



钱 立 马敬仲 张国臣 编著

ZHUTIEDE YUNYU

北京科学技术出版社

50
9

铸铁的孕育

铸 铁 的 孕 育

钱立 马敬仲 张国臣 编著

北京科学技术出版社

内 容 简 介

本书是系统阐述铸铁孕育技术和孕育理论的专著，内容概括了国内外关于铸铁孕育的研究成果和作者长期的实际经验。全书共分九章，即：孕育通论，孕育剂、孕育方法，孕育效果的检验，灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、可锻铸铁的孕育以及孕育机理等。本书内容系统、全面，注重实际应用。本书可供铸造工程技术人员、研究人员和铸造专业师生参考。

铸 铁 的 孕 育

钱立·马敬仲 张国臣 编著

*

北京科学技术出版社出版

(北京西直门外南路19号)

新华书店首都发行所发行 各地新华书店经售

北京通县马驹桥印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 9.5印张 211,000字

1987年7月第一版 1987年7月第一次印刷

印数1—3,000册

统一书号15274.056 定价1.70元

代 序

铸铁是工业上应用很广泛的结构材料。它具有良好的铸造性能、耐磨性能和减振性能，还具有缺口敏感性较低等特性，因此在各种机器所用的材料中铸铁所占的重量比例最大。机床、汽车、拖拉机、泵阀体、水暖器材、轻纺机械及轧辊、钢锭模等均使用大量的铸铁。

在改善铸铁性能的进程中，孕育铸铁的出现在铸铁的冶金史上具有划时代的意义。虽然密铁于二十年代所发明的孕育铸铁至今在生产中所占比重不很多，但他所采用的孕育技术、孕育剂以及由此而发展的孕育概念和孕育机理对于铸铁的发展仍起着极为重要的作用。它使灰铸铁的抗拉强度得到了大幅度的提高，壁厚敏感性和断面齐一性也大为改善。

近30年来，为提高灰铸铁的抗拉强度和减小铸件的残余应力，进行了大量系统的研究工作，高强度灰铸铁得到很大发展。由于机器产品的更新换代，需要减轻重量、延长寿命、提高发动机功率，因此生产中面临着高强度薄壁铸件的铸造技术问题，其中，孕育处理是个关键环节。

孕育技术不仅应用于灰铸铁，对于球墨铸铁、蠕墨铸铁和可锻铸铁亦是极为重要的。孕育处理可以提高和改善球墨铸铁与蠕墨铸铁的机械性能、铸造性能和使用性能，稳定生产；孕育处理可以缩短可锻铸铁的退火周期，改善它的机械性能。因此，孕育技术是革新工艺、改造铸铁、发展品种、扩大应用的重要手段，世界各国对此极为重视。我国的铸铁

生产与工业发达国家相比，尚有差距。因此大力宣传、推广、研究与发展孕育技术具有很大的现实意义与迫切性。

《铸铁的孕育》是作者通过大量的生产实践和研究工作，并参阅各种资料编著而成的。书中开篇以丰富的史实回顾了铸铁的发展过程，讨论了孕育概念，阐述了孕育的作用影响孕育效果的各种因素以及由于孕育不当所产生的缺陷和预防措施。从而使读者对铸铁的孕育有一个全面而概括的认识。

然后从实用角度，对孕育剂各组分的选择及其功能，以及各种孕育剂进行了翔实而别致的讨论。简要介绍了各种孕育方法及其优缺点。介绍了孕育对激冷倾向，共晶团，过冷度和持久性的影响及其效果的检验方法，包括试样制备、检测方法和效果评定。所有这些，对在现场工作的技术人员和研究工作者都具有重要的参考价值。

在对灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁和可锻铸铁的孕育技术讨论中，阐述了各种铸铁孕育的目的和要求，详细讨论了它们的孕育工艺。必须指出，不同铸铁有不同的孕育目的，选用孕育剂也不尽相同，本书得体地阐明了对于不同材料和不同生产条件所采用的适宜的孕育工艺。

