

成分及球化处理对球墨铸钢组织与性能的影响

郭建设¹, 朱正锋¹, 夏少华¹, 游 闯¹, 宋仁伯²

(1. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所股份有限公司, 江苏常州 213011;

2. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对球墨铸钢轧辊容易出现开裂失效问题, 本研究从成分、组织角度进行了失效原因分析, 并通过成分调整及球化控制实现了材料优化。结果表明: 材料成分、球化过程控制不当导致的组织异常是轧辊开裂的主要原因。C、Si含量分别为1.40%、1.50%, 球化剂粒径为10 mm, 球化剂加入量为0.40%的试棒组织和性能最佳, 抗拉强度和伸长率分别达到829 MPa和2.0%。

关键词: 球墨铸钢; 轧辊; 开裂失效; 组织; 材料优化

中图分类号: TG142.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 01-0028-06

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0005

作者简介:

郭建设(1988-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事钢铁材料研究与铸造工艺开发工作。电话: 18362236675, E-mail: henangjs@126.com

基金项目:

国家自然科学基金资助项目(52074033)。

收稿日期:

2025-03-19 收到初稿,
2025-05-22 收到修订稿。

引用格式:

郭建设, 朱正锋, 夏少华, 等. 成分及球化处理对球墨铸钢组织与性能的影响[J]. 铸造, 2026, 75(1): 28-33.
GUO Jianshe, ZHU Zhengfeng, XIA Shaohua, et al. Effects of composition and spheroidization & inoculation on microstructure and properties of spherical graphite cast steel[J]. Foundry, 2026, 75(1): 28-33.

球墨铸钢作为一种新型工程材料, 具有优良的耐磨性、抗热裂性和抗热疲劳性, 用其生产的轧辊具有优良的使用性能, 在轧制领域得到了越来越广泛的应用, 被认为是替代冷硬球铁和合金锻钢的优良材料^[1]。在碳含量较高的过共析钢液中加入适当的合金元素和球化剂、孕育剂, 经孕育球化处理后可得到球墨铸钢, 基体组织中分布有少量石墨和较多碳化物, 使其性能兼具球墨铸铁和过共析钢特性。

球墨铸钢材料控制不当容易出现裂纹, 导致轧辊开裂失效, 出现剥落、断裂和辊面损伤等情况, 严重降低使用寿命^[2]。因此, 探究材料失效原因, 对提升轧辊使用寿命具有重要意义。王泽华等^[3]对球墨铸钢新材料进行了成分、熔炼研究, 认为C、Si和Mn是球钢材料的基本元素, 通过影响碳化物和石墨组织, 进而影响材料性能。祖方道等^[4]研究了成分及第二相对球墨铸钢热疲劳性能的影响, 认为C、Si和Cu等元素能促进石墨化, 有利于提高材料热疲劳性, 而促进碳化物形成和阻碍石墨化的Cr元素则降低热疲劳性能。然而, 目前材料界学者对球钢材料性能影响因素及断裂失效机理的研究还不够系统, 有待进一步深入探究。本试验着重研究了成分及球化处理对材料组织的影响, 以期得到球钢轧辊断裂失效机理。

1 试验方案

将废钢、硅铁、铬铁、高纯锰和增碳剂等原材料依次加入中频炉内, 加热至1 580~1 600 °C并保温静置一定时间, 以保证钢液成分均匀。同时, 使用干燥洁净薄碳素钢片包裹一半质量的球化剂, 提前在150 °C下烘干保温0.5 h, 待钢液降温到1 520 °C时, 将其投入中频炉内, 10 min后出炉, 钢液出炉前事先在中间包底部放置其余一半数量的球化剂和0.30%的孕育剂, 将钢液倒入中间包内的同时随流加入0.20%的孕育剂进行随流孕育, 其中球化剂粒度为10 mm, 加入量为0.40%。静置冷却适当时间, 待钢液温度降至1 450~1 455 °C时浇入砂型。分别改变C、Si元素含量, 开展了两组试验, 获得不同材料成分的试棒, 如表1所示。通过分析试棒性能确定材料最优成分后, 改变球化剂粒度、球化剂加入量等参数, 开展了三组试验, 研究其对组织和性能的影响, 如表2所示。

