

锡微合金化对球墨铸铁管组织和性能的影响

尤庆伟, 王精华, 贾斌金, 王建华, 田建军, 陈 成

(河北新兴铸管有限公司, 河北邯郸 056300)

摘要: 添加不同含量Sn合金元素离心铸造球墨铸铁管, 并通过拉伸试验和金相观察等方法研究了Sn含量以及相应的热处理工艺对球墨铸铁管组织和性能的影响。结果表明: 微量 ($<0.1\text{wt.}\%$) Sn元素可以有效提高球墨铸铁中的珠光体含量; 同时配合相应的热处理工艺, 可以使珠光体球化, 得到一定比例 (20%~45%) 的粒状珠光体; 抗拉强度满足500 MPa以上时, 伸长率 $>10\%$, 高于现有标准QT420-10的抗拉强度, 满足球墨铸铁管高强高塑的要求。

关键词: 锡; 球墨铸铁管; 抗拉强度; 伸长率; 珠光体

中图分类号: TG143.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 03-0300-06

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0042

Effect of Tin Microalloying on Microstructure and Properties of Ductile Iron Pipes

YOU Qing-wei, WANG Jing-hua, JIA Bin-jin, WANG Jian-hua, TIAN Jian-jun, CHEN Cheng
(Xinxing Ductile Iron Pipes Co., Ltd., Handan 056300, Hebei, China)

Abstract: The effects of Sn contents and corresponding heat treatment processes on the microstructure and properties of ductile iron pipes were investigated by means of tensile tests and metallographic observations for the centrifugally cast ones with different contents of Sn alloying element additions. The results show that trace amounts of Sn element ($<0.1\text{wt.}\%$) can effectively increase the pearlite content in ductile iron; meanwhile, combined with corresponding heat treatment processes, the pearlite can be spheroidized, and a certain proportion (20%-45%) of granular pearlite can be obtained; when the tensile strength reaches more than 500 MPa, the elongation exceeds 10%, which is higher than the tensile strength specified in the existing standard QT420-10, meeting the requirements of high strength and high ductility for ductile iron pipes.

Key words: Sn; ductile iron pipes; tensile strength; elongation; pearlite

球墨铸铁是一种兼具性能优势和成本效益的材料, 尤其在需要高强度、耐磨性和良好铸造工艺的场景中表现突出。近年来国家的乡村建设行动持续整改提升农村人居环境, 管道铺设也是其中一个重要整改方向。球墨铸铁管因其高强度、高韧性和耐腐蚀等性能, 已成为城市输水、输气等基础设施的首选材料。然而球墨铸铁管在面临服役环境恶化、钢管和塑料管竞争压力下, 必须通过技术创新和产品升级提升综合性能, 以保持市场竞争力^[1-6]。

微合金化的概念最早是Noren在1963年提出的, 指在钢中加入含量 $<0.1\%$ 的微量合金元素, 从而显著提高

钢的性能^[7], 但实际上早在1958年美国国家钢铁公司旗下的五大湖钢铁公司向世界钢铁市场推出GLX-W系列铌处理钢时, 就是采用铌微合金化的方式, 提高强度和韧性^[8]。锡合金元素早期被认为是球墨铸铁中的有害元素, 干扰球化元素以及脆化元素, 近些年的研究表明, 锡可以很好地稳定珠光体, 是铜稳定珠光体能力的10倍, 且不形成游离渗碳体, 提高球墨铸铁的强度和硬度^[9-13]。通过添加微量合金元素Sn结合相应的热处理工艺, 可以获得抗拉强度满足500 MPa以上, 伸长率 $>10\%$ 的球墨铸铁管, 本研究通过添加不同含量Sn合金元素, 采取微合金化的方式, 改变球墨铸铁管的组织

基金项目: 国有资本金资助新一代高强高塑资源节约型球墨铸铁管产品开发。

收稿日期: 2025-08-08 收到初稿, 2025-12-26 收到修订稿。

作者简介: 尤庆伟 (1981-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为球墨铸铁管生产工艺工程研发。E-mail: 863673181@qq.com

通信作者: 王精华, 女, 工程师, 硕士。电话: 0310-5792433, E-mail: wangjinghua1217@163.com

引用格式: 尤庆伟, 王精华, 贾斌金, 等. 锡微合金化对球墨铸铁管组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2026, 75 (3): 300-305.