最后探讨了孕育理论，这是各国学者所关注的重要课题。作者基本上概括了当前孕育机理的主要方面，并给人以启迪。

对铸铁孕育进行全面论述的著作，国内尚属少见。这本书具有系统性、实用性、先进性和及时性的特点。可供从事铸铁生产和研究的技术人员参考，对铸造专业师生亦有一定的参考价值。

黄惠松

1984年8月

目 录

第一章 孕育通论	1
一、铸铁孕育历史的回顾.....	1
二、孕育的概念.....	9
三、铸铁孕育的主要作用.....	18
四、影响孕育效果的因素.....	19
五、孕育中的副作用及其预防.....	40
第二章 孕育剂	44
一、孕育剂的分类.....	44
二、孕育剂的功能与成分选择.....	47
三、各种孕育剂.....	68
第三章 孕育方法	93
一、传统孕育.....	93
二、延后孕育与瞬时孕育.....	97
第四章 孕育效果的检验	124
一、激冷倾向的检验.....	124
二、共晶团的检验.....	133
三、过冷度的检验.....	138
四、孕育持久性的检验.....	149
五、其它检验.....	151
第五章 灰铸铁的孕育	155
一、孕育的目的与孕育铸铁的性能.....	155
二、孕育工艺.....	166

第六章 球墨铸铁的孕育	194
一、孕育的目的与特点	194
二、孕育工艺	200
第七章 蠕墨铸铁的孕育	224
一、孕育的目的	224
二、孕育工艺	235
第八章 可锻铸铁的孕育	242
一、孕育的目的	242
二、可锻铸铁的孕育剂	249
三、孕育工艺与实例	276
第九章 孕育机理	282
一、概述	282
二、几种主要的理论	283
三、对孕育机理探讨的期望	296
参考书目	298

第一章 孕育通论

一、铸铁孕育历史的回顾

1. 我国古代铸铁的成就

我国是世界上最早使用铸铁的国家之一。

据对商代铁刃铜钺的考证，我们祖先至少在公元前16~11世纪已从陨铁认识了铁，并加以应用。陨铁的主要成分是铁和镍，适于锻打成型。铜钺上的铁刃实质上是锻铁的产物。

人工冶铁、铸造铁器大约在春秋晚期。我国最早的编年史《左传》记载：“昭公二十九年，晋赵鞅荀寅师师城汝宾，遂赋晋国一鼓铁，以铸刑鼎、著范宣子所为刑书焉。”足见，早在公元前513年，晋国已能铸造铸有刑书的大铁鼎。虽然确定铸铁起源的年代有待于更多铁器文物的出土，但国外公认：中国于公元前8~7世纪已成功地生产了铸铁。在欧洲，直至公元十四世纪才有生产规模的生铁生产。我国生铁的使用比欧洲之所以早二千多年，主要得力于青铜器时代后期竖炉的出现和多囊鼓风，掌握了高温技术以及木炭的使用。过量碳的存在，使铁矿石加热还原、渗碳并降低其熔点，获得了流动性优良的液态生铁。此外，某些地区高磷煤和高磷铁矿的使用，依靠磷降低铁的熔点，也是一个原因。从春秋中晚期到战国时代，正值我国由奴隶社会向封建社会过渡，随着社会制度的变革，物质生产空前繁荣，铁器逐渐

替代青铜广泛用于农具、车具、手工工具和兵器。辽宁省抚顺、湖南省长沙、湖北省大冶、河北省兴隆和河南省辉县、封登、洛阳的出土文物的精工细作，标志着战国后期我国铸铁技术达到了相当高的水平。战国铁器有两个特点：一是大多为白口铸铁，坚硬耐磨；二是已掌握了白口铸铁的低温柔化技术。1972年在洛阳水泥制品厂工地发现的一柄战国铁铍，表面有①毫米左右的脱碳退火层，组织类似于钢，内部仍为莱氏体。它是迄今发现的世界上最早的可锻铸铁件。

西汉武帝刘彻采取的盐、铁、铸钱官营政策，使铸铁技术进入了另一个发展时期。从这时开始，铸铁品种包罗了白口铸铁、麻口铸铁、灰口铸铁和可锻铸铁，而且从浞池铁铍和巩县铁铍的金相鉴定中还发现了球状石墨。古代木炭生铁具有高碳、低硅、低锰和低硫，质地纯，气体含量、非金属夹杂物和干扰成分少的特点。这为通过不同的铸型和冷却条件控制白口铸铁和灰口铸铁的生产创造了条件，亦为团絮状退火碳和球状石墨的获得提供了依据。

