DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.2317

低合金化铁素体耐热球墨铸铁的合金元素设计

刘志勇[1,2],吕士贵[3]

(1. 山东宇信铸业有限公司,山东 潍坊 262506; 2. 菏泽学院 机电工程学院,山东 菏泽 274015; 3. 山东日发纺织机械有限公司,山东 聊城 252000)

摘　要:本文从铁素体耐热球墨铸铁的抗氧化、抗生长、抗疲劳能力以及促进铁素体的形成和石墨球化方面研究了铁素体耐热球墨铸铁的主要合金元素种类及其使用范围。结合铁素体耐热球墨铸铁制备工艺,进一步对各合金元素在铁素体耐热球墨铸铁中的作用、合金元素间的匹配机理以及合金元素匹配用量进行分析。最终得到了合金成分(质量分数,%)为 3.6 C,3.9 Si,3.0 Al,1.5 Cr,0.8 Mo,0.6 Ni的高性能低合金化铁素体耐热球墨铸铁。

关键词:铁素体;耐热球墨铸铁;合金元素;低合金化

中图分类号:TG143.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)09-0867-06

Alloying Element Design of Low Alloying Ferrite Heat Resistant Ductile Cast Iron

LIU Zhiyong[1,2], LYU Shigui[3]

(1.Shandong Yuxin Csating Co., Ltd., Weifang 262506, China; 2. School of mechanical and electrical engineering, Heze University, Heze 274015, China; 3. Shandong RIFA Textile Machinery Ltd., Liaocheng 252000, China)

Abstract: In this paper, the types and contents of the alloying elements in ferrite heat-resistant ductile cast iron were studied from the aspects of oxidation resistance, growth resistance, fatigue resistance, ferrite formation promotion and graphite spheroidization. The role of alloying elements and their matching content and matching mechanism were further systematically analysed in combination with the preparation process of ferrite heat resistant ductile iron. Finally, the alloying element design (mass fraction, %): 3.6 C, 3.9 Si, 3.0 Al, 1.5 Cr, 0.8 Mo, 0.6 Ni of the ferrite heat resistant ductile iron with excellent mechanical properties and low alloying was obtained.

Key words: ferrite; heat resistant ductile iron; alloying element; low alloying

耐热铸铁在高温下具有抗氧化、抗生长且保持一定强度的特性,多用于汽车排气歧管、退火罐和高炉附件等耐高温场合。随着工业的快速发展和工业门类的丰富,对耐热铸铁的耐热温度、高温强度、耐热疲劳和抗生长性等性能要求提高,常用的硅系和铝系耐热球墨铸铁不能满足上述需求[1-3]。高铬等高合金耐热铸铁得到发展,但对合金的消耗量较大且生产成本高。因此,亟需研究低合金化、高性价比的耐热铸铁。

目前常用耐热铸铁中通常含有铬、硅、铝和钼等合金元素,这些合金元素在耐热铸铁表面形成氧化膜,阻止氧化气氛渗入耐热铸铁内部增强其抗氧化性和抗生长性。一般来讲,上述元素的合金化程度越高,铸铁的抗氧化性、抗生长性和高温强度越好,如铝铬耐热铸铁[4]和硅钼耐热铸铁[5],但高合金化也会显著增加生产成本。因此合理使用合金元素获得高性价比的耐热铸铁得到广泛关注和研究[6-7]。本文基于耐热铸铁特性从促进铁素体形成、增强抗高温氧化、抗生长性和抗拉强度角度设计低合金化铁素体耐热球墨铸铁的合金元素,并利用 JMatPro 软件对其高温相变和性能变化进行模拟计算分析。

1　铁素体耐热球墨铸铁的主合金元素设计

耐热铸铁的高温氧化和体积增长与其显微组织密切相关,显微组织由合金成分和制备工艺共同决

收稿日期:2022-10-30

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2021ME060);潍坊市科技发展计划(2022ZJ1216)

作者简介:刘志勇,1984 年生,博士,副教授.研究方向为金属凝固科学与技术等.Email: yyaffe@126.com

引用格式:刘志勇,吕士贵.低合金化铁素体耐热球墨铸铁的合金元素设计[J].铸造技术,2023,44(9):867-872.