YOU Qingwei, WANG Jinghua, JIA Binjin, et al. Effect of tin microalloying on microstructure and properties of ductile iron pipes [J]. Foundry, 2026, 75 (3): 300-305.

和性能,获取高强度球墨铸铁管。球墨铸铁管的生产有水冷工艺和热模工艺两种铸造方法, DN80-1000规格的球墨铸铁管采用水冷工艺,铁液浇注在高速旋转的管模中通过水冷迅速凝固成形; DN1200-DN3000规格的球墨铸铁管采用热模工艺,将管模加热至一定温度,并在管模内表面喷涂一定厚度的隔热涂料。针对不同的生产工艺,选用DN300和DN1200两种规格的球墨铸铁管进行试验研究。

1 试验方法

采用高炉+中频炉的双联冶炼工艺,一种球化方式采用底吹钝化镁粒的球化工艺,孕育剂为含硅量75%的硅铁。铁液兑入中频感应电炉之后,加入废钢进行调碳,成分合格后进行球化和孕育处理,喷镁量为0.2wt.%,硅铁孕育剂的用量为1.5wt.%,球化处理温度为1 425 ℃。处理后的铁液采用冷模法直接离心浇注成DN300的球墨铸铁管,在试验管上采集试验片后,使用小型马弗炉进行不同热处理制度的热处理。另一种球化方式采用直包喷吹钝化镁粒的球化工艺,处理后的铁液采用热模法直接离心浇注成DN1200的球墨铸铁管,在台车式退火炉里进行退火处理。微合金化Sn元素添加量少,且Sn的熔点231.88 ℃,沸点2 270 ℃,相对密度7.28 g/cm³,熔点低沸点高不挥发,所以直接在球化之前加入球化包,球化时对铁液的搅拌可以保证合金元素的充分溶解。在所有试验管的插口位置上截取加工试样,用以观察金相、拉伸试验等测试。其中金相观察参考GB/T 9441—2021球墨铸铁金相检验标准,拉伸样棒参考GB/T 228.1—2021金属材料拉伸试验

方法和AWWA C151-A21.51美国球墨铸铁管标准,拉伸试验参考GB/T 25048—2019金属材料管环拉伸试验方法。

2 成分设计

试验材料按照如表1所示的目标成分配制,离心铸造球墨铸铁管,添加Sn含量为0.01%~0.06%。

表1 试验管成分
Tab. 1 Composition of the test pipe $w_B/\%$

规格	C	Si	Mn	P	S	Mg	Sn
DN300	3.8	2.1	0.2	0.05	0.01	0.05	0.017
							0.034
							0.053
DN1200	3.6	2.1	0.2	0.05	0.01	0.05	0.02

3 热处理制度

热处理条件共有两种,如图1所示,图1(a)是在小型马弗炉中进行退火处理,采用电阻丝加热,冷模法生产的DN300规格球墨铸铁管由于壁厚和水冷的原因,冷却速度较快,所以铸态组织主要是渗碳体,热处理制度以消除渗碳体、保留部分珠光体并让珠光体粒化为目标;图1(b)是铁素体球墨铸铁管的热处理制度,在生产线上,采用连续式退火炉进行退火处理,焦炉煤气加热,热模法在管模内喷涂一层涂料,降低了冷却速度,铸态组织为铁素体+珠光体+石墨,热处理制度以消除部分珠光体并使珠光体粒化为目标。针对不同热处理对球墨铸铁组织的影响进行了研究。

