● 工艺技术 Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.06.009

控制冷却工艺生产奥铁体球铁的探讨

徐 航,龚文邦,彭亭涛,李 冲

(武汉纺织大学 机械工程与自动化学院,湖北 武汉 430200)

摘 要:论述控制冷却工艺生产奥铁体球铁的研究现状及特点,分析冷却速率和等温时间对奥铁体球铁生产的影响,通过控制冷却工艺制备了奥铁体球铁,并探讨了该工艺的应用前景。结果表明,奥铁体组织中存在少量的珠光体,抗拉强度达到了 1 020 MPa,伸长率为 4%。

关键词:控制冷却工艺;冷却速率;等温时间;奥铁体球铁

中图分类号:TG255 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)06-0552-04

Discussion on the Production of Ausferrite Ductile Iron by Controlled Cooling Process

XU Hang, GONG Wenbang, PENG Tingtao, LI Chong

(College of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

Abstract: The research status and characteristics of controlled cooling process for the production of austenitic nodular iron were discussed. The influence of cooling rate and isothermal time on the production of austenitic nodular iron was analyzed. The austenitic nodular iron was prepared by controlling cooling process, and its application prospect was discussed.

Key words: controlled cooling process; cooling rate; isothermal time; ausferrite ductile iron

奥铁体球铁是通过等温淬火热处理使球墨铸铁基体组织转变为针状铁素体和高碳奥氏体组成的奥铁体,允许少量其他组织(如马氏体、碳化物)的存在[1]。因其具有高强度、断裂韧性、疲劳强度、优越的耐磨抗磨性、吸震性能好等优点,可用于替代锻钢件和普通球铁不能胜任的关键零件,是一种很有发展前景的工程材料。但是由于其主要生产方式(盐浴等温淬火热处理)能耗大、周期长,如果处理不当,还会对环境造成一定的影响,所以开发一种新工艺生产奥铁体球铁材料具有重要意义。采用控制冷却工艺替代盐浴等温淬火热处理工艺生产奥铁体球铁的工艺流程是:将球铁铁液浇注至铸型中,通过测温仪器实时检测试样温度,让试样温度降至奥氏体开始形成的温度以上,在等温环境中快速打箱,再将试样置于冷却装置中,采用特定的冷却方式,以避免产生珠光体的冷却速率使试样各部位快速冷却至适当的温度并等温保温一定的时间,然后取出试样并空冷至室温,最终得到基体组织为高碳奥氏体和针状铁素体组成的奥铁体组织。通过浇注后控制冷却过程,获得奥铁体组织,缩短了生产流程,提高了生产效率,是奥铁体球铁生产的一种新的途径。

1 控制冷却工艺的研究现状及特点

1.1 控制冷却工艺的研究现状

此前,由于检测及控制技术方面的制约,我们既不能准确获取铸件冷却过程中各部位的温度变化情形,也没有办法控制铸件各部位的冷却速率,因此无法进行深入研究。而随着科技迅速地发展,高精度的测温仪器和冷却速率可控的设备的相继问世,铸件凝固后冷却条件对其性能影响的控制得以实现。几年前,美国铸造协会与 Missouri 科技大学合作开展了一项课题为“采用控制冷却工艺生产高强度铸铁件”的研究工作,通过控制冷却工艺替代等温淬火热处理,在铸态下制得了基体组织为奥铁体的球墨铸铁[2]。虽然基体组织中含有少量比较细小的珠光体,但是其力学性能比较优良,抗拉强度可达到 1 050 MPa,伸长率能达到 5%。验证了采用控制冷却工艺替代等温淬火热处理工艺生产奥铁体球铁的可行性。

目前,控制冷却工艺还处于试验研究阶段。由于实验条件及经验方面不足的限制,在研究控制冷却

收稿日期:2018-11-22

作者简介:徐 航(1992-),湖北荆州人,硕士生.研究方向:金属材料及材料成型过程控制技术.电话:13419601326,E-mail:286931268@qq.com

工艺对奥铁体球铁组织和性能影响方面并不是很全面，通过控制冷却工艺生产奥铁体球铁在实际生产中仍有许多难题需要攻克。因此，围绕控制冷却工艺的研究，后期还需要对奥铁体球铁成型过程进行数值仿真技术的应用，并建立和完善控制冷却工艺的一般设计准则。同时也需要设计适用的设备以及不断优化其工艺路线，加快推进控制冷却工艺在奥铁体球铁生产中的实践和应用。

