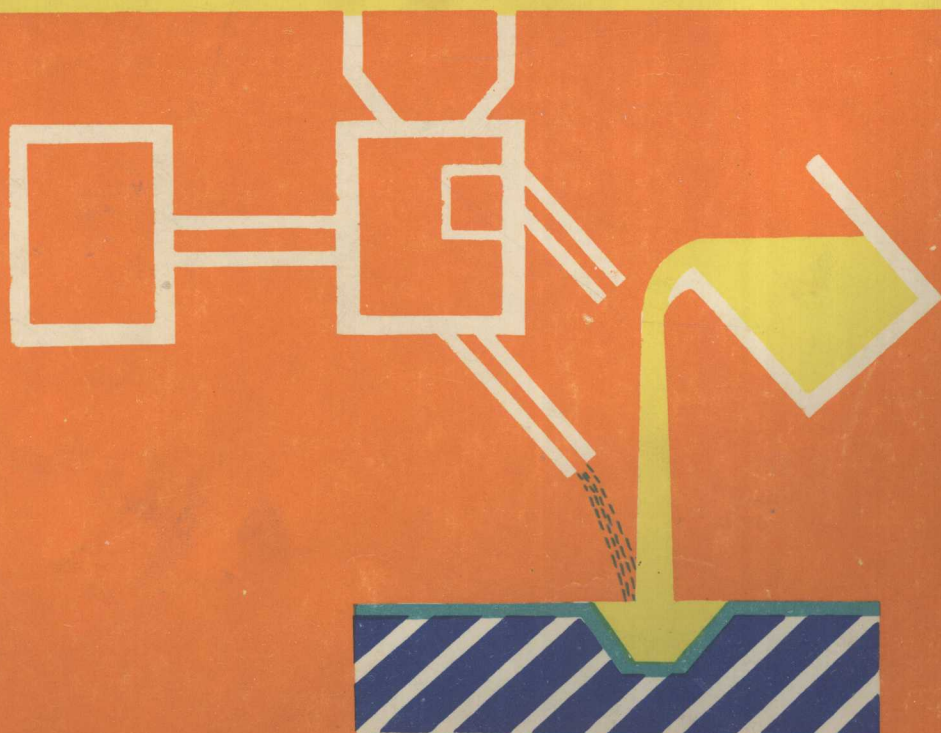




灰铸铁与球墨铸铁 现代孕育的实践

沈阳铸造研究所

编译



注意保存

前 言

本书是1979年在美国召开的铸铁孕育会议上的论文,由AFS(American Foundrymen's Society)—CMI编辑出版。书中回顾了铸铁孕育的发展史,阐述了孕育理论、孕育剂、原材料、生产工艺和在实践中应用效果,内容丰富,理论结合生产。众所周知,孕育是生产铸铁件的关键环节,它能够显著地改善铸件质量、提高性能。为了推动我国铸铁孕育工作的发展,提高产品质量,满足机械工业需要,本着“洋为中用”,故将本书编译出版,供从事铸造、金属材料、冶金等有关专业的科技人员、教育工作者、工程技术人员和工人参考。

本书由机械部沈阳铸造研究所第三研究室部分同志参加编译,崔春方为主校编,参加译文者:崔春方、姜炳焕、梁桂云、孙礼为、高元举、朴东学、刘子安、孙超英、宋量等同志。

熊国庆、朱培钺、王春祺、王泳发、安永德、张毅、马阳林等同志参加了译文校对,并为出版好本书提出了良好建议。唐玉林、梁桂云、姜炳焕、侯维软、徐风云等同志对本书给予了大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于我们水平有限,因此编译本书的缺点错误在所难免,希望读者批评指正。

编译者 一九八三年

序

本次孕育会议与其决议事项是为了解答现时在生产实践中，关于铸铁孕育存在的问题；同时还有铸造金属协会的部分科研成果以增进技术交流。

AFS灰铸铁分会的Ad Hoc孕育委员会准备了下述事项：

- ☆ 对于孕育剂感兴趣的铸造工作者提供了许多知识和经验。
- ☆ 为孕育的最新技术提出了讨论提纲。
- ☆ 本书括含了与会的行业领导者关于孕育方面的一些设想。

委员会成员名单：

Ralph Clark, Chairman
Union Carbide corporation

Norman carter
Chevrolet Div. GMC

Robert Eppich
Dalton Foundry

Alan Fuller
British Cast Iron Research Association

Vern patterson
Foote Mineral and Miller and Co.