LIU Z Y, LYU S G. Alloying element design of low alloying ferrite heat resistant ductile cast iron[J]. Foundry Technology, 2023, 44(9): 867-872.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

定，本文基于铁素体球墨铸铁制备工艺设计合金元素从而调控显微组织并获得高性能铁素体耐热球墨铸铁。

1.1 抗氧化主合金元素设计

耐热铸铁中合金元素在其表面形成氧化膜的性质、厚度及其活性决定铁离子与氧化气氛结合发生氧化的程度。氧化膜的性质包括氧化膜覆盖氧化表面的能力和致密度，通常用 P-B 比 γ 表示，如式(1)所示[2]。

$$\gamma=\frac{V_{MO}}{V_M}=\frac{\frac{M}{n\rho_1}}{\frac{A}{\rho_2}}=\frac{M\rho_2}{n\rho_1 A} \tag{1}$$

式中，M 为氧化物相对分子质量；ρ_1 和 ρ_2 分别为氧化物和合金元素密度；n 为氧化物中合金元素的原子数；A 为合金元素的相对原子质量。当 γ>1 时表示氧化膜可完全覆盖氧化表面。

由式(1)可知，当 γ>1 时才可能使耐热铸铁具有抗高温氧化能力，但 γ>1 仅为必要条件，氧化膜的导电性也是必要条件之一。氧化膜为非理想离子晶体，其中存在大量的晶格缺陷和杂质，氧化膜中的离子易发生迁移并具有导电性，离子扩散越剧烈导电性越好。氧化膜仅减缓铸铁氧化，其氧化进程受铁离子扩散速度影响。此外，合金元素与氧化气氛结合的活性及结合力应大于铁元素，且合金氧化膜能单独存在于铸铁表面，否则会导致氧化持续。查表可知，满足上述条件的合金元素为铬、铝和硅。铬在铸铁表面与氧结合形成的氧化膜具有较强的抗剥落能力，但铬易在晶界处形成碳化铬导致晶界贫铬，使铬氧化膜失去连续性，抗高温氧化能力降低。铝与氧在铸铁表面形成的氧化膜在 1 200~1 300 ℃时仍保持较高的组织致密性和成分稳定性。铝氧化膜与铬氧化膜相比，前者的热稳定性高、连续性好，而后者与铸铁表面的结合能力强、抗剥落能力强，二者可通过相互依附提高铸铁的抗高温氧化[4]。硅也可与氧在铸铁表面形成高温稳定的氧化膜，同时增加铬氧化膜的致密度和抑制铬氧化膜的剥落[8]。由此可见，铬、铝和硅在铸铁表面形成的氧化膜可相互补充增强。此外，钼氧化膜也可抗高温氧化[9]。尽管钼氧化膜的 P-B 比小于 1，但在铸铁表面不宜剥落，氧化膜层间的交叉叠加可减缓铁离子扩散或氧离子侵入，因此也可将钼设计为抗高温氧化元素。

1.2 抗生长主合金元素设计

铸铁生长是其内部发生不可逆的体积增加，导致其内应力增加、形状尺寸变化，这与铸铁的氧化和相变密切相关，可通过铸铁合金化阻止氧化气氛侵入基体，同时降低相变发生比例。铸铁在低于相变温度和相变温度附近的相变均会导致铸铁生长。在 400~600 ℃时，珠光体转变为铁素体和渗碳体，渗碳体进一步分解为铁素体和石墨。研究表明，碳化物转为石墨所导致的体积膨胀系数约为 2.4[2]，石墨析出最终导致铸铁生长。珠光体为亚稳相，温度越高珠光体分解速度越快，分解量越大，铸铁生长越严重。从低温生长角度而言，应避免或减少促进珠光体形成合金元素的设计，同时设计促进铁素体形成和稳定珠光体合金元素。在相变温度附近时，铁素体与奥氏体间发生循环相变，石墨周期性固溶和析出。石墨固溶至奥氏体后期原有位置形成微孔或在石墨与基体间形成间隙，而奥氏体中碳原子形核析出石墨时重新进入微孔或间隙的可能性极小。铁素体与奥氏体循环转变后在铸铁中形成大量孔洞或间隙，同时石墨膨胀量不断累积，最终导致铸铁剧烈生长。减小耐热铸铁在相变温度附近的生长可从提高耐热铸铁的相变温度、增加石墨球数和减小石墨球尺寸等方面设计合金元素。