1.2　控制冷却工艺的特点

现代先进制造行业提倡节材减能、减重降耗、长寿环保等可持续发展原则，采用控制冷却工艺生产奥铁体球铁正好能满足此类要求。控制冷却工艺具备的特点：能制备出与盐浴等温淬火热处理性能相当的奥铁体球铁；与盐浴等温淬火工艺相比，控制冷却工艺避免了再次奥氏体化和等温保温两道工序，降低了能耗，缩短了生产流程，提高了生产效率；盐浴等温淬火热处理需要在有足量硝酸盐的盐池中等温，如果处理不当，会对环境造成一定的影响，而控制冷却工艺采用水和空气冷却取代等温淬火工序，清洁环保。

2　控制冷却工艺的影响因素

2.1　冷却速率

控制冷却工艺中的冷却速率对奥铁体球铁的微观组织和力学性能会产生显著影响。图 1 所示，曲线 1 是处于奥氏体区域温度的球墨铸铁采用空气的连续冷却过程，由于冷却缓慢，过冷度低，所以转变开始和结束的温度都比较高，奥氏体组织最终转变为珠光体；曲线 2 为采用强制流动的空气的连续冷却过程，虽然过冷度有所增加，但是冷却仍然缓慢，奥氏体最终转变为托氏体；曲线 3 是采用控制冷却工艺生产奥铁体球铁的过程，试样通过快速冷却至马氏体转变温度之上，然后开始等温保温过程。起初奥氏体没有发生变化，经过一短暂孕育期后，针状铁素体从未反应的奥氏体中形成并生长，随着针状铁素体的生长，所排出的碳向奥氏体扩散，从而增加奥氏体含碳量[3]。经过等温保温一段时间后，针状铁素体继续长大，更多的碳扩散到邻近的奥氏体中，最终形成高碳奥氏体和针状铁素体混合而成的奥铁体组织；曲线 4 表示采用水的连续冷却过程，此时冷却速度很快，过冷度很大，奥氏体直接过冷到范围转变为马氏体。因此，采用控制冷却工艺生产奥铁体球铁，选择合适的冷却速率对获取合格奥铁体球铁至关重要。

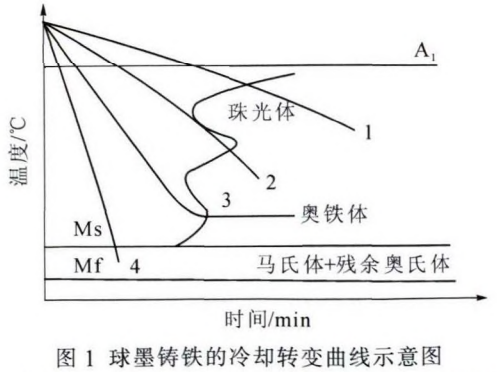


图 1　球墨铸铁的冷却转变曲线示意图

Fig.1　Schematic diagram of cooling transition curve of ductile iron

处于奥氏体区域温度的球墨铸铁采用不同的冷却速率冷却至同样的等温温度并保温，最终空冷至室温后得到的微观组织，如图 2 所示。当冷却速率达到 2 ℃/s 时，试样组织中才开始生成奥铁体，而冷却速率到达 10 ℃/s 时，组织会发生不希望的马氏体转变[4,5]。实验研究表明，采用 2 ℃/s 的冷却速率所获取的奥铁体组织中还存在一部分细小的珠光体组织，将会影响奥铁体球铁的力学性能。所以综合考虑后，目标冷却速率定在 3 ℃/s 以上 10 ℃/s 以下。采用此范围内的冷却速率才能获取所需的奥铁体组织。

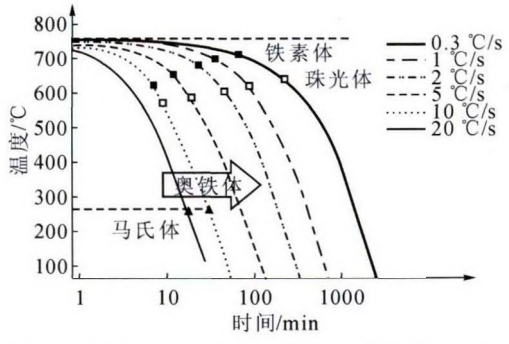


图 2　不同冷却速率下球墨铸铁组织转变示意图

Fig.2　Schematic diagram of microstructure transform of ductile iron under different cooling rates