Gary Ruff
General Motors Manutacturing Development

Jack wallace
Case Western Reserve Institute

Roy Lobenhofer, AFS Staff

George Goodrich, CMI Staff

目 录

1. 导言——什么是孕育
George M. Goodrich, AFS—Cast Metals Institute
崔春方 译 熊国庆 校..... (1)
2. 孕育的目的 (为什么要孕育?)
V.H. Patterson, Foote Mineral Co. & Miller & Co.
崔春方 译 熊国庆 校..... (6)
3. 什么时候需要孕育
R.A. Clark, Union Carbide Corporation
宋 量 译 高元举 校..... (17)
4. 孕育如何起作用
J.F. Wallace, R.D. Maier, Case Western Reserve University
崔春方 译 熊国庆 校..... (22)
5. 基铁——炉料和化学成分的影响
W.W. Holden, Pickands Mather & Co.
崔春方 译 熊国庆 校..... (37)
6. 原铁水——熔炼工艺的影响
A.F. Spengler, Miller and Company
孙超英 译 姜炳焕 校..... (49)
7. 孕育剂的选择和少量加入的理由
J.V. Dawson, British Cast Iron Research Association
朴东学 译 胡永发 安永德 校..... (59)
8. 孕育衰退
A.G. Fuller, British Cast Iron Research Association
梁桂云 译 朱培铨 校..... (72)
9. 孕育丝——工艺规范报告
D. Sanders, Caterpillar Tractor Co.
刘子安 译 高元峰 校..... (99)
10. 用于制造铸管的特点孕育技术
E.E. Langner, American Cast Iron Pipe company
姜炳焕 译 张毅 校..... (122)

11. BCIRA研制的铁水流后孕育
G.F. Sergeant, British Cast Iron Research Association
刘子安 译 高元举 校..... (126)
12. 固体嵌铸块孕育
R.E. Eppich, Dalton Foundries, Inc.
孙超英 译 姜炳焕 校..... (141)
13. 型内孕育消除球墨铸铁白口
W.Dell, Deere & Co.
崔春方 译 熊国庆 校..... (149)
14. 孕育的控制——加多少? 用多大粒度? 何时加入?
J.Briggs, R.W. Newman, M.D.Bryant, Foseco, Inc.
姜炳焕 译 马阳林 校..... (163)
15. 化学成份、冷却曲线和激冷试验方法控制孕育处理
C.E.Bates, Southern Research Institute
孙礼为 译 王春祺 校..... (189)
16. 铸铁孕育的发展趋向
N.P. Lillybeck, Deere & Company
高元举 校 崔春方 校..... (202)

导言—什么是孕育?

George M. Goodrich
Managing Director
AFS—Cast Metals Institute
Des Plaines, IL

提 要

本文介绍孕育的概念,并作为整个会议的序言。这次特定的会议,给铸造工作者提供了有关孕育和孕育过程中材料诸方面最新知识及技巧。

约在最近五十年之久,铸造工作者一直用特殊“材料”加到铁水中作为生产用户所要求性能的铸铁件的整个过程的一部分。这些材料称为孕育剂,加入方式称为孕育。在此五十年期间,孕育特别成为灰铸铁和球墨铸铁近代铸造过程整体的组成部分。

近五十年中,孕育技术经历了重大的发展。各式各样的孕育剂和孕育技术表明了上述的活动情况,随着铸造工作者能够生产较好而一致铸件的水平的发展,用户对高质量铸件的要求也增高了,其结果铸造工作者要求从孕育剂得到更多的好处,并谋求较深入的了解孕育过程。

导 言

孕育应用于铸铁是不易下定义的。但是最好的尝试可以简短的概括为两种不同的陈述方式:(1)后期加入一定量的硅合金到铁水中,以改变石墨分布,改善机械性能和减少白口,这并不能以硅的成份变化为根据来加以解释;(2)一种确信凝固按奥氏体—石墨系进行的过程²。

除了许多孕育的定义外,文献¹对孕育机理作了许多解释。虽然篇幅不允许讨论所有的理论,但是可以归纳为以下六种基本理论:

1. 硅酸盐——杂质学说

此学说的依据是加入硅孕育剂能产生大群的核,或氧化硅、或硅酸盐作为凝固的晶核而产生A型石墨,

2. 气体学说

因为硅和添加合金中的其它元素都是脱氧剂，故可认为合金的加入，使氧含量减少而影响到微观组织的变化。在文献中也提到分布与氮和氢有关。

3. 过冷理论

这是一种广泛的核学说，此理论证明D型和E型石墨铸铁（并称为‘变态铸铁’，）是凝固时过冷的结果。由后期添加合金所引起的生核防止出现过冷，从而产生合乎要求的散乱分布的A型石墨。

4. 石墨核理论

此理论认为，加入硅引起局部石墨核心的析出而形成片墨。为了支持这一思想，主张直接加入石墨用来孕育铸铁。

5. 碳化物稳定学说

本学说表明，改变碳化物的稳定性会影响片墨形成时碳的可用性，因而影响石墨片的大小和形状。此学说所依据的实事是孕育伴随着白口的减少。

6. 表面张力 and 表面能学说

该理论认为孕育影响石墨的大小和形状，是因为从石墨——金属面上提供或除去某种吸附物质，结果使表面能发生变化，因而促使某种形状石墨的产生。

对孕育历史感兴趣的任何人，可参阅文献3。

文献评论和总结

1920年以来，评论孕育的文献都提到孕育过程深入的了解，确认孕育从一种技巧变为一种科学。在二十年代中期到末期的资料中，介绍了液体金属中后期加入硅铁可以得到质量一贯好的铸铁。在三十年代末期和四十年代初期，研究者们描述了包内孕育对凝固的作用⁴。四十年代末期，球墨铸铁的问世使孕育的研究工作得到了新的发展。五十年代末和六十年代初的研究工作^{1、5、6}，表明硅铁中少量的钙和铝是影响孕育的有效成份。六十年代末期也已曾研究了铸铁的化学成份对孕育的影响。

