

强韧白口铸铁

姜振雄主编
浙江大学出版社

43.1



TG143.1

$\frac{1}{2}$

CX77/08

铁 铸 口 白 韧 强

夏振雄 主编

浙江大学出版社



B 587416

内 容 简 介

本书编较系统地介绍了白口铸铁强韧化的有关工艺措施,其中包括液态变质处理,固态相变、形变和形变热处理等,并在理论上对不同的强韧化机理作了必要的论述。有关磨料磨损和失效分析的内容也占有一定的比例,全书共分三大部分:磨料磨损和失效分析;白口铸铁强韧化;强韧白口铸铁件的研制和应用。

本书可供从事铸造和热处理生产的工人,技术人员和高等院校铸造和热处理专业师生参考,对研究材料科学与工程科技人员,也有一定的参考价值。

强韧白口铸铁

姜振雄 主编

责任编辑 涂红

*

浙江大学出版社出版

浙江大学印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

*

850×1168 1/32开本 9.375 印张 235 千字

1989年5月第一版 1989年5月第一次印刷

印数: 1—3560

ISBN 7-308-00314-0

TG·005 定价: 4.85元



序 言

白口铸铁具有很高的耐磨性，我国将白口铸铁作为抗磨材料在工业上应用已有很悠久的历史，早在春秋战国时期，山西阳城就生产白口铸铁畜力犁铧，该产品曾行销二十余省，并一度远销日本、朝鲜、不丹、尼泊尔等国，誉满中外。而国外只是在一百多年前，发明可锻铸铁的同时，白口铸铁才在工业上获得应用，比我国晚两千多年。但由于白口铸铁性能很脆，不能承受冲击载荷的作用，因此，白口铸铁长期以来仅限于制作一些简单的无冲击工况条件下的抗磨件，大大限制了它的应用范围。

为了改善白口铸铁的性能，特别是对冲击性能，半个多世纪以来，国外进行了大量研究工作，取得了显著成效，其中主要有：1932年美国的INCO公司首先发表了含4.5%Ni, 1.6~2.0%Cr的镍硬(Ni-hard)铸铁，用作磨机衬板，与此同时，英、美等国还发明了高铬白口铸铁，但由于需电炉熔炼当时未能发展，直到1958年美国Climax钼公司T.E.Norman工程师才公开发表了15Cr-3Mo高铬白口铸铁，这两种材料目前仍被公认为应用最广泛的最优越的抗磨材料，欧、美、日本等国均制订了标准系列(如VDG, BS4844; ASTM532-75等)。此外，各国还进行了添加其它合金元素的研究，其中以加钼效果较显著，有的国家已列为专利。国内近二十年来在这方面也开展了大量的研究工作，除研制镍硬和高铬白口铸铁并在生产上推广应用外，在添加其它合金元素(如钨、钼等)和变质处理方面都取得一定的成效，但所有研究，包括镍硬铸铁，高铬铸铁和钼系白口铸铁，除对提高耐磨性效果较显著外，对机械性能的改善，特别是冲击韧性的提高幅度不大。

60年代初，我们根据我国资源条件，开始了对普通白口铸铁

在不添加任何合金元素的情况下采用固态相变和形变强韧化白口铸铁的研究工作，使它的机械性能大幅度提高，特别是抗冲击韧性取得了重大的突破，通过广泛的生产实践证明，这是一种新颖的，可广泛应用于制作带冲击工况条件下工作的易损零件强韧白口铸铁抗磨材料。在抗磨铸铁强韧化研究方面，已形成自己的特色。为了推动这方面研究工作的深入，使本成果更趋完善，以便建立符合我国资源条件，独特的抗磨材料系列，特汇编此论文集。

论文集系统介绍了二十多年来关于白口铸铁强韧化的研究成果和应用成效资料。为了使读者更全面系统地了解有关磨料磨损特征和对抗磨材料在性能方面的要求，同时收集了几篇论述磨料磨损和失效分析的文章。因此，全书由三大部分组成：磨料磨损和失效分析；白口铸铁强韧化；强韧白口铸铁件的研制和应用。这就使论文集兼有专著的特色。

由于工作做得还不够细，作者水平有限，错误一定不少，希望同行们批评指正。

编 者

1988年12月于杭州

目 录

总 论

- 1 抗磨铸铁研究的现状和动向..... (3)

第一部分 磨料磨损和失效分析

- 2 白口铸铁磨料磨损磨屑形成过程的探索..... (15)
2 软磨料磨损机制的初步探讨..... (31)
1 从典型抗磨件的失效分析略论选材原则..... (38)
5 以抗磨件的受力和失效分析为基础来合理选用材料..... (52)
6 仿Brinell 耐磨试验机 (69)