2.2　控制冷却等温过程

控制冷却工艺制备奥铁体球铁的过程中，不同的等温保温时间也会影响奥铁体球铁的组织和性能。若等温保温时间不足，试样组织中奥氏体反应不充分，其碳含量会比较低，此种奥氏体在室温是稳定的，但受到外力作用时会转变为马氏体组织；而等温保温时间过长，试样组织中的高碳奥氏体将会分解出严重影响奥铁体球铁伸长率和韧性的碳化物；因此选用适当的等温保温时间，是获取理想奥铁体球铁的必要条件。研究表明，如果等温保温时间为 1.5～2.0 h，组织中将有更多的碳扩散到奥氏体中，这一时期的奥氏体碳含量可达到 2%左右。这种奥氏体在室温时，热力学和力学上都是稳定的，这才是

获取合格奥铁体球铁所期望的奥氏体组织。

3 控制冷却工艺的设定及实施

3.1 试验材料与方法

试验所用原材料为生铁、废钢以及回炉料。铁液采用中频感应炉熔炼，出炉温度为1 510 ℃，经球化和孕育处理后，其主要化学成分见表1，浇注至100mm×200 mm×20 mm板状湿型砂砂型中，浇注温度为1 350～1 380 ℃。

表1 试验用球铁的主要化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of ductile iron for test

C	Si	Mn	P	S
3.45	2.35	0.25	0.025	0.01

采用光学高温计实时检测砂型中试样的温度，当试样温度降至950 ℃时，在950 ℃等温环境下快速打箱。然后将试样立即转移到预先处于设定等温温度为350 ℃的控制冷却实验装置(图3)内，让试样在炉内自然冷却；当试样的温度降至850 ℃左右时，通过装置内顶部和底部的两个喷头同时喷射冷空气强化冷却工件架上的试样，使试样快速且均匀冷却，防止组织中奥氏体发生珠光体转变；当试样温度冷却至400 ℃时，停止喷射冷空气，让试样自然冷却；待试样冷却至350 ℃时，开始等温保温过程；由于试样在冷却过程中，心部与表面存在温度梯度，以及组织转变产生相变热，加上对流辐射散热，炉内温度可能变化。若试样温度高于设定等温温度5 ℃时，开始喷射冷空气冷却。当试样温度低于设定等温温度5 ℃时，给实验装置送电加热，使试样温度保持在350±5 ℃范围内；当试样等温1.5 h后，取出试样并空冷至室温，控制冷却工艺如图4所示。

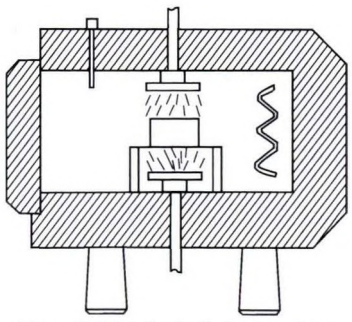


图3 控制冷却实验装置示意图
Fig.3 Controlled cooling experiment device schematic

3.2 试验结果与分析

图5为控制冷却工艺制备的奥铁体球铁金相组织，通过金相分析发现，基体组织除了大部分为奥铁体外，还含有少量的珠光体组织，其原因是试样在控制冷却过程中，过冷奥氏体在通过高温转变区时，由于冷却速率不够，没能完全避开珠光体转变区域，其冷却曲线仍然经过珠光体转变区，使得过冷奥氏体在达到等温温度时已有少量奥氏体发生了珠光体转变。控制冷却工艺获得的奥铁体球铁试样抗拉强度1 020 MPa，伸长率4%。

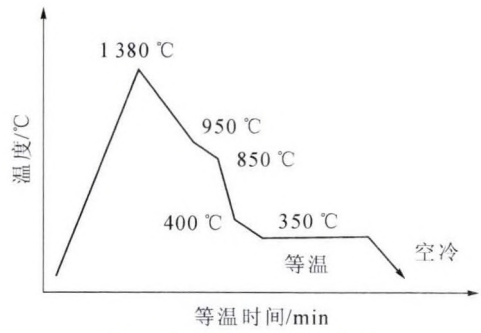


图4 控制冷却工艺示意图
Fig.4 Schematic diagram of controlling cooling process

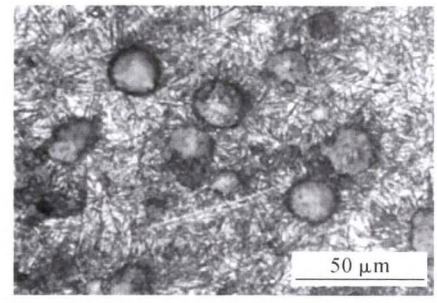


图5 控制冷却工艺制备的奥铁体球铁组织
Fig.5 Controls the austempered ductile iron structure prepared by the cooling process