以后各朝代，铸铁产量虽有所增，但制作的生产工具品种并无明显的扩大，铁匠的技艺主要反映在为历代统治者铸造求神拜灵的艺术品和偶像上，铸铁生产长期处于落后状态，直至解放前夕，只能生产无牌号的普通灰铁和少数可锻铸铁。

2. 国外近代铸铁的进展

在公元1325年，欧洲出现了水力驱动的风箱，使高炉铁水可直接浇成铸件，从此开始了近代铸铁的铸造实践。由于十七世纪荷兰采用石灰石作为熔剂和十八世纪焦炭在英国的问世，铸铁的材质有了一个新的跃进。此后法国用小竖炉重熔生铁成功。这样，不但摆脱了高炉铁水直接浇注在生产组织

方面的不便，而且终于使铁水在化学成分上趋于均匀和变得易于调整。生铁重熔和铸铁质量的改进，为1765年瓦特制造出第一台蒸汽机奠定了材质基础。从此，近代工业铸铁的重心转向西方。

产业革命促进着交通运输、电站、机械、矿冶业的发展，人们对高质量灰铁件的需求日益增加，单从熔化操作方面来控制质量已难于满足要求。问题的症结在于，当初生产铸铁的金属炉料为回炉料和新生铁。十分显然，用此类炉料化得的铁水温度比较低，炉料中的石墨无法在重熔过程中完全消溶，这些未溶的石墨质点在铁水凝固过程中成为石墨结晶的核心，形成粗大的片状石墨和一定数量的铁素体。为了减少铸铁中石墨的数量和细化石墨，人们采用在炉料中配入一定量废钢的方法获得成功。这种含碳量较低的所谓“钢性铸铁”提高了灰铁的机械性能。然而，用增加废钢用量来压低碳量往往因晶间石墨或莱氏体的出现而受到限制。近代铸铁发展中的真正突破是炉前硅铁的添加。

自硅铁发明以后的一百多年间，硅铁是作为炉料于炉后加入的，旨在根据铸件厚薄的不同，调整铁水中硅的含量，或者使白口铸铁转变为灰口铸铁。在包内加硅铁完全出自偶然。据说，在第一次世界大战期间，德国窘于资源不足，清扫车间硅铁粉末作为浇包添加剂生产了铸铁炉底板，意外地发现炉底板边缘非但减少了白口，铸件组织的致密性也大为提高。

二十世纪二十年代，在包内添加少量物质，以控制灰铸铁组织与性能的方法，作为一项工艺被确定下来。当时包内添加剂主要是硅铁、石墨、硅钙、硅镁和硅锆。其中以密烘的工作最为突出。密烘发现通过向白口铁水中加硅钙或硅

镁，能生产出质量均匀的高强度灰口铸铁。为此，他于1922年申请了专利。向低碳低硅铁水中加入一定量的包内添加剂，使本来有可能出现枝晶石墨、麻口或白口的组织转变为珠光体基体加细小均匀分布的石墨。这种使铸铁结晶发生质的变化的添加方法，使人联想到好比向铁水中加入接种剂一般。于是“孕育”这个十分形象的术语逐渐为铸造界所接受并广为使用。从“包内添加剂”演变为“孕育剂”，前后经历了十七个春秋。“孕育”一词最早出现在1937年缪列加的演讲记录中，这是有据可查的。可以说，孕育的早期历史是“偶然发现，少年得名”。

二、三十年代，孕育的主要工作集中于寻求控制片状石墨的类型和尺寸上，其间探索了多种行之有效的孕育剂。三十年代末孕育方面的主要进展是：认识了硅铁中少量的铝和钙在形核方面的主要作用；肯定了孕育剂复合后的有效性和持久性。象硅锰锆合金、含铬合金、硅碳合金这些当今仍然很有活力的孕育剂都产生于三十年代。复合孕育剂的应用丰富了人们对断面敏感性和灰铸铁可以具备一定挠度和冲击值的认识。

