其力学性能[12-13]。通过添加 Cr、Mo 和 V 等固溶强化元素可提高蠕墨铸铁的强度和硬度[14-16]，然而合金元素会导致基体声子和电子散射的增强从而降低基体的导热性能[17]。可见，蠕墨铸铁的力学性能与导热系数具有一定的竞争关系，开发制动盘用蠕墨铸铁材料需定量地分析组织特征对上述性能的影响，并在此基础上进行调控。研究者对蠕墨铸铁中蠕化率和化学成分的影响进行了大量研究[18-20]。根据前人的研究 Sn 是强烈改变蠕墨铸铁中铁素体/珠光体比例的元素[12,19]，而 Mo 是常用的大原子半径元素，可能具有强烈的固溶强化效果。这两种元素配合在一起添加可以获得具有不同含量和显微硬度的铁素体，实现调控蠕墨铸铁力学性能和导热性能的目的。

本文所用合金成分是通过查阅蠕墨铸铁相关文献并在前期进行摸索性实验确定的成分范围。即 Sn 和 Mo 元素含量分别在 0.025%~0.045%、0.25%~0.45%之间，并在此范围内通过改变大原子半径 Sn 和 Mo 元素的含量，制备了具有不同铁素体含量以及不同固溶强化程度的蠕墨铸铁。在保持一定范围蠕化率的前提下，研究了铁素体含量及其固溶强化程度对蠕墨铸铁导热系数、抗拉强度和布氏硬度的影响及其机理，为科学调控蠕墨铸铁导热和力学性能提供了理论基础。

1　实验材料及方法

1.1　实验材料

通过 200 kg 中频炉制备了 5 组具有不同化学成分的蠕墨铸铁试样。熔炼原材料包括生铁和废钢，其中生铁与废钢的比例为 7:3。铁液熔清 10 min 后降温至(1 520±10) ℃出铁。采用“三明治”式蠕化方式。蠕化剂为 FeSiMg6RE6，粒度为 4~25 mm，加入量为 0.43%(质量分数，下同)；孕育剂选用 BrFeSi 孕育剂，粒度为 0.7~3.0 mm，加入量为 0.4%。蠕化结束后于(1 410±10) ℃浇注至标准铸型中(GB/T 26655-2022 附注试块 II 型)，每组成分浇注 3 个试块。5 组试棒的化学成分见表 1，碳当量 CE=C%+(Si%+P%)/3。在保证 5 组试棒碳当量及其他化学成分相似的情况下，S1~S3 主要改变了 Mo 元素的含量，而 S3~S5 主要改变了 Sn 元素的含量。

表1 蠕墨铸铁的成分

Tab.1 Composition of vermicular graphite cast iron

(mass fraction/%)

编号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	Mo	CE
S1	3.57	2.41	0.45	0.033	0.023	0.58	0.035	0.24	4.38
S2	3.60	2.38	0.45	0.039	0.027	0.59	0.036	0.35	4.41
S3	3.54	2.39	0.45	0.043	0.022	0.60	0.037	0.43	4.35
S4	3.49	2.46	0.46	0.043	0.020	0.60	0.025	0.45	4.32
S5	3.57	2.40	0.45	0.044	0.022	0.59	0.044	0.44	4.38

1.2　实验方法

蠕墨铸铁试块按照 GB/T 26655-2022《蠕墨铸铁件》要求，加工成拉伸试样，试样的标距为 70 mm，拉伸段直径为 14 mm。依据 GB/T 228.1-2021《金属材料拉伸试验》，使用电子式万能材料试验机对试样进行拉伸试验，以 3 次实验的平均值为最终抗拉强度。拉伸实验结束后取断裂余样，利用钨灯丝扫描电子显微镜(TESCAN VEGA)观察断口形貌，并用 HB-3000 型硬度计测试布氏硬度。然后制备直径 12.5 mm，厚度 2.1 mm，圆盘形试样，并采用耐驰激光导热仪 LFA 467 测试室温下的导热系数。圆盘试样被重新研磨抛光后采用光学显微镜观察其金相组织，基体组织通过浓度为 4%硝酸酒精溶液腐蚀后获得。材料的蠕化率依据 GB/T 26656-2023《蠕墨铸铁金相检验》，并借助 Image pro plus 软件测定。铁素体含量为铁素体占基体(珠光体+铁素体)的面积比。各组织特征的定量分析皆取 10 个视野的平均值。