六十年代末期，文献中出现了钡、锶等材料对孕育的影响。七十年代初，当研究者开始研究原材料对孕育的作用⁴和孕育工艺^{1、10}时，孕育的研究变得更富有经验。同样七十年代初，也曾广泛研究了孕育剂和孕育方法的效果与时间的关系¹¹⁻¹⁴。从七十年代初至今，研究工作的发展能较深入地认识到铸铁冶金和凝固现象以及孕育对这些方面的影响^{3、15-24}。

“孕育”一词是指工艺影响凝固和所形成的析出相。关于孕育，在这方面需要强调一点，如同人们评论文献一样，即研究工作者形成一种印象，认为他们的目的是消除影响（孕育的影响不是恒定的而是随时间而衰退），这一目的的必要性是很明显的。如果不考虑时间的影响，孕育过程应当是简单的合金化步骤。然而铸造工作者，必须认识

到，对孕育的要求是生产出一贯优质的铸件，直到满足上述要求为止。剩余的困难是在一定铸造条件下决定采用何种孕育剂和孕育工艺以及加入量多少。

孕育剂加入的量是每吨铁水 4~10 磅，并且取决于孕育剂的化学成份和加入孕育剂的技术。由于过程中有许多变量，铸造工作者需要知道铸铁生产过程中有关上述重要操作的细节。不同的各点简短概括如下。

孕育

目的：

孕育的主要目的是为了改善铸件的机械性能。当然，为了达此主要目的，还会出现许多其它的次要目的，这些次要的目的可包括凝固时石墨的生核，减少白口生成的倾向，增加共晶团数目，防止过冷提高过程的一致性。所有这些次要的目的，一定有助于改善机械性能。但是，这些次要的项目都是相互依存的并主要与凝固特性有关。随着这次会议的进行，对孕育的目的将有较深刻的认识。

实践：

为了达到要求的目的，孕育作用本身必须具备一致性。因为有许多不同的孕育技术，在本次会议的进程中将讨论这些孕育的实践问题。然而，所有近代孕育技术的共性是一致的。孕育剂必须在浇注前直接加入金属液中，并在孕育的过程中它必须同金属液彻底混合。为了把孕育剂加入铁水中，发展了许多新工艺，其中包括加在铁水包内、浇注时加在液流中和加在浇注系统中，并在充填铸型时完成整个孕育过程。也发展了许多不同的孕育材料，来补充不同的孕育方法以及解决不同铸造条件下的特殊问题。这些材料之间的异同及使用时的规范也将在本次会议中加以讨论。

结果：

好的孕育实践包括两个方面：使用合适的孕育剂和孕育工艺。确定这种实践的结果是生产出具有正确微观组织的铸件，并使铸件达到用户所要求机械性能。根据对最终产品的工程要求用户的要求一定是各式各样的。但是，孕育可改善灰铸铁石墨组织、增加共晶团数和球铁中石墨球数和铁素体量（铁素体球铁）以及控制这两种铸铁的白口形成。达此目的的程度，也要依赖工艺条件、材料种类和铸铁最终的化学成份。因此，本次会议将重点讨论工艺方法、技术和材料。

会议的目的：

本次会议目的是使每个与会者了解孕育技巧的现状、使用的原材料、孕育技术和孕育的必要性以及孕育工艺将来可能发展的方向。与会者不仅能够倾听专家们的报告和讨论他们有关知识，同时也能够同铸造工作者一起分享经验。希望与会者吸取这儿专家见解的长处和提供宝贵知识，还希望与会者利用这次机会同别人一起分享经验。铸造工作者老是一直希望相互帮助，这次也是无例外的。