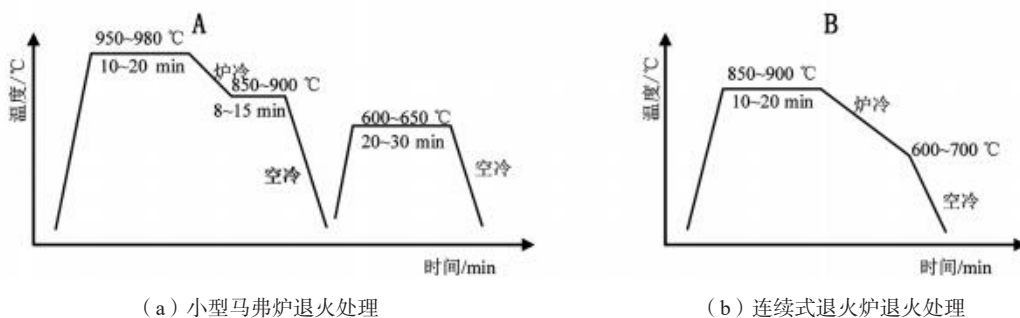


图1 热处理制度

Fig. 1 Heat treatment process

4 结果及分析

Sn可以稳定珠光体而不形成游离渗碳体。在球墨铸铁凝固过程中,锡偏析于石墨和奥氏体界面,形成锡的富集层。Fe₃SnC的形成更容易发生在石墨和奥氏体的界面上,能够有效地抑制碳在奥氏体中向球状石

墨表面扩散,因此能够减缓或抑制铁素体析出,促进珠光体形成^[14]。

4.1 Sn元素对球墨铸铁管微观组织的影响

球墨铸铁的性能与其他铸铁产品相比较为突出,而微观组织对球墨铸铁的综合性能有着决定性影响,

微合金化的目的就是对球墨铸铁的基体进行改性，从而改善其基体组织和综合性能^[15]。对冷模法和热模法浇注的球墨铸铁管添加Sn合金元素后，对球墨铸铁的微观组织进行观察，分析Sn元素对石墨球大小、珠光体所占面积比等的影响，分析方法参考GB/T 9441—2021中规定，石墨球圆整度采用石墨颗粒面积除以最大弗雷德直径的石墨颗粒的圆面积，圆整度计算见公式(1)。

$$\rho = \frac{A}{A_m} = \frac{4A}{\pi l_m^2} \quad (1)$$

式中： ρ 为石墨颗粒圆整度； A 为石墨颗粒面积， mm^2 ； A_m 为最大弗雷德直径的石墨颗粒圆面积， mm^2 ； l_m 为最大弗雷德直径， mm 。

球形石墨颗粒是指圆整度 ≥ 0.60 的石墨颗粒，严格按照GB/T 9441—2021的要求，采用球墨铸铁金相分析软件（软著号2023SR1781573）随机选取5个视场，统计石墨球参数；珠光体比例统计采用抛光态试样用2%~5%硝酸酒精溶液侵蚀后，随机选取5个视场，放大倍数100倍，取所有视场测定结果的平均值。

4.1.1 DN300球墨铸铁管的微观组织

DN300规格的球墨铸铁管采用离心铸造冷模法工艺，热处理工艺如图1(a)所示，金相组织分析如图2和图3所示，图2是石墨球形态，因冷却速度较快，外壁石墨球个数可达1 100个/ mm^2 以上，石墨球尺寸为4 μm 左右，图3为4%硝酸酒精侵蚀之后的珠光体/铁素

体比例金相图，高温消除渗碳体的退火工艺已经将渗碳体彻底分解，侵蚀后的基体金相组织只有珠光体和铁素体，看不到渗碳体，由于离心力的作用，碳原子往内壁偏聚，内壁珠光体面积比明显高于外壁。

金相分析数据如表2所示，石墨球的形态与密度与Sn含量的影响没有相关性，离心浇注过程中由于离心力的作用，外壁的冷却速度快，压力最大，所以内壁石墨球密度最小，但是石墨球尺寸和石墨球面积比最大；外壁石墨球密度最大，但是石墨球尺寸和石墨球面积比最小；珠光体的面积占比与Sn含量呈正比例关系，随着Sn含量的减少，珠光体的面积占比逐渐减少，如图4所示。