表1 球墨铸钢材料化学成分
Tab. 1 Chemical composition of the spherical graphite cast steel

No.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	1.20、1.30、1.40、1.50、1.60	1.50	0.70	0.030	0.025	0.80	0.30
2	1.40	1.30、1.40、1.50、1.60、1.70	0.70	0.030	0.025	0.80	0.30

2 试验结果

2.1 材料成分

对表1中不同成分试棒进行950 ℃保温5 h正火热处理, 经热处理的试棒按照GB/T 228.1—2021标准加工拉伸试样, 比例系数为5.65, 横截面为圆形, 试样直径为 $\Phi 12.5$ mm, 标距为50 mm。两组试棒共包含不同C、Si含量的10种参数组合, 每种参数共做3个拉伸试样, 得到的两组试棒力学性能如表3所示, 表中数据取3个拉伸试样性能结果平均值, 各试样测试数据较平均值偏差在10%以内。力学性能随成分的变化趋势如图1所示, 随着C、Si含量增加, 抗拉强度有最大值, 而伸长率整体呈现下降趋势, 结果表明, C、Si含量均对抗拉强度有明显影响, 两者对伸长率也均有一定程度的影响。

两组不同成分试棒的金相组织如图2、图3所示。由图2可知, 随着C含量增加, 碳化物含量增多, 而石墨含量先增加后减少。C含量为1.20%时, 基体组织中碳化物和石墨含量低, 碳化物主要以块状形态存在, 石墨细小且圆整度低。C含量提高到1.40%时, 碳化物和石墨圆整度明显提高且数量较多, 具有良好的基体组织。当C含量进一步提高到1.60%时, 碳化物开始出现网状分布趋势, 石墨数量开始减少。Si含量对基体组织的影响如图3所示, 随着Si含量增加, 石墨数量增加而碳化物数量减少。Si含量为1.30%时, 碳化物数量较多, 多以棒状或絮状形态出现, 而石墨数量较少。随

表2 熔炼和浇注参数
Tab. 2 Melting and pouring parameters

No.	球化剂粒度/mm	球化剂加入量/%
1	5、10、15	0.34
2	5、10、15	0.40
3	5、10、15	0.46

表3 不同C、Si含量试棒的力学性能
Tab. 3 Mechanical properties of samples with different C and Si contents

序号	成分	含量/%	R_m /MPa	A /%
1	C	1.20	786	2.0
		1.30	812	1.5
		1.40	829	2.0
		1.50	817	1.5
		1.60	785	1.0
2	Si	1.30	781	1.5
		1.40	763	1.5
		1.50	829	2.0
		1.60	786	1.0
		1.70	657	0.5

着Si含量提高, 碳化物圆整度提高且数量减少, 同时, 石墨数量也随之增多。但当Si含量增大到1.70%时, 石墨数量过多, 基体中存在较多软质点, 不利于材料强度提高。

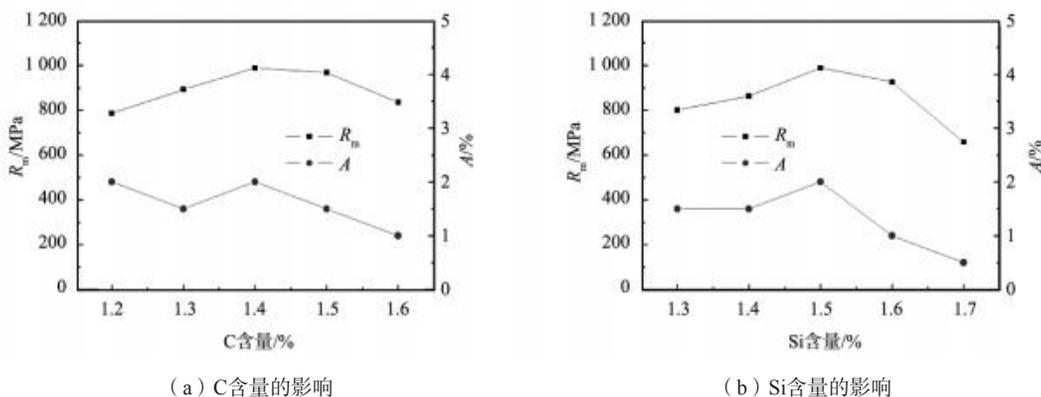


图1 C、Si含量对球墨铸钢力学性能的影响
Fig. 1 The effects of C and Si contents on the mechanical properties of the spherical graphite cast steels