崔春方 译

熊国庆 校

参 考 文 献

1. N.C. McClure, et al "Inoculation of Gray Cast Iron", AFS Transactions, VOI, 65, 1957, pg, 340—351.
2. Dan krause, GIRI, Colmbus, OH—Private communications.
3. V.H. Patterson, M.J. Lulich, "Fifty years of progress in the Inoculation of Cast iron", 44th International Foundry Congress.
4. J.T. Eash, "Effect of Ladle Inoculation on the solidification of Gray Cast Iron", AFS Transactions, VOI.49, 1941, pg, 887—910.
5. D.D. McGrady, et al "Hypoeutectic Gray Cast Iron Ladle Additions", AFS Transactions, VOI.68, 1960, pg, 569—578.
6. W.C. Filkins, et al, "Gray Iron Inoculation and Inoculants Evaluation", AFS Transactions, VOI.72, 1962, pg, 882—895.
7. H.D. Merchant, et al, "Inoculation Influence on Gray Iron Structure at Various Carbon Equivalences", AFS Transactions, VOI.69.1961, pg.241—248.
8. V.S. Radya, G.G. Mikhailova, "Influence on Barium Alloy of the Stability of the Effect of Inoculation", Russian Castings Production, Dec, 1966, pg, 563—573.
9. J.C. Margerie, "Some Advances in the science of cast Iron Solidification", AFS Transactions, Vol.78.1970, pg, 281—286.
10. C.L. Tuggle, et al, "Factors Influencing the Effectiveness of Late Inoculants", AFS Transactions, VOI.78, 1970, pg, 343—349.
11. G.N.Rao, P.K. Gupte, "Inoculation of Cast Iron", NML Technical Journal, Vol.13, Feb, 1971, pg, 19—26.
12. V.H. Patterson, "Inoculants Can Improve Gray Iron properties", Foundry, VOI. 100, June 1972, pg, 68—71.
13. V.H. Patterson, "Inoculants for Gray and spheroidal—Graphite Iron—Their Use and Effect", Foundry Trade Journal, July26, 1973, pg, 268—277.
14. A.Moore, "Some Factors Influencing Inoculation and Inoculant Fade in Flake and Nodular Graphite Irons", AFS Transactions, VOI.81, 1973, pg, 268—277.
15. A.Moore, "Some Recent Advances in the practice and understanding of Inoculation", Institute of British Foundrymen, VOI.LXVII, 1974, pg, 59—69.
16. J.F. Wallace, "Cast Iron Solidification", Electric Furnace Proceedings, VOI.32, Pittsburg, 1974
17. R.Hummer, "Some Aspects of Inoculation of Flake—and Nodular

Graphite Cast Iron" , The Metallurgy of Cast Iron, Georgi Publishing, st, Saphorin, Switzerland, 1974, pg. 147—159.

18. H. Fredriksson, S.E. Wetterfall, "A study of Transition From Undercooled to Flake Graphite in Cast Iron" , The Metallurgy of Cast Iron, Georgi publishing, st.saphorin, switzerlaud, 1974, pg. 277—293.

19. D.J. Swinden, C.F. Wilford, "Review of Factors Influencing Formation of Graphite Eutectic Cells in Gray Cast Iron" , Foundry Trade Journal, April 1, 1976, pg. 491—510

20. H. Fidos, "Inoculation of Cast Iron With Ferro Silicon" FWP Journal, NOV, 1975, pg. 7—12.

21. D.J. Swinden, C.F. Wilford, "The Nucleation of Graphite from Liquid Iron: A Phenomenological Approach" , Institute of British Foundrymen Vol. LXIX, 1976, pg. 118—127.

22. G.F. Ruff, J.F. Wallau, "Control of Graphite structure and its Effect on Mechanical Properties of Gray Iron" , AFS Transactions Vol. 84, 1976, pg. 705—728.

23. V.H. Patterson, Inoculants for Gray and Spheroidal—Graphite Iron—Their use and Effect part 1" Castings, March—April, 1976, pg. 16—25.

24. V.H. Patterson—Part 2 —Castings, May—June 1976, pg. 16—34,

孕育的目的

(为什么要孕育?)

V. H Patterson, Consultant
Foote Mineral Company
Miller and Company

提 要

灰铸铁孕育所得到的益处是偶然发现的。但是，在有限秘密的研究几年后，人们得知灰铸铁的孕育结果。这种由个别铸造人员及一些合金生产厂所引起的大规模研究，带来了高强度灰铸铁件的发展。

观察灰铸铁的微观组织发现片状石墨具有不同的形状和大小。实际的试验表明，机械性能和基体组织与铸件中片状石墨的类型密切相关。

以上观察的结果，发展了许多孕育剂。这些孕育剂正常地加入铁水包中时，能够有效地控制灰铸铁中片状石墨的类型和大小。

现在孕育剂有规则的加入工程材质中，能使之产生石墨析出的核心。生核不仅使铸件获得所要求的石墨类型，同时也使白口减至最小限度。后者使灰铸铁得到满意的加工性能至关重要。很多工厂在铸铁中加入孕育剂仅是为了控制白口。铸件的加工性能常常要比改善机械性能还重要。

在许多情况下，硫对改善灰铸铁和球铁的孕育甚为重要。但是，许多变量影响硫的重要作用，这就说明不同的铸造工厂得到不同的结果。

引言和孕育简史

也许很多铸铁工作者早在二十世纪初期就观察到在铁水中包中加入不同的材料所得到的益处。但是，当时交流铸造工艺还不多。因此，一些实际经验是保密的。例如 Sanders 和 Gould 合编“金属铸造史”一书时，Sander 收集材料中发现一些有用的情报⁽¹⁾。在第一次世界大战时，许多德国铸铁工作者报导了用硅和从铸造厂熔化工段的