Sn含量 $\geq 0.03\%$ 时，内壁珠光体含量可达45%；Sn含量达到0.053%时，内壁珠光体含量并没有大幅提高，说明采用此退火工艺、Sn含量在0.03%~0.06%时，珠光体的含量仅为45%左右，并不会随着Sn含量的增加而大幅增加；Sn含量为0.017%时，内壁的珠光体含量仅为20%，外壁珠光体为0。

将Sn含量为0.034%的试样放大至1 000倍，观察珠光体的形貌，如图5所示，外壁珠光体的含量少，珠光体主要呈粒化状态，弥散分布在铁素体上，珠光体的条状渗碳体已经粒化、球化或是呈短簇状；中间部位珠光体的粒化效果已经减弱，仅有少量珠光体的片状渗碳体粒化或是短簇化；内壁珠光体粒化效果不明显，珠光体主要为细片状。

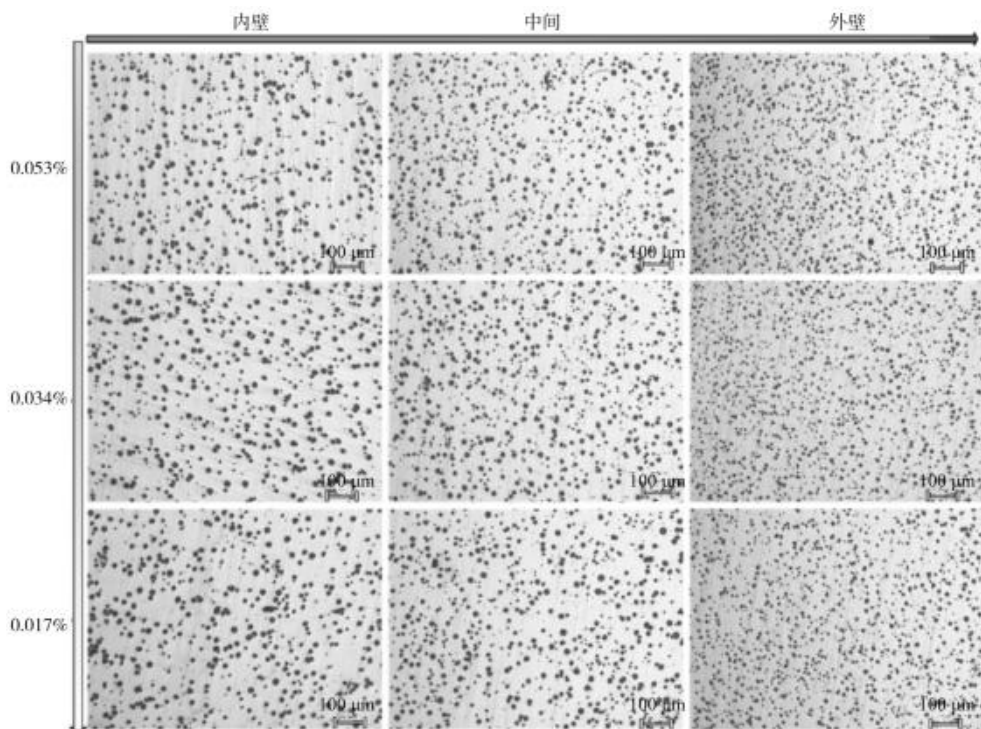


图2 石墨球形态图

Fig.2 The diagrams of graphite nodule morphologies

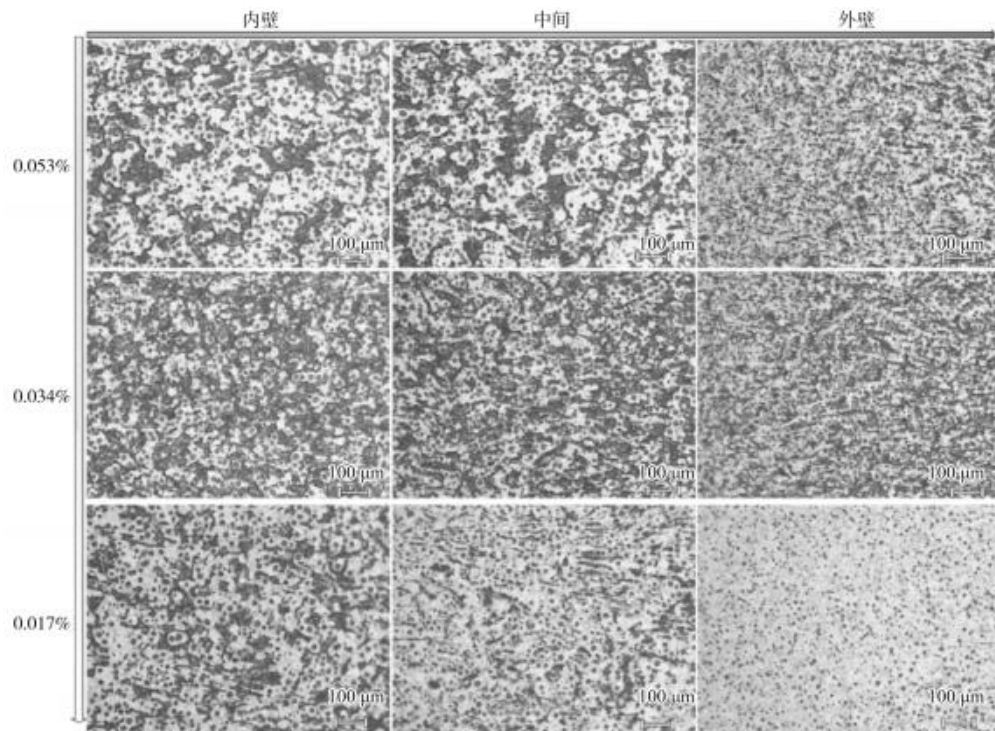


图3 珠光体/铁素体分布金相图 (4%硝酸酒精侵蚀)