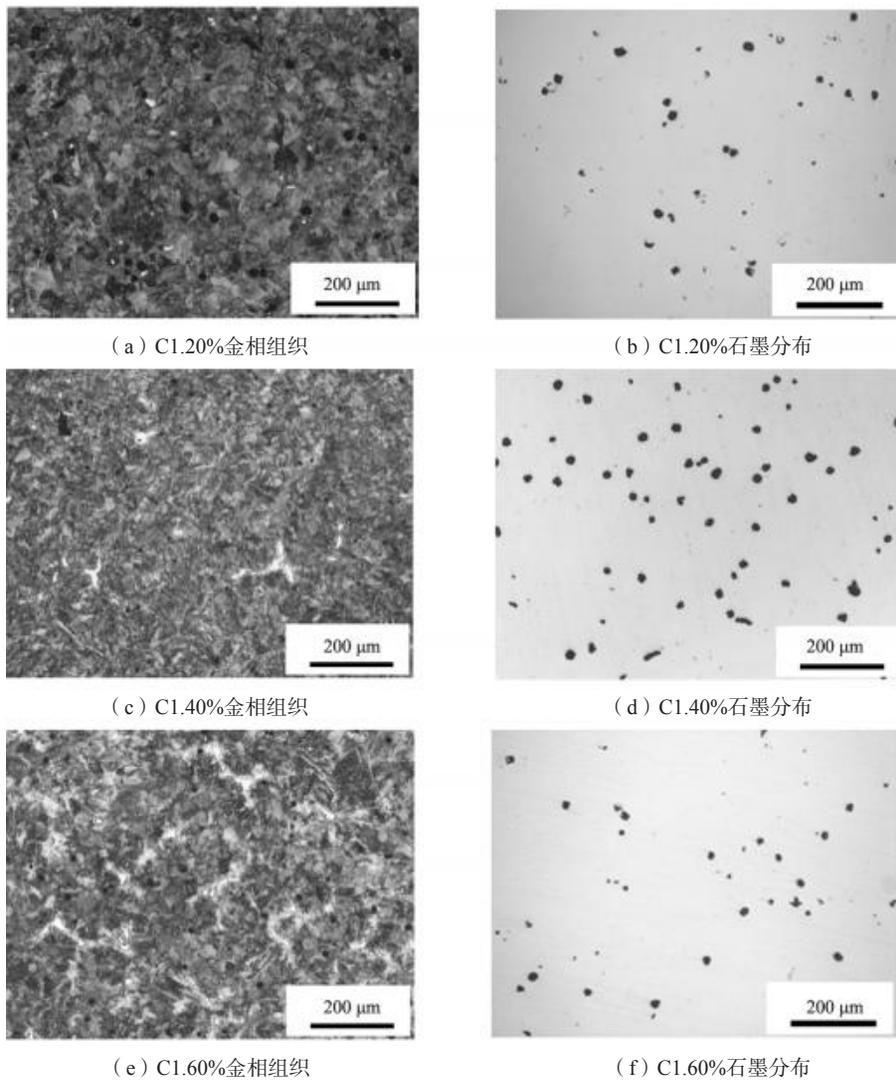


图2 不同C含量球墨铸钢对应金相组织和石墨分布

Fig. 2 Metallographic structures and graphite distributions corresponding to the spherical graphite cast steels with different C contents

2.2 熔炼和浇注工艺

由上述C、Si含量对材料组织的影响可知，C、Si含量分别为1.40%、1.50%时的基体组织最佳，以此作为目标成分进行熔炼浇注试验，研究球化剂粒度和球化剂加入量对材料性能的影响，试验参数如表2所示，拉伸试样规格、试样数量及数据处理方式同前面“2.1”小节所述，力学性能检测结果如表4所示，金相组织检测结果如图4所示。