2　实验结果与分析

2.1　蠕墨铸铁的组织特征

图 1 为 S1~S5 试样腐蚀前的典型金相组织。各试样石墨含量及蠕化率的平均值见表 2。可见，通过控制碳当量和蠕化工艺，S1~S5 试样获得了相似石墨含量和蠕化率，其性能差别主要由基体的特征决定。

图 2 为 S1~S5 试样腐蚀后的典型金相组织。基体主要由珠光体和铁素体组成，未见明显磷共晶和碳化物存在。因此，将铁素体的含量定义为铁素体与基体(铁素体+珠光体)的面积比，各试样的铁素体含量及其显微硬度平均值见表 2。可见 S1~S3 中铁素

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

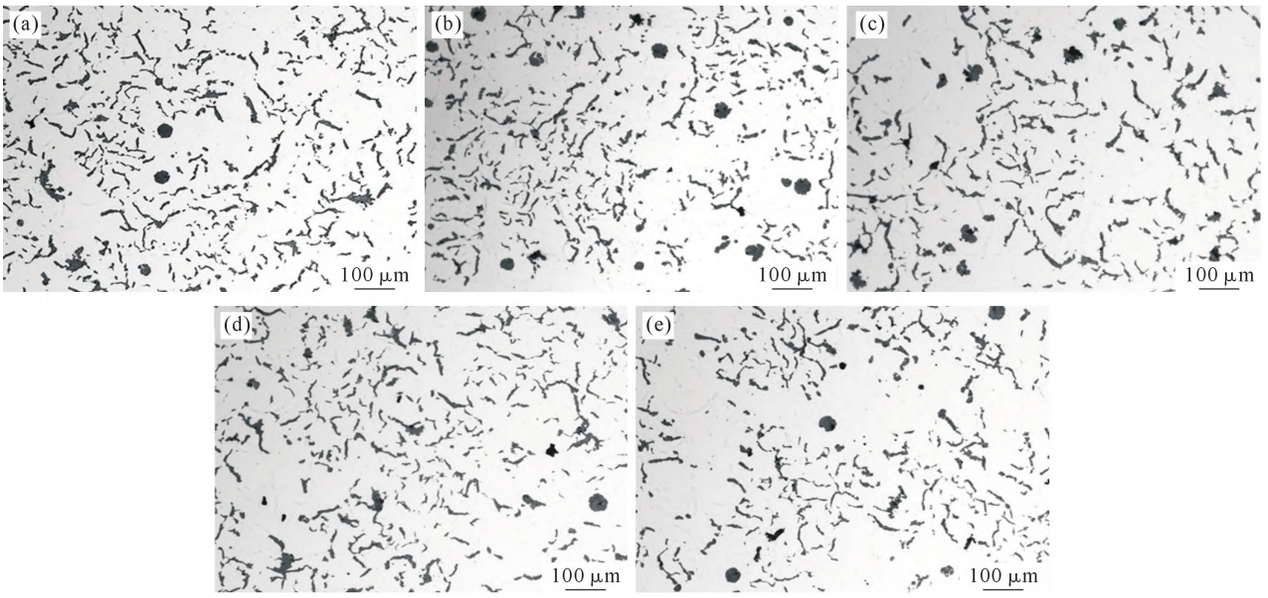

图 1 蠕墨铸铁腐蚀前的典型金相组织:(a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5

Fig.1 Typical metallographic structure of vermicular graphite cast iron before corrosion: (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5