从上述铸铁生长机理分析，提高铁素体比例、稳定珠光体和改善石墨特征分布可提高铸铁的抗生长。铜、锡、锰和钒等元素促进珠光体的形成，铬、钼、锰和钒可形成碳化物稳定珠光体，镍扩大奥氏体区也可稳定珠光体[10]。硅和铝等元素可促进石墨化、改善石墨特征分布和促进铁素体形成，且铝元素可缩小奥氏体区稳定铁素体，同时抑制碳化物析出和珠光体形成。此外，铬可缩小奥氏体区提高相变温度。因此，铁素体耐热球墨铸铁的合金元素设计应考虑铬、铝、硅、镍、钼、锰和钒的设计与匹配。

1.3 提高强度主合金元素设计

铁素体耐热球墨铸铁的强度随铁素体比例增加而降低，需设计强化铁素体基体和改善石墨特征分布的合金元素。硅原子与铁原子的结合力大于碳原子，硅原子和碳原子结合一方面释放一部分碳原子进入铁液，同时抑制渗碳体析出；另一方面使共晶温度升高，共晶点碳含量下降，又使一部分碳原子进入铁液。上述进入铁液的碳原子形核成长为石墨，石墨球数量增加[11]。铝缩小奥氏体区也可促进石墨化，增加石墨球数量，但铝干扰石墨球化形成畸形石墨。石墨球数量的增加可显著提高铁素体比例且对强度影响不大，而减小石墨球尺寸可显著提高强度[12]。此外，硅固溶于铁素体形成置换固溶体，且硅的原子半径小，硅铁固溶体存在晶格畸变，不利于位错迁移从而提高铁素体基体强度，但硅固溶度过大时，严重的晶格畸变反会降低其强度[13]。铝可细化铁素体也可

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

与铁素体形成固溶体,晶粒细化和固溶强化均提高铁素体基体的强度[14]。铬元素可通过固溶强化和弥散强化提高铁素体基体强度。铬与铁素体形成固溶体且铬原子半径大,铬铁固溶体的晶格畸变阻碍位错迁移,同时铬碳化物弥散分布在铁素体基体中钉扎位错,二者均提高基体强度。

除硅、铝和铬外,钼、镍和钒也可提高铁素体基体强度。钼可细化石墨、抑制渗碳体聚集、与铁素体形成固溶体以及与碳形成弥散分布碳化物[15]。镍可细化铁素晶粒,同时促进石墨化,增加石墨数量,且在铁素体中可无限固溶[16]。钒可细化石墨和铁素体晶粒还可在基体中形成弥散分布的细小碳化物,但其含量大于0.3%时显著增加珠光体,同时铸铁的抗氧化性和抗生长性降低[17]。

综上所述,从促进铁素体基体形成,提高抗高温氧化、抗生长和强度角度综合分析,可设计硅、铝、铬、钼和镍元素作为铁素体耐热球墨铸铁的主合金元素。

2　主合金元素配比成分设计

合金元素在铁素体耐热球墨铸铁制备过程中所起的作用与其配比及添加量有关,有些合金元素除具有正向作用外还有负面作用,甚至有些合金元素添加量不当还会起反作用,需对合金元素成分配比进行设计。

球墨铸铁的缩松缩孔、石墨特征分布及显微组织主要受碳和硅含量及其比例影响,通常用碳当量(CE)和硅碳比(Si/C)表征碳和硅的配比添加量。铁液的碳当量在共晶成分附近时,铸造性能优异,大量凝固组织在共晶点形成并释放结晶潜热,减小铁液过冷倾向,且共晶组织表面光滑,充型阻力小。但是,碳当量会影响铁液的实际共晶温度,高碳当量使共晶点左移,促进石墨化,增加石墨球数,缩短碳原子扩散距离,渗碳体和珠光体减少,铁素体增加,反之则相反[18]。碳当量过高时易导致石墨漂浮,过低时铁液过冷倾向增大,石墨球数减小易造成铸铁缩松。