分析表4力学结果可知，在球化剂加入量一定的情况下，随着球化剂粒径的增大，抗拉强度呈现下降趋势，伸长率整体呈现先增大后减小趋势，球化剂粒径为10 mm时试棒可获得最佳综合力学性能，且球化剂粒径由5 mm增大到10 mm时，抗拉强度和伸长率变化更明显。在球化剂粒径固定情况下，随着球化剂加入量的增加，抗拉强度呈现下降趋势，而伸长率呈现增大趋势，球化剂加入量为0.40%时，试棒综合力学性能最

表4 不同球化剂粒径和加入量对应的试棒力学性能
Tab. 4 Mechanical properties of samples with different particle sizes and additions

序号	球化剂加入量/%	粒径/mm	R_m /MPa	A /%
1	0.34	5	950	0.5
		10	867	1.0
		15	850	1.0
2	0.40	5	936	1.0
		10	829	2.0
		15	780	1.5
3	0.46	5	920	1.5
		10	795	2.5
		15	751	2.0

佳，且在球化剂粒径为5 mm时，球化剂加入量对试棒抗拉强度和伸长率影响不明显。

从图4可以看出，在固定球化剂粒径情况下，随着

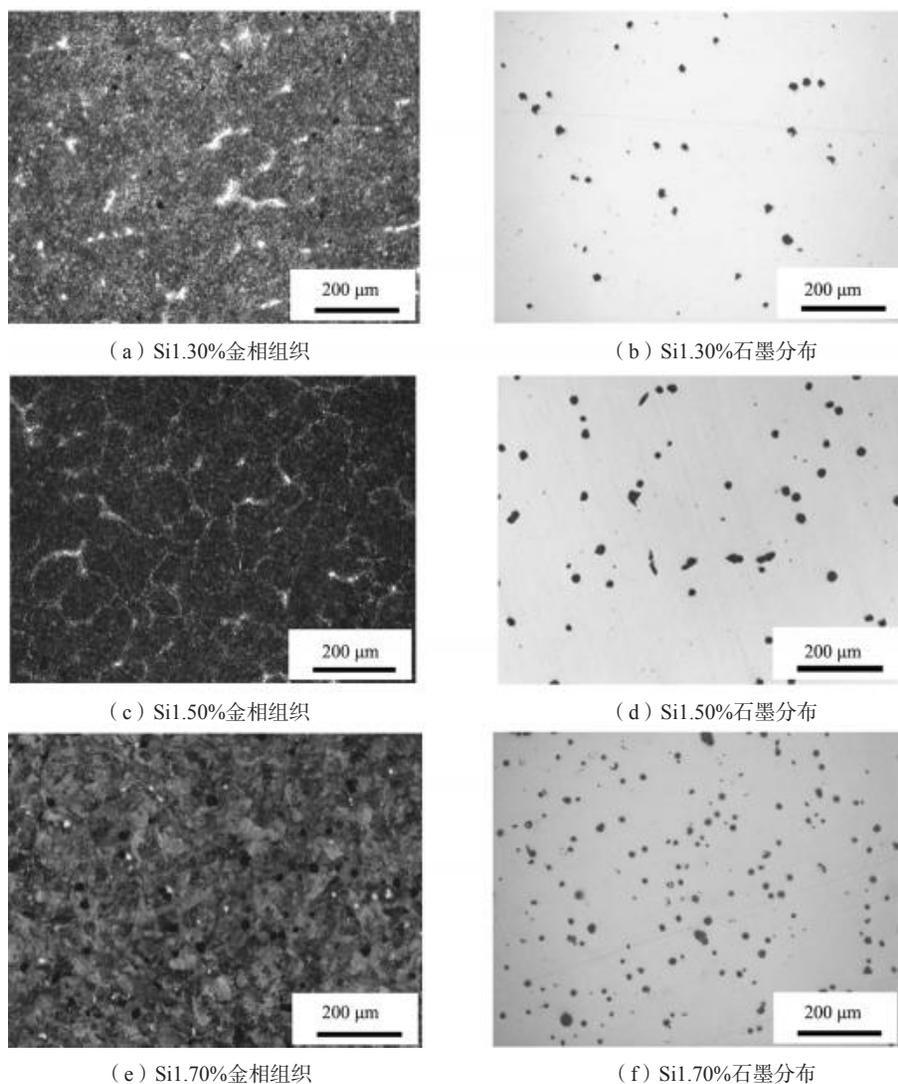


图3 不同Si含量球墨铸钢对应金相组织和石墨分布

Fig. 3 Metallographic structures and graphite distributions corresponding to the spherical graphite cast steels with different Si contents