由于控制冷却工艺制备的奥铁体球铁得到的最终组织为奥铁体+少量珠光体的机械混合物，所以在性能上还不能完全达到等温淬火球铁标准牌号的性能指标，但是验证了控制冷却工艺获得奥铁体组织的可行性。

3.3 控制冷却工艺应用前景

奥铁体球铁是材料和工艺密切结合的产品，适当的改变热处理工艺能够在较大的范围内改变奥铁体球铁的力学性能[6]。随着科研技术的迅速发展，可以通过对球墨铸铁成分和材质要求绘出相应的冷却曲线，连续冷却曲线或等温转变曲线。先根据工件凝固后的冷却条件，实际测定冷却过程中各部位温度的变化，然后采用可控的冷却方式，使工件各部位按设定的冷却速率冷却[2]。若处理得当，就能使工件在冷却过程中各部位的温差减小，且不会发生意外的组织转变，最终能获得目标组织结构。控制冷却工艺与盐浴等温淬火工艺相比，在生产周期，环保、节能等方面都有很大的优势。因此，针对某些奥铁体球铁铸件的性能要求，控制冷却工艺能取代等温淬火热处理工艺，实现奥铁体球铁生产模式的更新。

随着我国铸造产业链的升级和技术的提高，控制冷却工艺将进一步完善及发展应用。同时随着中国经济的迅速增长，将给我国的铸造产业提供更多的机会，为奥铁体球铁的生产与扩大应用提供广阔的应用前景。从技术发展的前景来看，控制冷却工艺具有独特的优点，通过适当的合金化及严格控制冷却过程来获取合格的奥铁体球铁，有望成为奥铁体球铁生产设计与应用的重要工艺。

4　结论

(1)制备奥铁体球铁的过程中，需严格控制冷却工艺，强化冷却过程，尽量避免组织中奥氏体发生珠光体转变。

(2)严格把控等温时间，避免等温时间不足而生成未充分反应的奥氏体组织，以及等温时间过长而导致高碳奥氏体分解出严重影响奥铁体球铁力学性能的碳化物。

(3)控制冷却工艺生产奥铁体球铁与等温淬火热处理工艺生产相比，能缩短生产流程，提高生产效率，节能减排，同时清洁环保。有望成为生产奥铁体球铁的一种新工艺。

参考文献：

[1] 刘光华. 等温淬火球铁(ADI)基本知识[J]. 中国铸造装备与技术，2007(6):65-67.

[2] 曾艺成，李克锐，张忠仇，等. 等温淬火球墨铸铁研发工作的进展与发展趋势[J]. 铸造，2017，66(9):940-947.

[3] 赵月. 等温淬火工艺对 ADI 组织和性能的影响 [D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2015.

[4] Lekakh S N. High strength ductile iron produced by engineered cooling：process concept [J]. International Journal of Metallcasting, 2015, 9(2)：21-30.

[5] Mendez S, U de la Torre, Larranaga P, et al. Processing thickness window for as-cast ausferritic castings [J]. AFS Trans, 2015(123)：219-226.

[6] 张云，龚文邦，刘欢. ADI 研究应用前景探讨[J]. 铸造，2014，63(5):439-443.

2019年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，月刊，1979年创刊，中国铸造协会会刊，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855，中国标准刊号：ISSN1000-8365/CN61-1134/TG。

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、应用技术、生产管理经验及信息和铸造设备，覆盖铸铁、铸钢和有色合金等铸造领域，包括砂型铸造以及熔模铸造、金属型铸造、消失模铸造和压铸等特种铸造技术。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、特种铸造、装备技术、实用成型技术、材料改性、材料开发、材料保护及表面工程、材料失效分析、应力控制与理化测试技术、今日铸造等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造原辅材料、铸造设备、熔炼设备、热处理设备、环保设备、检测仪器以及铸件生产、科研成果转让、企业形象宣传等相关广告。

订阅方式及价格：

请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年12期，每期定价18元，平寄全年216元（含邮费），挂号全年252元，快递全年336元。中国香港、澳门：每期定价36HKD，全年432HKD。

海外：每期定价18美元，全年216美元。

银行汇款：

户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行

邮购地址：西安市金花南路5号西安理工大学608信箱（710048）　　微信扫一扫 信息快知道

联系人：李巧凤　　电话/传真：029-83222071

网址：www.zhuzaojishu.net　　E-mail：zzjsyz@vip.163.com