铁桶内收集的铁屑作为生产铸铁炉板的浇包添加剂。他们发现这种细屑不仅使炉板边缘的白口减少,而且铸件内也产生紧密的组织结构。另外一些欧洲的铸造工作者,将一些蜂蜡、模型蜡、蜡烛头和其它类似的挥发材料加入铁水包中。其它的实践是用绿树枝搅拌金属而使金属混合及纯化。另外还有烧焦的棍棒搅拌铁水的方法,使铁水镇静和改善铸铁的加工性能。所有这些技术最大可能地提供了足够的生核条件以防止铸铁凝固时过度过冷。

第一次世界大战以后,许多欧洲的铸造工作者移到美国,并把这些商业秘密随身带来。这些知识作为一种推动力,促进美国铸造工作者进一步研究在铁水包中加入孕育剂来改善灰铸铁的性能。

美国在铁水包中加入孕育剂来控制灰铸铁组织的一些首期研究工作是从 Crosby 从 1922 年至 1982 年间,在印第安那州南部 Bend 的 Studebaker 铸造工厂进行的^[2]。Crosby 的前夥伴 Timmons 报导大约在 1922 年,使用石墨和硅铁的混合物加入铁水包中制造汽车的灰铸铁零件。实际上, Crowsby 企图在出铁水时在铁水包中加入石墨,并发现在高硅的基铁中是很困难的,为此,在冲天炉中熔制低硅基铁,并发现加入石墨较为合适。硅跟随石墨加入铁水中,以达到所要求的终硅量,此方法生产的铸件为珠光体为主基体和 A 型石墨。它们的机械性能优于用其他方法制造的灰铸铁的机械性能。因此,几年来 Studebaker 铸造厂用这样的方法处理冲天炉熔炼铁水制造工程用的灰铸铁件。

在同一时期,另外的许多研究工作者,包括铁水包中加入孕育剂控制灰铸铁的组织,也正在进行。密烘氏 (Meehan) 进行了这样的研究^[3]。他在 1922 年申请了一种制造灰铸铁新方法的专利。密烘氏发现加入硅钙或硅镁到白口铁水中能得到均匀的高强度灰铸铁件。通过白口铁转变为灰铸铁,密烘氏称此方法生产的灰铸铁比其他方法生产的灰铸铁有极大的均匀性,并能达到很高的强度,同时不硬又易于加工。密烘氏采用的孕育方法是在出铁水时将孕育剂加入铁水包中。

根据 Clark 的记载^[4], 20 世纪二十年代,铸造工业中盛行铁水包内加入少量铝以减少铁水氧化程度。他的报导说,在 20 世纪二十年代末期前 Cadillac 汽车铸造厂用少量的铝加入灰铸铁铁水中,以改善铸件的强度和减少铸件中气孔和缩松。Clark 进一步指出,1921 年 Moldenke 报导说,铸铁中加入 0.15% 锆 (Si—Zr 合金),可改善抗弯强度。Moldenke 又指出铸铁性能的改善是由于脱氧的结果。

正同 Clark 报导一样,20 世纪二十年代,高强度灰铸铁用于工程上,特别是用在汽车上,引起极大的重视。但是,铸铁工作者确认并注意铸铁中石墨相的脆弱作用。他们知道细小散乱分布的石墨片的好处。因此花费了大量精力用于寻找控制石墨形状和大小方法。虽然包内加入硅铁或其它镁合金已用于调整铸铁的化学成分和白口倾向,但当时 FeSi 中的铝和钙含量未曾善加控制,因为这些元素对成核的重要性没有认识到。现在,众所周知,控制钙量对减少铸铁中白口并促使得得到均一分布的 A 型石墨是非常有效的。

20 世纪三十年代期间,美国的主要铁合金厂研究室大多数的研究在于发展复合石墨化孕育剂。研究所得结果是改善了硅铁的孕育程度,并发展了许多专利的孕育剂,它们比标准的 FeSi 具有较大的形核能力和较强的抗衰退作用。这种研究工作一直延续到 20 世纪七十年代,而改良的新型孕育剂正在不断地发展。

1948年球墨铸铁诞生后,开始研究的孕育剂常常称谓“后孕育剂”,其目的是为了控制石墨球的分布和尺寸。当时有两种硅铁是可以用的,即75% FeSi和85% FeSi。比较这两种硅铁,其作用相差不大。重要的元素是铝和钙。铝含量在0.8~1.50%;钙含量在0.50~1.10%之间。这两种的任一种孕育剂都能达到良好的效果。鉴于此,85% FeSi就不生产了。现在生产球铁广泛应用的孕育剂是75% Si硅铁。

关于灰铸铁和球铁孕育剂的发展详情可参阅patterson和Lalich的论文[5]。

灰铸铁的微观组织

石墨类型

灰铸铁的微观组织包括以片状石墨形态出现的碳和包围着石墨片的不同类型的基体所组成。将它们叙述于后。

为了研究石墨的金相组织,并便于观察片状石墨,将它分成五种类型(图1)。片状石墨的大小,可分为八组,在放大100倍下测量它们的长度(表1)。

当凝固速度缓慢和达到平衡条件时,出现共晶石墨并成长为A型石墨。片状石墨的大小取决于铸件的壁厚和石墨核心的数目。铸件壁越薄(因而凝固速度越快)和石墨核心越多,则石墨片越小。高强度灰铸铁的石墨,一般为细小A型石墨,它的大小为4~6级(见表1)。孕育剂的作用之一是能够产生足够的石墨核心以保证一定断面铸件中产生最细小的A型石墨。