球化剂加入量的增加,促进碳化物转变,石墨数量呈现增多趋势,如图4(a)-(c)所示,值得关注的是,当球化剂粒径为5 mm时,球化剂加入量对石墨数量影响不明显,均处于较低水平,且石墨球径很细小。当球化剂加入量固定时,随着球化剂粒径增大,石墨尺寸整体呈现增大趋势,导致碳化物减少,从而有利于材料伸长率提高,但值得一提的是,球化剂粒径增大到15 mm时,石墨会呈现飘絮状(图4(h))或变得明显粗大(图4(i))现象,对铸钢基体组织造成不同程度的割裂影响,会显著降低材料抗拉强度和伸长率。

3 分析与讨论

轧辊在使用中需要承受周期性冷热冲击,由于不同部位的膨胀收缩不一致而在内部形成周期应力,容易导致微裂纹萌生和扩展,从而出现热疲劳断裂失

效。热应力表达式如式(1)所示:

$$\Delta\sigma = -Ea\Delta T \quad (1)$$

式中:可知其值与材料弹性模量 E 、线膨胀系数 a 和温差 ΔT 有关。球墨铸钢组织中存在较多石墨,由于石墨弹性模量明显低于一般铸钢或锻钢^[4],使得球墨铸钢弹性模量为155~180 GPa,显著低于弹性模量为200~215 GPa的传统铸钢。此外,石墨较小的线膨胀系数和良好的导热性也使得球墨铸钢具有较小的线膨胀系数和较好的热导率,使其热疲劳性能优于普通铸钢。优良的微观组织是保证其具有良好热疲劳性的前提,当材料球化率低或者碳化物数量较多时,材料的弹性模量增大,导热性变差,线膨胀系数变小,导致材料内部热应力会明显增大,微裂纹萌生和扩展几率显著增大,即材料热疲劳性变差,如图2(c)所示。