碳和硅在铁液中均可脱氧,减少氧对球化剂的消耗。其中硅脱氧温度范围大,脱氧能力强。高硅碳比可减少氧对碳的损耗,保持铸铁中石墨球数和尺寸,但硅的石墨化作用超过临界值后发生石墨漂浮。此外,高硅碳比提高相变温度,碳在奥氏体中的溶解度下降促使奥氏体向铁素体转变,低硅碳比使碳在铁液中脱氧明显,碳损耗增加。同时,硅的石墨化作用减弱,铸铁的石墨球数减少并且尺寸增大,珠光体比例增加。碳当量为4.5%~5%且硅碳比在0.45~1.10范围内变化时,铸铁强度先升高后降低,在碳当量大于4.4%且硅碳比为0.7~1.0时铸铁具有高塑性[19]。硅含量为4%左右时,添加钼可以提高铸铁的高温强度[9],且硅含量为3.8%~4.5%时可获得单相铁素体球墨铸铁,硅元素含量大于4.5%时表现出脆性,且出现碎块石墨[20]。综上分析,碳当量取为4.9%,其中硅含量为3.9%,碳含量为3.6%。

铝、铬、钼和镍在铸铁中的作用随含量变化而变化,设计铝元素以提高铸铁抗氧化、促进铁素体基体形成,稳定和强化铁素体。研究表明,铝含量小于3.4%时铸铁的抗氧化性随铝增加而增强,抗拉强度随铝含量在2%~3.2%内增加而提高[21]。铝对石墨的球化干扰可采用含铈球化剂抵消[22]。此外,铝含量大于2%时会使铁液增氧消耗球化剂,同时铝氧化膜影响铁液流动。但有研究表明,铝含量为3.5%时铸铁中出现铝相,并且随铬含量增加而减小[4]。铬缩小奥氏体区促使奥氏体向铁素体转变,形成铬碳化物稳定珠光体,抑制石墨化和细化石墨。铬含量为0.15%~0.25%时促进珠光体形成并使其粒化,铬含量大于0.5%时形成铬碳化物提高铸铁强度。有研究表明,铬元素添加量为1.5%~1.8%时可使铸铁具有良好抗氧化性[8],并且铸铁的抗生长性和抗热疲劳随铬含量在0.8%~1.6%内增加显著提升[24]。同时设计硅、铝和铬为抗氧化元素,其中硅和铝与氧的亲和力大于铬,铝和硅先于铬形成氧化膜,铬氧化膜补充和增强前两种氧化膜。因此,铝含量设计为3%,铬含量设计为1.5%。

钼可固溶于铁素体和碳化物形成固溶体和复合渗碳体提高铸铁的高温强度,但同时阻碍石墨化并增加珠光体。研究表明,钼含量为0.6%~0.8%时与铁素体形成固溶体,大于0.8%时形成碳化物或复合渗碳体[25],中硅球墨铸铁中钼含量为0.77%时高温强度可提高40%[26]。镍可无限固溶于铁素体强化基体且不与碳形成碳化物,但镍会导致碳当量偏离。镍含量为0.4%~0.6%时可细化铁素体晶粒和石墨,但镍含量在0.6%~0.8%时碳当量偏离严重,石墨发生畸变并且珠光体比例增加[27]。镍还可促进石墨化。设计高碳当量、高硅碳和添加铝情况下可抵消铬和钼的反石墨化,因此,钼和镍的含量分别设计为0.8%和0.6%。此外,其他微量元素也会对耐热铸铁的组织和性能产生影响,应对其进行控制,使Mn小于0.2%,S小于0.015%,P小于0.035%。综上所述,本文设计的低合金化铁素体耐热球墨铸铁(low alloying ferrite heat resistant ductile cast iron, LA)与硅钼耐热球墨铸

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

铁(Si-Mo)的合金成分对比如表 1 所示。

表 1 低合金化铁素体耐热球墨铸铁的合金成分
Tab.1 Alloy composition of low alloying ferrite heat resistant ductile cast iron

(mass fraction/%)

耐热材料	合金成分								
	C	Si	Al	Cr	Mo	Ni	Mn	S	P
LA	3.60	3.90	3.0	1.5	0.80	0.6	<0.3	<0.02	0.04
Si-Mo	2.74	4.77	-	-	1.02	-	<0.3	<0.02	0.04