如果铁水的冷却速度稍大一些和核心数目太少,对于凝固平衡条件而言,便将产生过冷作用。当此种情况发生时,铸铁的凝固将比平衡凝固温度低,此时出现B型或菊花状石墨。具有B型石墨的灰铸铁,一般不像同一化学成分又同一断面具有细小A型石墨那样强韧,特别是在亚共晶成份($C+Si/3$ 小于4.3%)灰铸铁中更是如此。

在同一断面中,如化学成分相同,凝固速度比产生B型石墨稍快,则产生较大的过冷,并出现D型石墨。此类石墨已知为枝晶间的,而且常常在基体中伴生着围绕D型石墨的大量铁素体。从强度的观点看,不希望铸铁中出现这样的组织。

表2所示实例为试棒(直径1.2吋)碳当量3.8%的灰铸铁的抗拉强度的影响。

毫无疑问,基体对抗拉强度的影响是很大的。但在表2所示实例中,因为2和3试样中石墨类型使基体中出现铁素体,所以抗拉强度降低。在2和3试棒中进行适当孕育,凝固时将产生细小A型石墨,并伴随产生珠光体,或者出现较高强度的基体。

C型石墨产生在过共晶灰铸铁成分中($C+Si/3$ 大于4.3%)。具有这种石墨片的铸铁抗拉强度很低,(15,000~20,000磅/吋²)。在强度不是主要的场合、最好采用这种铸铁的化学成份,因为它具备优良的铸造性能和加工性能。它特别适用于制造机座部件,因为它具有消震能力(能够吸音和减震),它还是优良的锻模材料,或者用于重复加热和冷却的部件上,因为它的弹性模数低。

E型石墨,一般较大冷却速度产生强亚共晶铸铁成份($C+Si/3=3.3\sim3.5\%$)中。在此种化学成份的铸铁中,当达到共晶温度时,仅有少量残余的金属液凝固。而且残留的金属液只在凝固方向排列成行的许多奥氏体枝晶之间凝固,因此,石墨以优先定

向方式析出，而D型石墨亦是以定向方式析出。

E型石墨，从机械性能的观点出发像D型石墨那样是不好的。适当孕育的强亚共晶铸铁能产生细小的初生树枝状奥氏体，其位向较散乱。

灰铸铁中的基体组织

通常出现在灰铸铁中的组织有6种，这些组织包括铁素体、珠光体（粗大和细小的）、针状组织、回火马氏体、游离碳化物和珠光体的混合物。在某些含有大量镍的高合金铸铁中基体组织为奥氏体。

铁素体是最弱的基体组织。能出现在灰铸铁、球铁和可锻铸铁中。一般情况下，凝固后慢冷有利于铁素体形成。固态快冷，或者辅加合金元素，如镍、铜、锡和钼等，有助于形成粗大的或细小的珠光体，这取决于冷却速度和加入的合金量。

冷速越大，则珠光体越细，同样合金元素加到一定程度，将增加细珠光体的数量和分散度。更大的冷却速度及加入大量的一定合金元素能促进马氏体的形成。马氏体是一种强硬的脆性转变组分，在 $700\sim 800^{\circ}\text{F}$ 回火后，可使之韧化。针状组织或贝氏体组织，外貌有点似针状，若采取特殊的热处理，它可以在灰铸铁、球墨铸铁和可锻铸铁中产生。但是，在一般情况下，采用加镍、钼得到。铜和钼适当的配合，也可以在铸铁中得到针状组织或贝氏体组织。针状组织是强、硬而韧的，它不像马氏体组织那样，采用适当的刀具是可以加工的，但是也很困难。渗碳体和珠光体或马氏体的组合（取决于铁中合金含量）是白口铸铁的典型基体组织，它硬脆而抗磨。

奥氏体是镍等于或大于6%，一般还与其它合金元素如铬和铜相配合的合金铸铁的基体组织。通常奥氏体是软而韧具有中等的抗拉强度的组织。它易于承受加工硬化使之硬和强度增加而引起脆性。

不管铸铁的基体组织如何，其碳素以石墨形式存在时，将趋向于降低铸铁的抗拉强度，取决于石墨的形状和大小，主要的机械和物理性能可改变50~60%，因此控制石墨是非常重要的。采取正常的孕育方法是易于达到这种控制目的。

孕育的目的

通常认为，灰铸铁凝固时，碳是从铁液中沉析在其中现有的核心上。如果有足够的核心存在，碳建立在已有的核心上而不会形成新的核心。孕育的作用之一是通过加入铁液中的孕育剂来增加使碳析出的核心数目。这样可以出现更多的A型石墨质点，其平均尺寸要比不进行孕育的小。换言之，铸铁孕育的原因之一是建立大量的核心。图2a和b表明核心对灰铸铁石墨结构的影响^[8]。在图2b中，有三个核心，在图2b中仅有一个核心。这个图清楚地表明，更多的核心有助于形成A型石墨，倘若核心太少，则产生过冷，而形成D型石墨（图2b）。