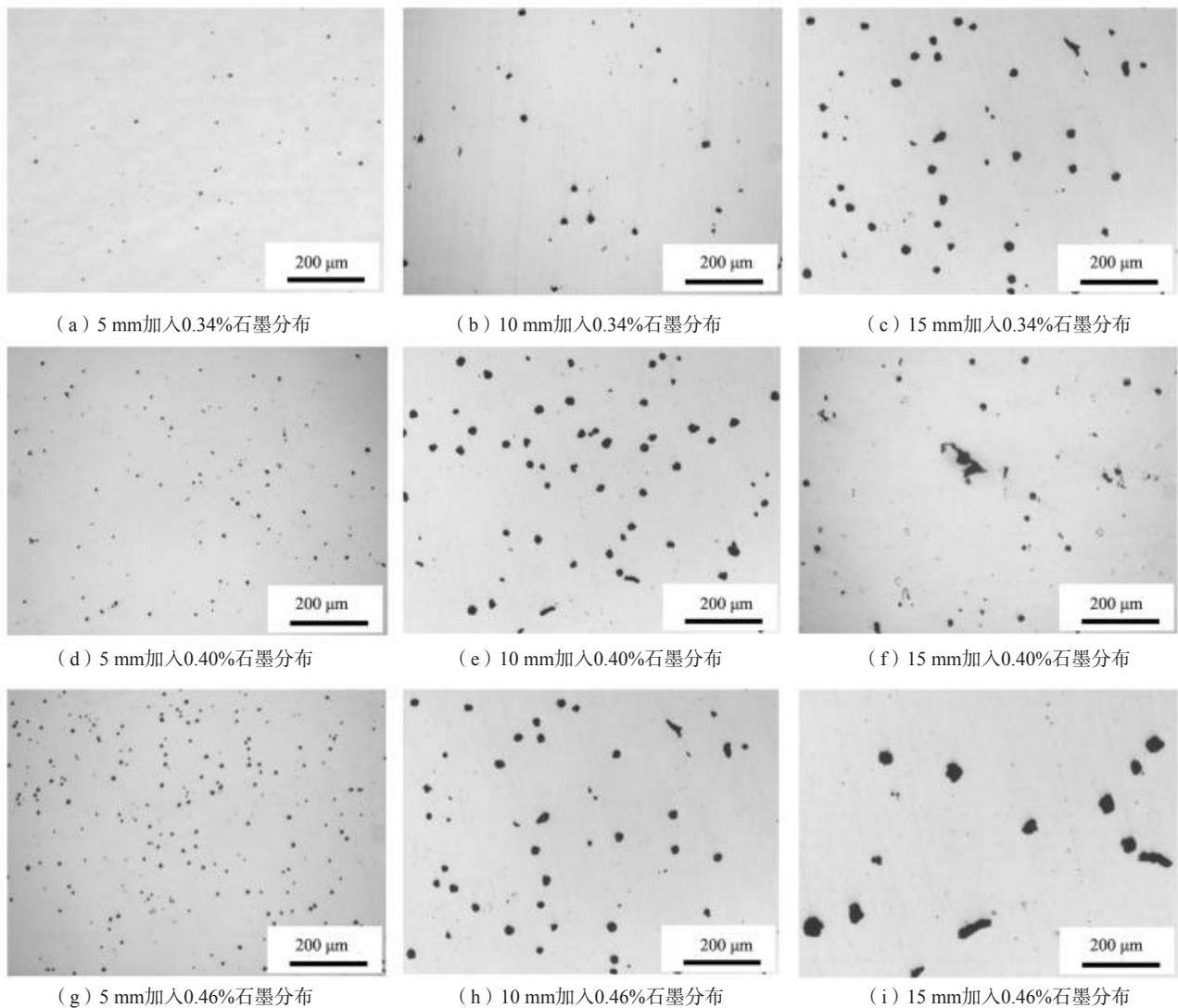


图4 不同球化剂粒径和加入量对应试棒金相组织中石墨分布

Fig. 4 The graphite distributions, in the metallographic structures, of samples with different particle sizes and additions

3.1 成分

球墨铸钢具有较高的碳含量，其在钢液凝固过程中除少部分固溶在基体中以外，大多以石墨或碳化物形式存在。碳含量较低时，碳化物、石墨析出少，不利于材料强度和热疲劳性提高，而当碳化物含量过高时，碳化物容易沿晶界析出，导致组织恶化。硅是促进石墨化的元素，可以促进碳元素形成石墨，阻碍疲劳裂纹扩展，从而提高热疲劳性，但过多则不利于材料强度提高。

综合所述，C、Si元素含量对基体组织及材料性能均会产生影响，且都需在适当范围才能使材料组织和性能达到最佳。相关研究表明，单纯的抗拉强度或伸长率提高都不利于产品使用寿命增加，鉴于C含量为1.40%、Si含量为1.50%时的材料具有较高的抗拉强度以及伸长率，本研究选择此成分作为球墨铸钢材料的目标成分。经过试验优化后的材料成分如表5所示。

表5 球墨铸钢材料优化后成分
Tab. 5 Optimized composition of the spherical graphite cast steel material

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1.40	1.50	0.70	≤0.030	≤0.025	0.80	0.30

3.2 球化

球墨铸钢组织主要由珠光体基体+碳化物、石墨等第二相组成，材料成分、球化工艺均能通过改变材料组织影响使用性能。碳化物作为硬质相能显著增加材料硬度和耐磨性，但数量过多后容易沿晶界网状分布，导致裂纹扩展^[3]，而且碳化物在高温工况下有转变为石墨倾向，石墨膨胀则会导致材料萌生微裂纹。石墨一方面作为良导体，可有效降低温差，减小热疲劳应力，同时还可以阻止裂纹扩展，但其作为软质点，数量过多时，则会导致材料强度降低，使其周围的微