表2 蠕墨铸铁的性能

Tab.2 Properties of vermicular graphite cast iron

编号	石墨含量/%	蠕化率/%	铁素体含量/%	抗拉强度/MPa	布氏硬度(HBW)	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	铁素体显微硬度(HV)
S1	9.6±0.5	86.8±2.4	54.8±1.4	400.0±2.4	181.0±2.2	36.6±0.2	177.7±11.8
S2	9.4±0.3	87.9±1.3	52.9±3.4	405.0±4.1	184.0±1.8	36.0±0.1	188.2±10.0
S3	9.3±0.4	87.7±1.9	51.9±2.1	415.0±2.4	188.0±2.4	34.9±0.1	206.7±16.2
S4	9.7±0.3	88.0±1.1	59.1±2.8	390.0±4.1	173.8±1.7	37.8±0.9	178.0±13.0
S5	9.1±0.2	81.4±3.7	31.8±2.3	470.0±5.8	216.0±1.8	33.2±0.5	227.2±11.9

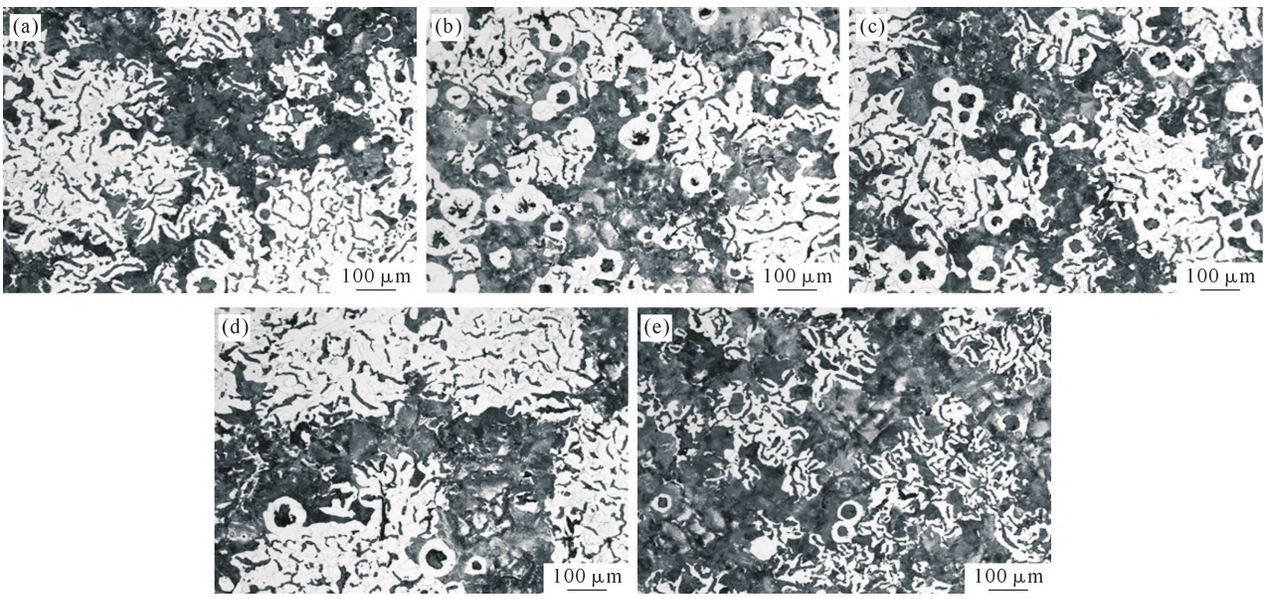

图 2 蠕墨铸铁腐蚀后的典型金相组织:(a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5

Fig.2 Typical metallographic structure of vermicular graphite cast iron after corrosion: (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5

体含量的差别不大，但其显微硬度随 Mo 含量增加而提高,这说明 Mo 元素对基体组成的影响较小,主要起到固溶强化的作用。而 S3~S5 中铁素体含量及其显微硬度的差异显著,Sn 元素增加强烈地降低了铁素体/珠光体比例,且具有固溶强化基体的作用。