灰铸铁孕育的另一个原因是为了控制白口的大小。特别是在低碳当量情况下更为重要。因为这种铸铁的硅量一般偏低，在共晶温度时，石墨析出缓慢，这就使得铸铁在生核开始之前出现相当大的过冷。常常由于过冷度很大，任何石墨都没有时间析出。于是

碳和铁结合变成碳化铁，而使铸铁产生极大的白口倾向。适当的孕育可以减少或消除白口，并取决于孕育剂用量、铸铁的化学成份和凝固速度。图3表示碳当量为4.3%孕育灰铸铁的两种白口试样的组织。试样顶部凝固速度最慢，出现A型石墨，甚至铸铁经孕育也是如此。在这些白口试样中，为了清除白口并得到更多的A型石墨，就需要大量的孕育。自然，进行适当的孕育能产生大量的核心，使凝固速度变慢、因而达到平衡的凝固条件。每个核心形成时，放出结晶潜热使铁水升温而降低了凝固速度。

消除铸件的白口不仅改善机械性能，同时也改善加工性能。此外，白口性脆，使用时容易断裂。

灰铸铁孕育的第三个原因是为了控制石墨的结构。大多数使用的灰铸铁都要求A型石墨。工程中用的大量灰铸铁也需要A型石墨，并保证铸态是珠光体基体。如果B型或D型石墨出现，通常基体中有一些铁素体。这不仅使铸件变软弱，而且耐磨性也低。铸件的基体是铁素体+珠光体时，加工后的铸件表面比均一的组织表面要粗糙。具有珠光体和铁素体混合基体组织的铸件，其表面光洁度低劣，这是由于铁素体和珠光体之间强度不同，因此影响到加工时对切削刀具的阻力。

不同类型的石墨对于4.3%碳当量的灰铸铁强度的影响如图3所示。这些数值是从 $\phi 1.2$ 吋标准试棒加工出来的试样上所测得的。图4和图5表明孕育处理对4.3%碳当量灰铸铁石墨组织的影响。图4是未进行孕育的铸铁，因此出现D型石墨；图5是用0.2%专利孕育剂孕育的铸铁，出现A型石墨。

在韧性或球墨铸铁中，足够的石墨核心以防止过冷，正如灰铸铁一样是重要的。若没有适当的核心就会出现碳化物，结果造成铸件的韧性和机械加工性差。此外，碳化物随后分解而形成的石墨形状是不规则的，某些情况下，其外貌如同没有足够合金处理的铸铁一样。适当的孕育由于有足够的核心，防止了这些条件的产生，而有利于凝固正常进行。通常球铁中生核程度越大，则球墨数量越多，尺寸越小和越均匀，凝固时产生碳化物倾向也小。除型内球化以外，若要制造出铸态符合性能要求的球铁，正确和适当的孕育处理极为重要。

图6和图7表明孕育对球铁组织的影响。图6是未孕育的球铁，因此出现相当多的初生碳化物，而图7表示适当的后孕育没有初生的碳化物出现。

有趣的是，从图6中可以看到不规则形状的石墨，这是初生碳化物凝固后分解而成的退火碳。此类石墨片不应当同蠕虫状石墨相混淆，后者通常是同球化合金不足有关。

通常在薄壁球铁件的情况下（ $1/4$ 吋或更小），因为它冷却很快，就是有足够的孕育，在铸态组织中也可能会出现初生碳化物。特别在孕育处理后9分钟至浇包内铁水全部浇完为止的期间更是如此。如果孕育处理的一包铁水浇往几个铸型往往出现上述现象。换言之，孕育处理效果随时间而消逝，因此用正常的孕育处理辅之适当的型内孕育方法，可以弥补上述弊病。

图8和图9表示型内孕育对 $1/4$ 吋壁厚铸件组织的影响。图8的铸铁是用1%的75% FeSi包内孕育的。图9表示用和图8相同成份的铸铁同75% FeSi在包内孕育（用量为1%）后再型内孕育。与图8相比，图9的铸铁没有出现碳化物，有较多的石墨球和大量的铁素体。

硫对铸铁孕育的影响

铸铁中过低的含硫量可产生软性和硬性的灰铸铁件。最好灰铸铁的硫含量应在0.06~0.12%范围内，并与足够的锰化合形成硫化锰，这使灰铸铁更适合于孕育处理。显然，灰铸铁中硫化锰的出现有助于生核。如果硫量太少，能出现过冷。取决于过冷度，铸件能够达到低于或高于所要求的硬度。过冷度越大，则铸铁中碳化物含量越多，因而硬度高和加工性能差。