裂纹连接成大裂纹并延伸^[3-4]。因此,控制碳化物和石墨数量、形态、分布以得到优良的微观组织是提高球墨铸钢材料使用寿命的关键。

碳在向石墨转化的过程中,球化和孕育起到关键作用,主要是由于球化剂和孕育剂能为石墨析出提供大量形核质点,降低相变能量势垒,促进石墨形成。影响球化的因素主要有球化剂粒径、加入量及球化温度等,若球化不良,则会导致基体组织中存在大量过饱和碳,造成较多晶格畸变;另外,过多碳化物聚集在晶界处形成网状碳化物,导致材料内部容易形成微裂纹,增加开裂倾向。当球化剂粒径较小时,球化剂接近粉末状,在1 450 °C的高温下会被迅速烧损变成炉渣,使球化剂失效,导致石墨析出不明显,这也正是球化剂粒径为5 mm时其加入量增加不能明显提升石墨化效果的原因,导致材料抗拉强度较大而伸长率较低。当球化剂粒径过大时,球化剂不够分散,对局部钢液持续球化时间过长,导致石墨组织呈现飘絮状或较大尺寸,对基体组织起到割裂效果,影响抗拉强度和伸长率提升。当球化剂加入量较少时,对钢液的球化作用很弱,导致石墨含量偏低,球墨铸钢金相组

织达不到理想效果,因而其力学性能不佳。当球化剂加入量较高时,会促进石墨大量析出,而过多的石墨会对基体组织强度造成损害,同时,加入量过多也会导致石墨长大或形态不够圆整,使得材料微观组织出现恶化,影响材料综合力学性能及产品使用寿命的提高。因此,结合图4金相组织及对应材料力学性能结果,本文最终选择球化剂粒径为10 mm,加入量为0.40%。

4 结论

(1) C、Si元素及球化剂是促进石墨化形成的因素,但其含量过高会导致材料基体出现过量石墨,削弱材料抗拉强度和伸长率;球化剂尺寸会显著影响实际球化效果,尺寸过小容易因烧损而失效,尺寸过大会导致石墨球化形态不良。

(2) 材料成分中碳、硅含量分别为1.40%、1.50%,球化剂粒径为10 mm,球化剂加入量为0.40%时的试棒组织和性能最佳,抗拉强度和伸长率分别达到829 MPa和2.0%。

参考文献:

- [1] 王泽华,张俊新,徐贵宝.球墨铸钢轧辊的研制[J].铸造,2004(1):77-80.
- [2] 马占福.热轧轧辊失效分析及预防措施[J].新疆钢铁,2010(3):8-10.
- [3] 王泽华,刘腾彬,方学锋.球墨铸钢:一种新型的工程材料[J].淮海大学常州分校学报,2006,20(1):1-5.
- [4] 祖方道,吴有进.成分及第二相组织对球墨铸钢热疲劳性能的影响[J].钢铁研究学报,1998,10(1):58-63.

Effects of Composition and Spheroidization & Inoculation on Microstructure and Properties of Spherical Graphite Cast Steel

GUO Jian-she¹, ZHU Zheng-feng¹, XIA Shao-hua¹, YOU Chuang¹, SONG Ren-bo²

(1. CRRC Qishuyan Locomotive & Rolling Stock Technology Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China; 2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract:

In view of the cracking and failure problems of the spherical graphite cast steel roller, the causes of the failure has been analyzed from the aspects of composition and microstructure, and the optimization of the material has been achieved by using of adjusting chemical composition and controlling spheroidization processes. The results show that the main reason led to the roller cracking is the structure abnormality caused by improper controlling of chemical composition and spheroidization process. When the contents of C, Si are 1.40%, 1.50%, respectively, the particle size of nodulizer is 10 mm, and the addition of nodulizer is 0.40%, best microstructure and mechanical properties of specimens can be obtained, and the tensile strength and elongation reaching 829 MPa and 2.0%, respectively.

Key words:

spherical graphite cast steel; roller; crack failure; microstructure; material optimization