2.2 铁素体含量对蠕墨铸铁力学性能和导热系数的影响

5 组试样的抗拉强度、布氏硬度及其室温导热系数列于表 2。如图 3 所示,S3~S5 数据表明了铁素体含量对蠕墨铸铁性能的影响，随着铁素体含量

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的增加，蠕墨铸铁的布氏硬度和抗拉强度降低。当铁素体含量从31.8%增加到59.1%时，布氏硬度从216 HBW降低到174 HBW，抗拉强度从470 MPa降低到390 MPa。另外，铁素体含量增多使得蠕墨铸铁的导热系数显著增加，铁素体含量从31.8%增加到59.1%时，导热系数从33.2 W/(m·K) 增加到37.8 W/(m·K)。蠕墨铸铁中铁素体含量对力学性能和导热系数呈互为矛盾的影响，且Sn元素对基体的固溶强化并不改变整体趋势。

2.3　固溶强化对蠕墨铸铁力学性能和导热系数的影响

根据表2可知，随着Sn和Mo含量的增加，铁素体的显微硬度呈上升趋势，二者都起到固溶强化基体的作用。图4为S1~S5拉伸试样的断口形貌。由图可知，5组试样的断口皆具有撕裂棱、韧窝、河流花样等特征。对比S1~S3与S3~S5可知，Sn和Mo元素均使河流花样的数量增加，韧窝的数量减少，但与Mo元素相比，Sn元素影响较大。从表1~2及图5中S1~S3数据可知，当Sn含量为0.035%左右且Mo含量在0.24%~0.43%范围内，铁素体含量相似时，每增加0.1%Mo含量，铁素体显微硬度约提高15.3 HV，布氏硬度和抗拉强度相应提高3.7 HBW和7.9 MPa，导热系数降低0.9 W/(m·K)。表1~2及图5中S3~S5数据表明，当Mo含量相同且Sn含量在0.025%~0.044%时，每增加0.01%Sn含量铁素体显微硬度约提高25.9 HV，布氏硬度和抗拉强度相应提高22.2 HBW和42.1 MPa，导热系数降低2.4 W/(m·K)。可见，基体固溶强化程度对蠕墨铸铁的力学性能和导热系数亦呈互为矛盾的影响。且从图5中虚线和实线的趋势可知，尽管Sn和Mo元素的原子半径相差不大，Sn元素变化对蠕墨铸铁力学性能和导热系数的影响程度要比Mo元素对影响更加强烈。这可能是由于Sn元素不仅起到了固溶强化作用，还会偏聚在石墨颗粒周围从而影响基体中铁素体与珠光体的比例[21]。

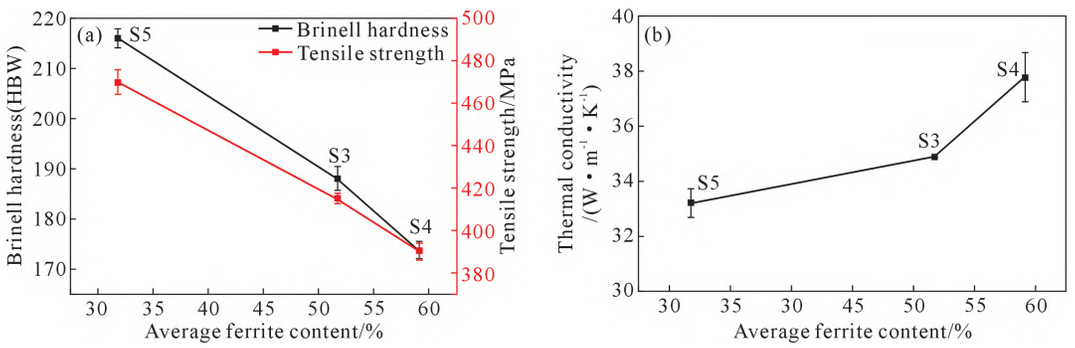

图3　铁素体含量对蠕墨铸铁性能的影响：(a) 布氏硬度与抗拉强度，(b) 导热系数

Fig.3　Effect of ferrite content on the properties of vermicular graphite cast iron: (a) Brinell hardness and tensile strength, (b) thermal conductivity