3 低合金化铁素体耐热球墨铸铁的相变及性能分析

采用 JMatPro 软件对本文设计的低合金化铁素体耐热球墨铸铁与应用广泛的硅钼铁素体球墨铸铁[5]的相变及性能进行模拟计算。图 1(a、c)分别为低合金化球墨铸铁和硅钼球墨铸铁的相变与温度关系曲线，低合金化球墨铸铁的初始相变温度为 610 ℃，而硅钼球墨铸铁在 590 ℃发生初始相变，前者比后者的初始相变高 20 ℃。随温度升高，磷化物逐渐消失，碳化物减少，铁素体和石墨略有增加。碳化物和游离渗碳体相变分解，铁或合金原子进入铁素体，碳原子扩散至石墨长大或形核成石墨；低合金化球墨铸铁在 940 ℃时铁素体开始向奥氏体转变，铁素体、石墨和碳化物迅速减少，奥氏体快速增加，1 050 ℃时铁素体完全转变为奥氏体，比硅钼球墨铸铁中铁素体向奥氏体转变温度和转变完成温度高 150 ℃；随温度升高，碳在奥氏体中的溶解度增加，石墨和碳化物明显减少而奥氏体增加不明显；温度升至 1 240 ℃时，低合金化球墨铸铁中的硫化锰消失，奥氏体和一部分石墨开始向液相转变，石墨比例迅速下降，比硅钼球墨铸铁的液相转变温度高 100 ℃左右。

图 1(b、d)分别为低合金化球墨铸铁和硅钼球墨铸铁的杨氏模量和泊松比与温度关系曲线，低合金化球墨铸铁被加热至液相过程中，940 ℃以下时随温度升高杨氏模量快速降低，泊松比逐渐升高；940~1 050 ℃时杨氏模量升高至 100 GPa，泊松比快速增加；1 050~1 200 ℃时杨氏模量缓慢降低，泊松比平稳增加；1 200 ℃以上时，杨氏模量急剧下降，泊松比快速提升。综合相变和力学性能模拟可以推断低合金化球墨铸铁的抗高温形变温度应低于 1 050 ℃。而硅钼球墨铸铁随温度升高，其杨氏模量和泊松比降低，出现第一个极值点温度为 870 ℃，随温度进一步升高，杨氏模量和泊松比增加，在 900 ℃时杨氏模量和泊松比达到极值，随温度进一步升高，杨氏模量和泊松比分别缓慢降低和升高，然后急剧降低和升高。综合其相变和力学性能模拟可以推断硅钼球墨铸铁的抗高温形变温度低于 900 ℃，这与硅钼球墨铸铁的实验结果基本一致。综上所述，本文设计的低合金化铁素体耐热球墨铸铁具有较强的抗高温形变能力。

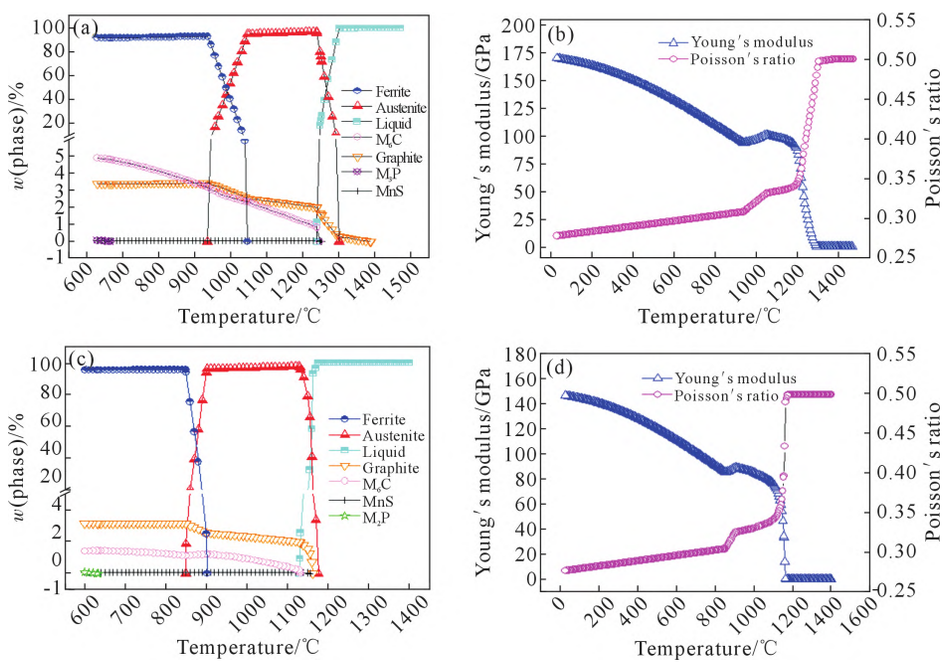


图 1 低合金化铁素体球墨铸铁和硅钼铁素体球墨铸铁的相变及力学性能：(a) 低合金化铁素体球墨铸铁相变，(b) 低合金化铁素体球墨铸铁的力学性能，(c) 硅钼铁素体球墨铸铁相变，(d) 硅钼铁素体球墨铸铁的力学性能