Fig. 3 The metallographic diagrams of pearlite/ferrite distributions (Etched by 4% nital)

表2 石墨球参数

Tab. 2 Graphite nodule parameters

Sn含量/%	位置	石墨球密度/(个·mm ⁻²)	石墨球尺寸/μm	圆整度/%	球化率/%	石墨球面积比/%	珠光体面积占比/%
0.053	内壁	597	6.65	74	83	7.59	45
	中间	974	5.09	74	83	7.44	40
	外壁	1 246	4.39	74	77	6.54	25
0.034	内壁	600	7.30	72	79	8.82	45
	中间	830	5.81	73	84	8.12	35
	外壁	1 181	4.12	74	82	5.58	20
0.017	内壁	574	7.55	73	80	8.97	20
	中间	758	6.07	74	83	8.11	15
	外壁	1 142	4.42	73	79	6.10	0

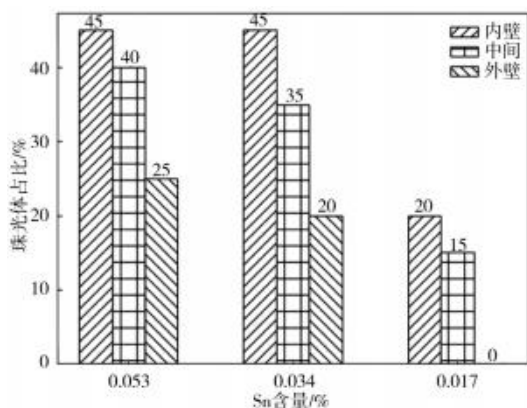
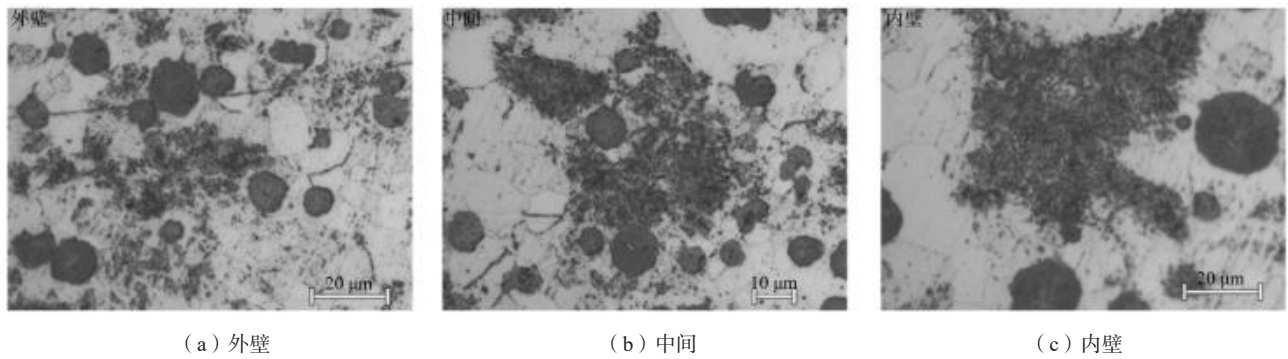