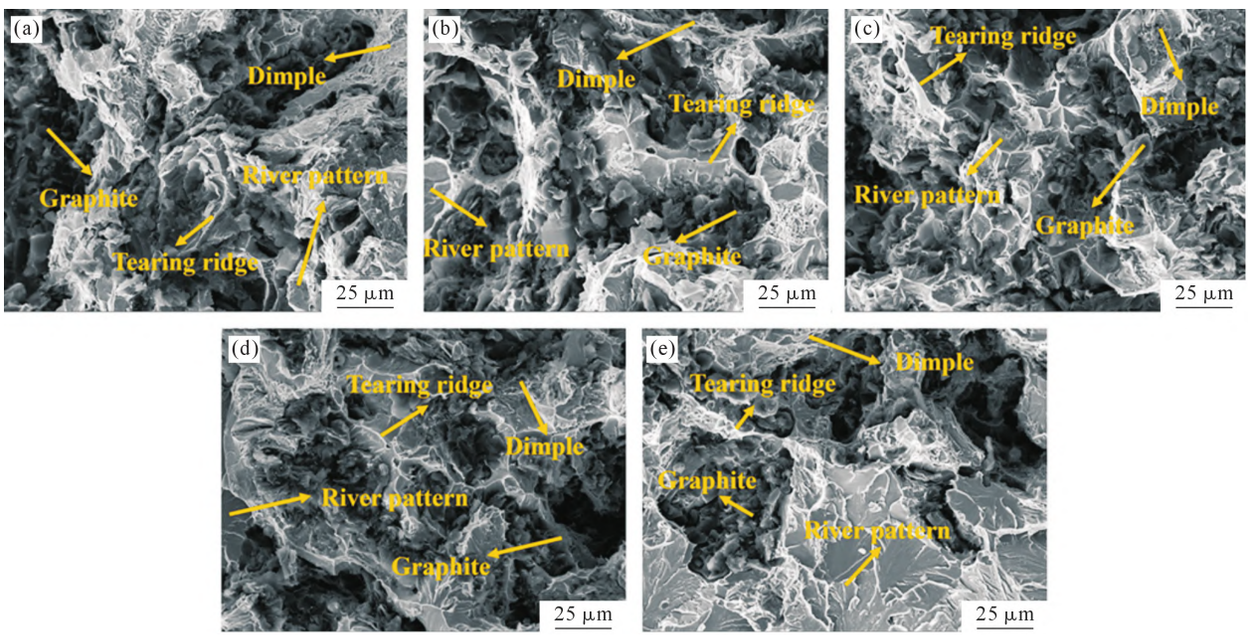

图4　蠕墨铸铁拉伸试样的断口形貌：(a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5

Fig.4　Fracture morphology of the tensile specimen in vermicular graphite cast iron: (a)S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

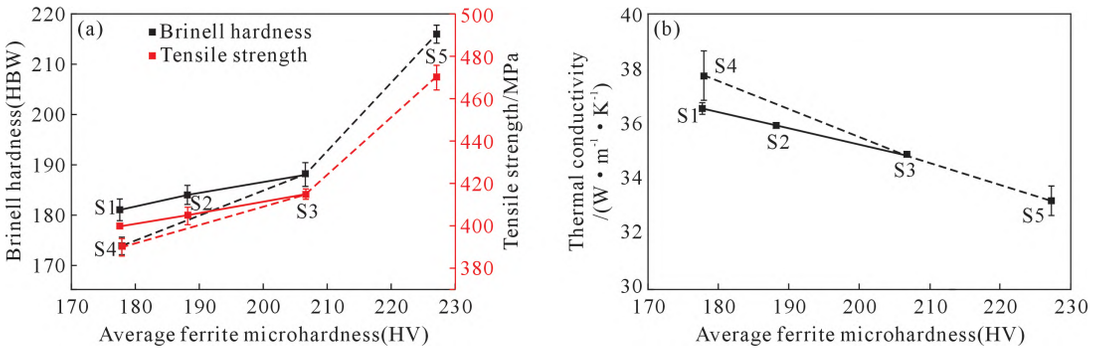

图 5 固溶强化对蠕墨铸铁性能的影响:(a) 布氏硬度与抗拉强度,(b) 导热系数

Fig.5 Effect of solution strengthening on the properties of vermicular graphite cast iron: (a) Brinell hardness and tensile strength, (b) thermal conductivity