Fig.1 Phase transformation and mechanical properties of the low alloying ferrite ductile iron and Si-Mo ferrite ductile iron: (a) phase transformation of low alloying ferrite ductile iron, (b) mechanical properties of low alloying ferrite ductile iron, (c) phase transformation Si-Mo ferrite ductile iron, (d) mechanical properties of Si-Mo ferrite ductile iron

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4　结论

(1)设计硅、铝、铬、钼和镍为低合金化铁素体耐热球墨铸铁的主合金元素可促进铁素体基体形成,有效增强其抗高温氧化、抗生长及高温强度。

(2)低合金化铁素体耐热球墨铸铁的成分(质量分数,%) 为:4.9 CE,1.08 Si/C,3.6 C,3.9 Si,3.0 Al,1.5 Cr,0.8 Mo,0.6 Ni,Mn<0.3,S<0.02,P<0.035。

(3)本文设计的低合金化铁素体热球墨铸铁的相变开始温度为 940 ℃左右, 但在 1 050 ℃相变完成前具有抗高温形变能力。

参考文献:

[1] 王彬,鲍玉龙. 耐高温抗氧化球墨铸铁材料的制备方法[J]. 现代铸铁,2015, 35(5): 32-35.
WANG B,BAO Y L. Preparation method of high temperature and oxidation resistant ductile material[J]. Modern Cast Iron, 2015, 35 (5): 32-35.

[2] 陆文华,李隆盛,黄良余. 铸造合金及其熔炼[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
LU W H, LI L S, HUANG L Y. Casting alloy and its melting[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.

[3] 郑隆滨,孙永立,史然峰,等. 我国耐热铸铁的生产和发展[J]. 锅炉制造,2004(1): 39-44, 77.
ZHENG L B, SUN Y L, SHI R F, et al. Product and development of heat resisting cast iron in China[J]. Boiler Manufacturing, 2004 (1): 39-44, 77.

[4] 许帅领. 铝和铬对耐热球墨铸铁组织及性能的影响 [D]. 郑州:郑州大学,2019.
XU S L. The effect of aluminum and chromium on microstructure and properties of heat resistant ductile cast iron[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.

[5] LI D L. Discussion of "microstructure and hot oxidation resistance of simo ductile cast irons containing Si-Mo-Al"[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49: 858-859.

[6] EKSTRÖM M, SZAKALOS P, JONSSON S. Influence of Cr and Ni on high-temperature corrosion behavior of ferritic ductile cast iron in air and exhaust gases[J]. Oxidation of Metals, 2013, 80: 455-466.

[7] PISARENKO L Z, LUKASHEVICH S F, GURINOVICH V I. High-strength aluminium cast iron is a perspective material for thermal change conditions[J]. Lit'ëi Metallurgiâ, 2002(4): 60-61.

[8] 张婷,孙玉福,高英民. 硅与铬对球墨铸铁组织和高温性能的影响[J]. 铸造,2008, 57(10): 1057-1060.
ZHANG T, SUN Y F, GAO Y M. Effect of silicon and cromium on structure and high temperature properties of ductile iron[J]. Foundry, 2008, 57(10): 1057-1060.

[9] KIM Y J, JANG H, OH Y J. High-temperature low-cycle fatigue property of heat-resistant ductile-cast irons[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 40: 2087-2097.

[10] 吴德海, 王怀林, 张伯明. 合金元素对铸铁力学性能的影响[J]. 铸造工程,2022, 46(2): 20-25.
WU D H, WANG H L, ZHANG B M. Effect of alloying elements on mechanical properties of cast iron[J]. Foundry Engineering, 2022, 46(2): 20-25.

[11] 周宏伟,程和法,韦杰,等. 高硅铁素体球墨铸铁的组织及性能[J]. 材料热处理学报,2021, 42(5): 111-116.
ZHOU H W, CHENG H F, WEI J, et al. Microstructure and properties of high silicon ferritic ductile iron[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(5): 111-116.