如果说纺织业和自动机的发展促成了孕育和孕育剂的兴起，那么社会对于汽车业的依赖则是孕育工艺前进的原动力。汽车生产的成批性和对铸件的严格要求，使得在新孕育剂相继出现的同时，各种孕育方法也应运而生。四十年代孕育方法的改进表现在倒包液流孕育和出铁槽孕育，从而保证孕育剂有良好的溶吸条件。1948年球墨铸铁问世后，人们对孕育方法的兴趣日益浓厚。五十年代曾有利利用惰性气体吹带孕育剂以及利用多孔塞浇包内气体的搅动作用促使液面孕育剂溶解的方法。

六十年代，冲天炉炉料组成发生了很大的变化。炉料大量利用废钢，防污染装置和热风、富氧技术的结合，进一步提高了熔炼温度。此时，国际上电炉在铸铁生产中的比重也有增加。所有这些，都显著地提高了铁水的过冷倾向，这就迫使人们更依赖孕育手段去生产优质铸件。六、七十年代的工作可以归纳为：一方面通过强化孕育研制各种高效长效孕育剂，另一方面充分利用饱和孕育状态研究各种形式的瞬时孕育方法和瞬时孕育装置。这方面的主要工作有：①含钡、锶、铈和镁的孕育剂；②浇包瞬时孕育；③型内孕育；④应用于自动浇注线上的CQ（控制质量）孕育；⑤气力喷射孕育等。

目前，世界各国孕育剂的品种多达千种。它们以粒状、块状、砖状、芯状、棒状和丝状等不同的商品形式供应用户。孕育方法和孕育装置也有数十种之多。在现有技术条件下，选择适当的孕育剂和适当的孕育方法，完全可以使孕育剂用量控制在0.02~0.03%的水平，相当于传统大剂量孕育的1/40~1/60。

必须指出，正是由于铸铁牌号、成分，铸件特征，熔化条件和生产方式等方面的差异，导致孕育剂的多样化发展。无数的事实表明，不存在一应万灵的孕育剂，铸造工作者总是根据各自的具体条件，对孕育剂和孕育方法作出相应的选择。

3. 解放后我国孕育技术的发展

国内灰铸铁的孕育从五十年代初引进密烘的技术开始。密烘铸铁以硅钙为孕育剂。后来，由于原材料来源紧张和受当时铁水温度低、硅钙吸收不良的限制，硅钙逐渐为价格低廉的硅铁所代替。硅铁加入铁水中，硅的氧化放热可以减少

孕育过程中铁水的降温。多年来的生产实践证明，75硅铁孕育是有效的。但与国外水平相比，国内灰铸铁孕育长期处于品种单一、处理方法原始（主要是出铁槽孕育）、孕育剂用量大且易衰退的落后状态。球铁应用后，甚至出现一种错误的倾向，似乎铸铁强度的提高，只要石墨球化就行。因此，对灰铁的孕育相当忽视，七十年代中期以前，基本处于原地踏步状态。

孕育处理和球化处理是球铁生产中两个相辅相成的工序。孕育处理的作用，不仅有利于石墨的析出和消除组织中的碳化物，而且有利于石墨球的细化、圆整和均匀分布。球铁的孕育剂以75硅铁为主，也进行了多元素复合的试验研究工作。六十年代初，无锡柴油机厂和浙江大学等单位的试验，确认用硅铁-铝和硅铁-锰铁-铝作为复合孕育剂，有明显的效果。引入微量铝显著地提高了球墨的圆整度。用铝丝或铝屑与硅铁复合，在临浇注前进行二次孕育，尤其见效。锰铁的复合，可改善孕育效果，延长孕育有效时间。六十年代在孕育处理工艺方面，虽然有多次孕育成功地生产铸态高韧性球铁和QT90-2合金球铁曲轴的事例，但仍未摆脱大剂量孕育的范畴，而且反复孕育手续也过于繁琐。针对出铁槽孕育和多次孕育的缺点，七十年代的工作主要集中在研究球铁孕育工艺的改进上，各种小剂量瞬时孕育的高效率孕育方法相继出现。1972年西安柴油机厂、西安交通大学在生产295柴油机球铁曲轴时利用浇口杯孕育，在终硅量较低条件下获得了石墨细小圆整，铸态没有渗碳体的组织。1973年西安交通大学和3402工厂用硅铁棒浇包孕育生产解放牌汽车后桥壳，得到了具有30%~40%铁素体和理想的球墨组织，消除了铸态的渗碳体，即使磷含量在0.104%亦未见有磷共晶。从而