综上所述,蠕墨铸铁铁素体含量及其固溶强化程度对力学性能和导热系数的影响皆互为矛盾。提高铁素体含量会提高材料的导热系数,但会导致抗拉强度和布氏硬度的降低。通过固溶强化基体会降低材料的导热系数,而同时会提高其抗拉强度和布氏硬度。通过调控 Sn 和 Mo 元素的含量,可在提高铁素体含量的同时固溶强化基体,并获得兼具较高导热系数和良好力学性能的蠕墨铸铁材料,其导热系数趋近传统灰铸铁制动盘材料,并且抗拉强度是其 1.5 倍以上, 对于两者之间的热疲劳及摩擦磨损的对比会在后续研究中通过制动盘台架试验来进行检验。

3 结论

(1)铁素体含量及其固溶强化程度对蠕墨铸铁抗拉强度、布氏硬度和导热系数的影响呈互为矛盾关系,且铁素体含量的影响程度更加显著。

(2)Mo 元素对蠕墨铸铁基体中铁素体含量的影响较小,其主要起到固溶强化基体的作用。当 Sn 含量为 0.035%左右且 Mo 含量在 0.24%~0.43%范围内,每提高 0.1%Mo 含量,蠕墨铸铁的抗拉强度提高 7.9 MPa,布氏硬度提高 3.7 HBW,而导热系数降低约 0.9 W/(m·K)。

(3)Sn 元素既可以改变蠕墨铸铁中铁素体含量,也可以起到固溶强化基体的作用。当 Mo 含量为 0.35%左右且 Sn 含量在 0.025%~0.044%范围内,每提高 0.01%Sn 含量, 蠕墨铸铁的抗拉强度提高 42.1 MPa,布氏硬度提高 22.2 HBW,而导热系数降低约 2.4 W/(m·K)。

参考文献:

[1] 谢庆智,夏凌涛,盛龙海. 钼锑合金化球墨铸铁在重型卡车刹车盘中的应用[J]. 铸造设备与工艺,2016(3): 41-43.
XIE Q Z, XIA L T, SHENG L H. Application of molybdenum-antimony alloyed ductile iron in brake discs for heavy-duty trucks[J]. Foundry Equipment and Technology, 2016(3): 41-43.

[2] XU D M, WANG G Q, CHEN X, et al. Effects of alloy elements on ductility and thermal conductivity of compacted graphite iron[J]. China Foundry, 2018, 15: 189-195.

[3] 郝博魁,邓小洲,蔡启舟,等. 稀土与镁含量对蠕墨铸铁凝固过程及石墨形态的影响[J]. 铸造技术,2022, 43(1): 14-18.
HAO B K, DENG X Z, CAI Q Z, et al. Effect of rare earth and magnesium contents on the solidification process and graphite morphology of vermicular graphite cast iron[J]. Foundry Technology, 2022, 43(1): 14-18.

[4] 陈贻亮. 钼对铸铁制动鼓微观组织及高温抗拉强度的影响[D]. 武汉:武汉科技大学,2022.
CHEN Y L. Effect of molybdenum on microstruc ture and high temperature tensile strength of cast iron brake drum[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2022.

[5] DING X, HUANG H, MATTHIAS W, et al. Development of high performance cast iron with combination of improved mechanical and thermal properties through Mo addition[J]. Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 2018, 49: 3173-3177.