图4 珠光体占比图

Fig. 4 The chart of pearlite proportion

4.1.2 DN1200球墨铸铁管的微观组织

管径1 000 mm以上的球墨铸铁管采用的是热模铸造, DN1200的Sn含量为0.02%, 热处理制度如图1(b)所示。图6是微合金强化(Sn)退火之后的珠光体含量, 从左至右依次是外壁、中间、内壁, 珠光体含量分别是13.88%、4.76%、2.22%。微合金强化(Sn)的球铁管和普通球铁管的金相对比如表3所示, 石墨球数和石墨球大小没有太大区别, Sn微合金化球铁管的球化率为0.83, 略高于普通球铁管。珠光体内外壁含量不一致主要是由冷却速度的差距造成的, 外壁因直接接触模具, 冷却速度快于内壁, 促进珠光体形成。



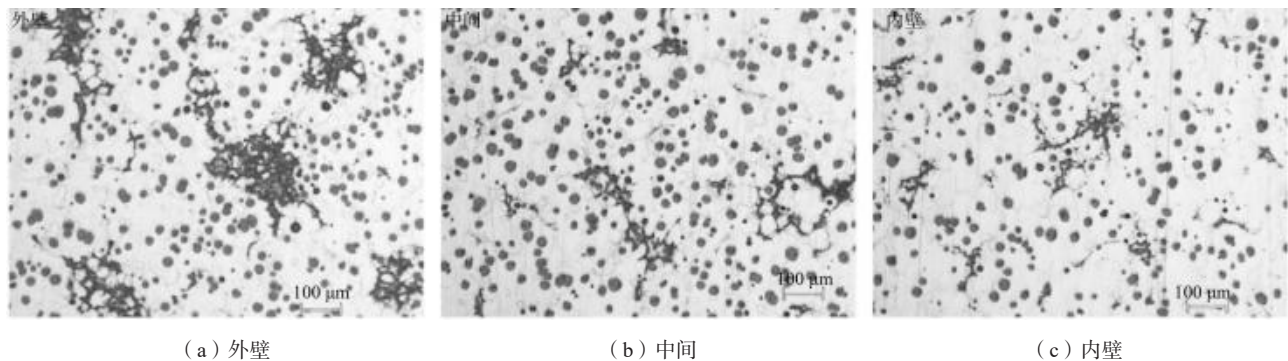
(a) 外壁

(b) 中间

(c) 内壁

图5 珠光体粒化形貌

Fig. 5 The morphologies of granular pearlites



(a) 外壁

(b) 中间

(c) 内壁

图6 DN1200球墨铸铁管微合金强化退火后金相组织

Fig. 6 The metallographic structures of DN1200 ductile iron pipe after microalloying strengthening and annealing

表3 DN1200微合金化球铁管与普通球铁管金相组织对比
Tab. 3 Comparison of metallographic structures between microalloyed and general ductile iron pipes of type DN1200