图10选自 Alfred Boyles 的著作⁽⁶⁾，此图表明硫对孕育灰铸铁的组织是有利的。此著作中基铁的成份是3.5% C和2.00% Si。在图10a中，铸铁不含硫。注意D型和A型石墨的形成。由于缺乏足够的核心用以阻止过冷而产生D型石墨。大块白色区域是铁素体，并伴随D型石墨。这样组织的灰铸铁硬度和强度都低。图10b表示加入0.076% S的影响。片状石墨变成A型石墨，基体组织又是100%珠光体，这样组织的铸铁比图10a所示的铸铁强硬而韧。灰铸铁中硫的有利影响后来也被 Wollace 和 Mnzumder 所证实⁽⁷⁾。

许多因素影响硫在灰铸铁中的重要作用，因此，有些铸造工作者用低硫铁也能得到满意的金相组织和性能。

第一，碳当量似乎与硫的影响有关。在大多数情况中，碳当量越低，则硫在铸铁中含量越要保持在0.06~0.12%范围内。这是合乎逻辑的，因为低碳当量灰铸铁比高碳当量灰铸铁需要更大程度的孕育以防止过冷。

第二，铸件断面尺寸是一个因素。越薄断面的铸件，则要有适当的硫含量和锰含量，薄断面铸件比厚断面铸件凝固较快，因此，要求孕育剂提供较多的核心和合适的硫化锰含量以防止过冷。厚大断面铸件的凝固较接近平衡条件，且对生核程度没有要求。因此，薄断面铸件需要含硫量高。

第三，铸件的浇注温度会影响适当硫量和随后孕育的需要。灰铸铁的浇注温度越高，则凝固速度越慢，如果凝固速度很慢，需要孕育和接受孕育的程度不像凝固速度很快的铸铁那样迫切。因此、高温（2750°F或更高）浇注的灰铸铁不像低温浇注的灰铸铁那样重要，即使对薄断面铸件也是如此。

第四，造型材料对灰铸铁中所需要的硫量也有影响。如果铸型是干型又无水分，在一定的浇注温度下凝固速度比在湿型中要慢。因此减弱了通过最适宜的硫和锰含量来使铸铁对孕育有最大接受程度的必要性。此外，铸型的温度也是一个影响凝固速度的因素。当金属浇到约70°F以下铸型中，其凝固速度比以同样浇注温度的同样金属浇到较热的铸型中要快。因此，浇入冷铸型的灰铸铁，其适当的含硫量范围更为重要，以提高对孕育接受程度，而降低过冷度。

第五，金属的氧化程度会影响对孕育作用的接受程度。氧化程度越严重，就更需要原铁水中含有0.06~0.10%硫和适当的锰与之相化合。在这种情况下，正如提到的其它情况一样，具有正确的硫和锰使铸铁在最少量的孕育剂用量时仍有较好的孕育效果。金属中的氧含量随炉料锈蚀地增加而增加。大气的情况，如高的温度、氧化，因而不利于铸

铁对孕育的接受程度。

因为硫（0.06~0.12%）同适当的锰形成硫化锰，对灰铸铁无害，希望硫保持在这个范围内，以保证在所有的情况下对孕育都有最大的接受程度。为了防止使铸铁变脆的硫化铁的形成，锰是最少应五倍于硫。

在球墨铸铁中，基铁的硫量低呈显出有利的作用。一些研究者，包括 Zalich 和 Hichding 确定了非金属夹杂物（如Mg—Ca 硫化物）对球墨铸铁中球状石墨生核的重要性⁽⁸⁾。图11表示在一个石墨球的中心发现一种Mg—Ca硫化物晶核。球化处理前、在原始铁水中最适宜的硫量为0.005—0.015%。低于0.005~0.015% S时，有时球化不良。

总 结

随着各类工程铸铁的发展，十分必要控制灰铸铁中的石墨形态。包内孕育（铁水包内加入孕育剂），在灰铸铁中能够获得合适的石墨形态和大小，以达到最高的机械性能。同时孕育剂加入适当，在铸件中可以得到最小的白口，以达到满意的机械性能。

自从早期孕育处理发展以来，出现许多孕育剂、它们都有以下作用：

- 1) 建立石墨析出的核心。
- 2) 减少或消除白口。
- 3) 控制石墨结构。
- 4) 改善铸件机械性能。

为了改善铸铁孕育的效果，发现硫的含量为0.06~0.12%和适当的锰量配合，对生产灰铸铁是有利的。球铁的原硫量为0.005~0.015%似乎有助于产生大量的均匀石墨球。发现球墨内的许多核心中都存在Mg—Ca的硫化物。

感 谢

感谢福特矿冶公司 研究和发展部 J.R. Hifchings 先生在准备本文图表中所给予的帮助。

表 1 片 状 石 墨 尺 寸 X100

1 级 (4吋+)	5 级 (1/4吋—1/2吋)
2 级 (2吋—4吋)	6 级 (1/8吋—1/4吋)
3 级 (1吋—2吋)	7 级 (1/16吋—1/8吋)
4 级 (1/2吋—1吋)	8 级 (—1/16吋)

表 2 石墨类型对灰铸铁抗拉强度的影响
(3.8%碳当量，直径为1.2吋试棒)

试棒编号	石墨类型	抗拉强度 磅/吋 ²	基 体 组 织
1	A	38,000	中等粗珠光体