稳定了铸态组织，简化了退火工序。差不多在同一时期，湖北沙市内燃机配件厂试验成功了包外孕育。该法利用包嘴上方的漏斗，随流撒落硅铁粒对铁水进行孕育。松江拖拉机厂和哈尔滨工业大学等单位为简化孕育操作，在生产中运用了向铁水包表面加硅铁块的浮硅孕育法。此外，一些单位还分别使用了粉状孕育剂（散装或塑料袋装）的型内孕育。山东蓬莱汽车制造厂等单位在1979年至1980年间试验成功采用孕育块的型内孕育方法，他们以工业石蜡作粘结剂制成硅铁块，将其置于浇道中特定的孕育室内，取得了稳定的使用效果。郑州机械研究所等单位近期也研究成功了孕育丝新工艺。

为了适应大批量、流水线生产，应延长孕育作用有效时间并防止大断面球铁件中石墨的畸变。为此，一些高等院校和研究单位，近期正从事含钡、镧、铈和铈、铋等元素的复合孕育剂的研究。

孕育处理是使可锻铸铁缩短退火时间、改善石墨形状、提高性能的重要手段。自六十年代初以来，它已成为我国可锻铸铁生产中一项必不可少的工序。目前用得最广的是铝、铋、硼等复合孕育剂，铈、硅、稀土、镁、钡、钛、硫等亦偶有使用。可锻铸铁的孕育方法大多采用包内冲入法。由于可锻铸铁孕育剂用量比球铁、灰铁少得多，对孕育衰退相当敏感，结果，退火后同一铸件不同壁厚处，或不同期浇注的铸件之间，在组织与性能上出现差异。有鉴于此，昆明工学院对二次孕育和型内孕育作了大量的试验研究，取得明显的效果。对于可锻铸铁这类薄壁小件，这种新的孕育方法在生产中如何有效地加以应用，尚有待于进一步的研究。

灰铸铁的应用最广，产量最多，出口潜力最大。为着适应四个现代化建设事业和外贸工作的需要，为各行各业提供

轻便耐用、质量稳定的灰铸铁件乃是当务之急。人们只注意球铁和蠕铁孕育的倾向有了转变。灰铸铁孕育领域内由硅铁一统天下的局面已宣告结束。近五年来，研究了多种适合于灰铸铁的孕育剂并广泛应用。

浙江大学和无锡球墨铸铁研究所的研究表明，稀土-硅铁复合孕育与75硅铁孕育相比，可增加共晶团和延缓衰退。沈阳铸造研究所在对硅钡系孕育剂进行系统研究的基础上，优选成分，并确认钡具有强化孕育和抗衰退性能。天津拖拉机厂使用低铝硅铁孕育，稳定了产品质量。河北工学院、北京内燃机总厂、北京农业机械化学学院等单位也分别对硅钡系、硅钼系、硅钡系孕育剂、稀土系孕育剂、硅钡（钼）钼孕育剂、含锰的硅系孕育剂等进行了摸索，并取得初步成果。中国农业机械化研究院和沈阳拖拉机厂在孕育的同时还探讨了铸铁合金化的问题。

为了节约孕育剂、提高孕育效果，移植浇包孕育、型内孕育于灰铸铁的工作，已在生产中崭露头角。此外，北京第一机床厂和北京工业大学研究出的稀土孕育剂和在浇口杯底部插入孕育芯块，边浇注、边溶吸的瞬时孕育方法，对中大型铸件的生产提供了新的途径。