[6] 崔忠圻,覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,1989.
CUI Z Q, QIN Y C. Metallurgy & Heat Treatment[M]. Beijing: China Machine Press, 1989.

[7] MA Z J, TAO D, YANG Z, et al. The effect of vermicularity on the thermal conductivity of vermicular graphite cast iron [J]. Materials & Design, 2016, 93: 418-422.

[8] 任桂香,晏德志,江在坤,等. 蠕化率对蠕墨铸铁热疲劳性能的影响[J]. 现代铸铁,2022, 42(4): 61-64.
REN G X, YAN D Z, JIANG Z K, et al. Influence of vermicularity on thermal fatigue property of vermicular graphite cast iron[J]. Modern Cast Iron, 2022, 42(4): 61-64.

[9] HOLMGREN D, DIÓSZEGI A, SVENSSON I L. Effects of nodularity on thermal conductivity of cast iron[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2007, 20(1): 30-40.

[10] 纪汉成, 吴启洪. CNG 发动机用耐热疲劳高硅蠕墨铸铁材料研究[J]. 铸造技术,2021, 42(11): 952-957.
JI H C, WU Q H. Research on high Si heat resistant vermicular graphite cast iron material for CNG engine[J]. Foundry Technology, 2021, 42(11): 952-957.

[11] KÖNIG M. Literature review of microstructure formation in com-

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

pacted graphite iron [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2010, 23(3): 185-192.

[12] 郑冰，任凤章，李锋军，等. Sn 对蠕墨铸铁显微组织和切削加工性能的影响[J]. 铸造，2016, 65(2): 137-140.
ZHENG B, REN F Z, LI F J, et al. Effect of Sn on the microstructure and machinability of vermicular graphite cast iron[J]. Foundry, 2016, 65(2): 137-140.

[13] XU D M, WANG G Q, CHEN X, et al. Effects of Mo and Ni on the thermal conductivity of compacted graphite iron at elevated temperature[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2019, 32(5-6): 243-251.

[14] 杨忠，杨喜岗，赵玉厚，等. 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.
YANG Z, YANG X G, ZHAO Y H, et al. Effect of Cr, Mo and Cu ternary alloying on microstructure and mechanical properties of vermicular graphite cast iron [J]. Foundry Technology, 2015, 36 (6): 1518-1521.

[15] 王峰，班云峰. 蠕墨铸铁的性能特点和生产控制[J]. 现代铸铁，2020, 40(2): 19-24.
WANG F, BAN Y F. Property characteristics and production control of vermicular graphite cast iron[J]. Modern Cast Iron, 2020, 40 (2): 19-24.

[16] 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.
LI H J, HONG G Z, YANG Z Y. Mechanical properties of V-Ti vermicular graphite cast iron [J]. Foundry, 2010, 59(10): 1076-1079.

[17] WANG G H, LI Y X. Thermal conductivity of cast iron-A review [J]. China Foundry, 2020, 17: 85-95.

[18] 万浩，金琦，赵振江，等. 蠕化率对蠕墨铸铁组织和耐磨性能的影响研究[J]. 稀土，2021, 42(5): 112-118.
WAN H, JIN Q, ZHAO Z J, et al. Study on the effect of vermicularity on microstructure and wear resistance of vermicular graphite cast iron[J]. Journal of Rare Earths, 2021, 42(5): 112-118.

[19] 赵靖宇，吕烨哲，孙玉福，等. 锡对蠕墨铸铁显微组织和力学性能的影响[J]. 铸造，2013, 62(10): 948-952.
ZHAO J Y, LV Y Z, SUN Y F, et al. Effect of Sn on microstructure and mechanical properties of vermicular graphite cast iron [J]. Foundry, 2013, 62(10): 948-952.

[20] SELIN M, HOLMGREN D, SVENSSON I L. Influence of alloying additions on microstructure and thermal properties in compact graphite irons [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2009, 22(1-4): 283-285.

[21] 郝石坚. 现代铸铁学[M]. 北京：冶金工业出版社，2009.
HAO S J. Modern iron casting[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net