规格	合金化	石墨球密度/ (个·mm ⁻²)	石墨球 尺寸/μm	球化 率/%
DN1200	微合金强化 (Sn)	285	12.15	83
DN1200	普通球铁管	284	12.78	76

4.2 Sn 元素对球墨铸铁管力学性能的影响

拉伸试样尺寸如图7所示。其中 A 是总的夹持长度， D 是直径， G 为标距， R 是过渡半径，DN300规格的球墨铸铁管全壁厚尺寸为6 mm左右，所以拉伸试样的直径为2.5 mm， G 为10 mm；DN1200规格的球墨铸铁管全壁厚尺寸为14 mm左右，按照标准规定拉伸试样的直径为6 mm， G 为30 mm；每个成分进行三组拉伸试验，确保试验条件基本一致；拉伸试验设备采用万测万能拉伸试验机，已具备数据修正功能；所有拉伸数据波

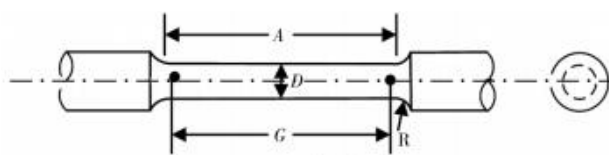


图7 拉伸试样

Fig. 7 Tensile-test sample

动幅度很小，为保证试验数据的严谨性，每个成分取试验数据的最小值。

对于DN300规格的球墨铸铁管，在图1(a)的热处理制度下，Sn含量变化对球墨铸铁拉伸性能的影响如表4所示。随着Sn含量的增加，抗拉强度呈增加趋势，Sn含量0.034%与Sn含量0.053%的珠光体含量差距很小，所以抗拉强度值仅相差5 MPa，伸长率下降至10.5%；Sn含量0.017%到0.034%，抗拉强度值增加了45 MPa，伸长率几乎不受影响，仍在15%左右。DN1200规格的球墨铸铁管，在图1(b)的热处理制度下，Sn含量为0和0.02%的拉伸性能也在表4中列出。

DN300强度和伸长率随着Sn含量的变化规律如图8所示，随着Sn含量的增加抗拉强度和屈服强度增加，

表4 球墨铸铁管的拉伸性能
Tab. 4 Tensile properties of ductile iron pipes

规格	Sn含 量/wt.%	抗拉强 度/MPa	屈服强 度/MPa	伸长 率/%
DN300	0.053	560	395	10.5
	0.034	555	385	15
	0.017	510	370	14.5
DN1200	0	462	314	18.5
	0.02	512	405	12.5
	0	457	338	17.5

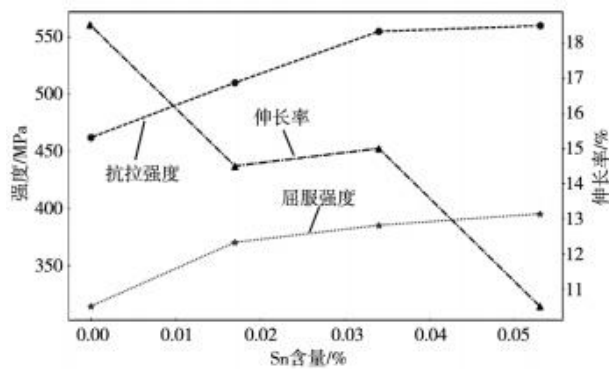


图8 DN300拉伸性能

Fig. 8 The tensile properties of DN300

伸长率下降,而且当Sn含量在0.03%~0.04%之间时,抗拉强度能达到550 MPa,伸长率也在15%左右。而且0.034%和0.053%的Sn含量时,珠光体含量都在45%左右,抗拉强度仅为5 MPa的差别,但是伸长率在Sn含量为0.053%时明显降低,从15%降至10.5%,分析认为是Sn元素在共晶团边界偏析所致。DN1200规格的球墨铸铁管Sn含量添加至0.02%,抗拉强度即可达到500 MPa以上,伸长率>10%。显著提高了球铁管的抗拉强度,