自从本世纪二十年代孕育现象被人们发现以来，孕育技术已成为灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁和可锻铸铁生产中控制组织、提高性能、改进工艺和扩大应用范围必不可少的一个环节。在国内外，经过六十年代和七十年代两次大发展，出现了各种各样的孕育剂和孕育方法，至今方兴未艾。铸造工作者无不着眼于多能、长效复合孕育剂和后孕育，瞬时孕育等方法的研究和应用。为了向用户提供合乎要求的、足够数量和品种的孕育剂、球化剂和蠕化剂，“三剂”公司即将

成立。无疑，它对我国铸铁事业的发展必将起巨大的推动作用。为了适应我国国民经济的飞速发展，经过全国广大铸造工作者的共同努力，铸铁孕育领域中必将异军突起，大放光彩。

二、孕育的概念

1. 一般概念

结晶过程包含着生核和晶体生长两个交叉发生的过程。即在一个晶核生成并生长的同时，其它部位继续生核并生长。以每个晶核为出发点不断生长成晶体，直至多个晶体彼此相遇，原相消失，结晶过程即告完成。由于各晶体的位相不同，以及晶体周围富集溶质元素及杂质，各晶体间出现明显的晶界。由晶界勾画出各个孤立的晶体称作晶粒。一般而言，每个晶粒是单晶体，但在特殊情况下，由于种种晶体缺陷（如孪晶、位错等）的存在，晶粒也可能发展成为多晶体，球墨铸铁中的石墨球就是典型的例证。

控制生核过程是改变铸件晶粒组织的重要手段。研究表明，生核的方式有自发生核和非自发生核两种。自发生核，就一次结晶而言，是由游动的原子集团自身逐渐长大而形成晶核的过程，故亦称作均质生核。非自发生核是在外来质点的表面上生核的过程，又称异质生核或非均质生核。

自发生核需借助于过冷液体中的能量起伏而形成新相晶核。然而，自发生核所需的过冷度很大，对于许多金属约为熔点的20%左右，即 $\Delta T = 0.18 \sim 0.2 T_{\text{熔}} (K)$ 。如此巨大的过冷度，在一般的铸造冷却条件下根本无法实现。实际金属结晶的过冷度事实上只有十几度甚至不到一度。原因何在？经过研究认为，这是因为金属中不可避免地存在某些杂质，

使金属原子在这些固体杂质的表面上外延排列，长大成晶体，而并非依赖于原子集团的自发生核的缘故。

实际金属和纯金属在生核方面的显著差别，启迪人们去探求人为地控制结晶的途径。孕育处理即是向液体金属中添加少量物质、促进液体金属内部生核的一种方法。这些少量的添加物质称作孕育剂。

铸造合金的孕育剂分为三类：

(1) 现成晶种物质

向浇包或浇注的金属溶液中加入与欲细化相具有界面共格对应关系的高熔点物质或与结晶相相同物质的碎粒，使之在液体中作为有效质点而促进非自发生核。例如，碳钢中加铁粉，高锰钢中加锰铁粉以及铬钼模具钢中加钼粉的悬浮浇注法；灰铸铁中以晶型石墨孕育等，都可以起到细化金属晶粒或细化石墨的作用。采用这类孕育剂，要求加入物的颗粒度保证其在铸件开始凝固以前不被完全熔化或溶解。因此该类物质的加入方式都具有“瞬时”或“准瞬时”的特征。

(2) 生核剂

生核剂本身并不能作为晶核，但当它与液体金属中的某些元素相互作用生成稳定化合物之后，能作为晶核或有效质点，促进非自发生核。由于晶核是新产生的，因此称这类加入物为生核剂。例如，钢中加入钒、钛形成 TiN 、 TiC 、 VC 和 VN ，可细化钢的晶粒；过共晶铝合金中加入磷，形成 AlP 可细化初生硅；铝—铜系、铝—镁系、铝—硅系合金中加入钛和锆，形成 $TiAl_3$ 、 $ZrAl_3$ 可细化 α 晶粒；铸铁中的钙、锶、钡孕育，形成 CaC_2 、 SrC_2 和 BaC_2 可细化石墨，此外铸铁中的某些脱氧产物及其复盐也常常成为石墨析出的衬底(或称基底)。