[12] 夏青,姚俊邦,杨涤心. 二次孕育及终硅量对铸态铁素体球墨铸铁组织性能的影响 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版),2006(5): 1-4.
XIA Q, YAO J B, YANG D X. Effect of last-silicon content on microstructure and mechanical properties of ferrite ductile iron obtained by secondary inoculation[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2006(5): 1-4.

[13] STAN S, RIPOSAN I , CHISAMERA M, et al. Solidification characteristics of silicon-alloyed ductile cast irons [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28: 278-286.

[14] ÇELIK G A, TZINI M T, POLAT Ş, et al. Thermal and microstructural characterization of a novel ductile cast iron modified by aluminum addition[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27: 190-199.

[15] MATTEIS P, SCAVINO G, CASTELLO A, et al. High-cycle fatigue resistance of Si-Mo ductile cast iron as affected by temperature and strain rate[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46: 4086-4094.

[16] 李静,赵靖宇,杨勇. 镍对球墨铸铁组织及性能的影响[J]. 铸造,2016, 65(9): 903-906.
LI J, ZHAO J Y, YANG Y. Effects of nickel on structure and mechanical properties of ductile iron[J]. Foundry, 2016, 65(9): 903-906.

[17] 韩非,徐锦锋,吴晓明,等. Cr、V 元素对高硅钼球墨铸铁抗氧化性能的影响[J]. 铸造,2021, 70(4): 420-426.
HAN F, XU J F, WU X M, et al. Effects of vanadium and chromium elements on oxidation resistance of high Si-Mo ductile iron[J]. Foundry, 2021, 70(4): 420-426.

[18] 钱冬冬,程兆虎,周绍雷,等. 浇注温度和碳当量对挂钩铸件缩孔的影响[J]. 铸造技术,2022, 43(1): 59-61.
QIAN D D, CHENG Z H, ZHOU S L, et al. Effect of pouring temperature and carbon equivalent on shrinkage defects of hook casting[J]. Foundry Technology, 2022, 43(1): 59-61.

[19] 夏兰廷,樊福平,丁路平. 高 Si/C 值在低铬耐热铸铁阀体上的应用[J]. 铸造设备研究,2002(3): 21-23.
XIA L T, FAN F P, DING L P. The application of high Si/C ratio in low chromium heat-resistant cast iron valve [J]. Foundry Equipment & Technology, 2002(3): 21-23.

[20] 杜崇山,朱贵华,段文恒. 硅钼耐热球墨铸铁碎块状石墨缺陷分析及对策[J]. 铸造工程,2022, 46(3): 53-57.
DU C S, ZHU G H, DUAN W H. Analysis and countermeasures of fragmentary graphite defects in Si-Mo heat resistant nodular cast iron[J]. Foundry Engineering, 2022, 46(3): 53-57.

[21] 孙宇宁, 施东方. 铝对铸铁基体抗氧化性和力学性能的影响[J]. 现代铸铁,1998(2): 20-22.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

SUN Y N, SHI D F. Effect of aluminum on oxidization-resistance of matrix of cast iron and on mechanical properties[J]. Modern Cast Iron, 1998(2): 20-22.

[22] 李慧中,张新明,唐仁政,等. 铈对中铝耐热铸铁组织和力学性能的影响[J]. 稀土,2003, 24(2): 41-44.
LI H Z, ZHANG X M, TANG R Z, et al. Study of electroless plating technology of Co-Ni-B alloy adding cerium[J]. Chinese Rare Earths, 2003, 24(2): 41-44.

[23] 莫俊超,柴浩,李帅,等. 硅钼球墨铸铁中珠光体和碳化物超标问题及解决方案[J]. 铸造工程,2022, 46(5): 67-70.
MO J C, CHAI H, LI S, et al. Problems and solutions of pearlite and carbide exceeding standard in Si-Mo ductile iron[J]. Foundry Engineering, 2022, 46(5): 67-70.

[24] 马胜强,梁工英,党歌,等. 钼对铁素体球墨铸铁组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术,2014, 35(9): 1909-1912.
MA S Q, LIANG G Y, DANG G, et al. Effect of Mo on microstructure and mechanical properties of ferrite ductile cast iron [J]. Foundry Technology, 2014, 35(9): 1909-1912.

[25] 吉文哲,王守忠. 镍含量对球墨铸铁组织性能的影响[J]. 热加工工艺,2016, 45(15): 81-84.
JI W Z, WANG S Z. Effects of Ni content on microstructures and mechanical properties of nodular cast iron[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(15): 81-84.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net