参考文献:

- [1] 朱共澳,翟敢超,胡绍东,等.离心铸造球墨铸铁管的研究和生产现状及发展趋势[J/OL].上海金属,1-14[2025-12-26].
<https://doi.org/10.19947/j.jssn.1001-7208.2025.04.03>.
- [2] 胡志涛,马梦月,秦国防,等.石墨球数对等温淬火态球墨铸铁热疲劳性能的影响[J/OL].兵器材料科学与工程,1-10[2025-12-26].
<https://doi.org/10.14024/j.cnki.1004-244x.20251217.003>.
- [3] 杨岳清,杜宝帅,杨超,等.Si/Cu/P合金化对球墨铸铁组织与力学性能的影响[J].金属热处理,2025,50(8):46-54.
- [4] 李蒙,任莎歌,李贵胜,等.不同孕育剂随流孕育对微合金化球墨铸铁组织和性能的影响[J].兵器材料科学与工程,2024,47(2):77-83.
- [5] IMASOGIE B I. Ductile iron production technology: a review[J]. Ife Journal of Technology, 2015, 23(2): 24-35.
- [6] 刘金海,曾大本,陈华一,等.离心铸造球墨铸铁管伸长率波动的原因及稳定措施[J].中国铸造装备与技术,1984(4):15-18.
- [7] NOREN T M. Columbium as a microalloying element in steels and its effect on welding technology[R]. Special Report SSC-154, August 1963.
- [8] STARRATT F W. Columbium-treated steels low-cost, high-

且屈服强度达到400 MPa以上,屈强比为0.79,高于普通球铁管的屈强比0.7。

5 结论

(1) DN300规格的球墨铸铁管,采用正火+退火的热处理工艺。随着Sn含量的增加,珠光体含量逐渐增加,外壁珠光体的粒化效果较好;随着Sn含量增加,抗拉强度逐渐增加,当Sn含量超过0.037%时,抗拉强度增加不明显,但是伸长率下降比例增大,所以Sn的添加量不宜超过0.04%。

(2) DN1200的球墨铸铁管,采用生产的高温退火热处理工艺,当Sn含量增加至0.02%,抗拉强度增加至500 MPa以上,伸长率为12.5%。

(3) 离心球墨铸铁管生产过程中采用水冷法,因为外壁直接接触水冷金属型管模,冷却速度快,石墨球个数为1 100个/mm²,石墨球尺寸为4 μm左右,离心力作用使碳原子往内壁偏聚,内壁珠光体面积占比明显高于外壁;采用热模法,由于外壁冷却速度快,促进珠光体的形成。

strength[J]. J. Met., 1958, 10(12): 799-799.

- [9] 片岡义博,李森.添加锡对球墨铸铁的影响[J].现代铸铁,1988(2):59-62.
- [10] 杨泽辉.锡在厚壁珠光体球墨铸铁新产品开发中的应用[C]//铸件质量控制及检测技术委员会第十一届学术年会.天津市第十届铸造学术年会论文集.天津,2016:150-154.
- [11] GOLOZARA M A, NAIIFI-ZADEH A. Structural and mechanical characterization of austempered Cu-Sn ductile iron alloys[J]. Journal of Engineering, Islamic Republic of Iran, 1992, 5(1-2): 39-48.
- [12] 王世全. Sn用于厚大珠光体球墨铸铁合金化的尝试与实践[C]//2015重庆市铸造年会论文集.重庆,2015:116-117.
- [13] 张文超,刘晓烈,邹荣.珠光体球铁锡、铈复合处理试验研究[J].热加工工艺,2011,40(7):51-53.
- [14] RIBEIRO B C M, ROCHA F M, ANDRADE BM, et al. Influence of different concentrations of silicon, copper and Tin in the microstructure and in the mechanical properties of compacted graphite iron[J]. Materials Research, 2020, 23(2): 1-10.
- [15] 李贵仁. Cu、Sb改性球墨铸铁的微观组织及性能研究[D].长春:吉林大学,2009.