第二部分 白口铸铁强韧化

- 7 白口铸铁等温处理强韧化的研究..... (79)
8 白口铸铁复相强韧化的研究..... (97)
9 白口铸铁锻造强韧化的研究..... (120)
10 白口铸铁的形变热处理..... (141)
11 钒白口铸铁强韧化的研究..... (163)
12 强韧白口铸铁组织和性能..... (182)
13 形变工艺对白口铸铁组织和性能的影响..... (196)
11 Re及Re-Si变质处理对中钒白口铸铁的组织及性能的影响
..... (215)
15 Nb-Si复合变质处理对中钒白口铸铁的组织及性能的影响
..... (235)

第三部分 强韧白口铸铁件的研制和应用

- 16 低碳白口铸铁磨球的研制..... (255)
17 强韧白口铸铁机引犁铧的研制..... (263)
18 强韧白口铸铁DW-200型斗轮式挖掘机斗齿的研制..... (274)
19 2.7吨锤击式磨煤机强韧白口铸铁击锤的研制 (281)
20 雷蒙磨磨辊的研制..... (287)

总 论



1 抗磨铸铁研究的现状和动向

姜 振 雄

前 言

冶金、矿山、建材、煤炭、电力、农机等工矿企业都拥有大量的采掘、研磨、破碎、装载、运输以及耕作等设备，其中许多工件直接与矿料、砂土或其它被加工的物料接触，受到磨料的磨损，很快即告失效，造成材料和人力的浪费。根据西德、美国、英国较近期的资料^[1-2]，在这些发达国家中，每年仅通过减少磨损而潜在的节约均在千万美元数量级以上。1979年英国冶金工业用于维修的材料费就高达三亿多英镑，其中绝大部分是由于磨料磨损造成的，国内在这方面的潜力更大，根据资料[3]估计，只要做好磨损损失的预防工作，在本世纪末以前每年可节约的价值达150亿元。陈南平教授曾提到^[4]，仅上述五个部门每年因磨料磨损的各类钢材达百万吨以上。因此，提高易损件的使用寿命，已成为发展生产的主要关键。提高材料质量，研究新型抗磨材料已成为国内外材料工作者共同关注的课题，并进行了大量的研究^[5-10]，如澳大利亚1980年在墨尔本召开的第一次摩擦学会议，讨论工程中的润滑、摩擦和磨损问题，会议论文中40%是涉及工业中的磨料磨损，远远多于其它各项议题。西德研究技术部主持的一项自1978年开始，为期六年，耗资约四千万马克的研究及发展规划，磨料磨损占各种磨损机理研究总项目的41.9%，居于首位。半个世纪来，特别是近二十年来，国内对磨料磨损的研究得到有关方面的重视，研究工作普遍开展。中国金属学会于1981年

12月召开了金属耐磨材料第一届学术会议，会上宣读和交流论文80多篇，会后并出版了论文选集，其中90%以上的文章都是有关磨料磨损方面的研究成果。中国机械工程学会材料学会建立了失效分析及耐磨材料的学术组织，四年时间内召开了三次学术交流会，专门研讨冶金矿山、建材、农机等方面的磨损失效和耐磨材料问题，1985年出版了针对上述部门所涉及的易损件磨损失效分析案例汇编，推动磨料磨损和耐磨材料研究工作的开展。在国家科委支持的摩擦学研究课题中，关于磨料磨损机理研究也占有一定的比例。我国在抗磨材料的研究虽然起步较晚，但进展较快，特别是对白口铸铁的研究，在一些领域已达到和超过世界先进水平。

一、抗磨铸铁发展概况

在回顾抗磨铸铁发展情况时，首先要提到的是我们祖先的智慧结晶，早在春秋战国时期就将白口铸铁作为抗磨材料应用在农机具易耗零件上，如山西阳城的畜力犁镜。这种犁镜是用木炭为烧料在矮炉中生产出来的高碳低硅共晶或过共晶白口铸铁，具有耐磨性高，剥土性好不粘土等特点，过去曾行销全国二十余省，并相传一度外销朝鲜、不丹、尼泊尔、日本等国，誉满中外^[1]。在国外大约一百多年以前，发明可锻铸铁的同时，白口铸铁才作为抗磨材料在工业上开始应用，比我国晚两千多年。

白口铸铁作为抗磨材料在工业上应用发展的初期，一般为珠光体型。但珠光体型白口铸铁性能很脆，不能承受冲击载荷，除了一些在服役过程无冲击或很小冲击的工况条件下（如输送物料用的链条板，选矿用螺旋输送叶片等）使用外，一般很少采用。为了扩大白口铸铁应用范围，以求满足冶金、矿山、电力、建材、工程、农机等工业发展的需要，国内外进行了大量的研究工

作，以期达到改善其机械性能，特别是耐冲击性能，并取得显著成效。按其发展历史顺序，其中主要有：1932年美国 INCO 公司首先含 4.5%Ni, 1.6~2.0%Cr 的镍硬铸铁 (Ni-hard)，与此同时，美、英等国先后研制成功高铬白口铸铁，其含铬量为 8~38%Cr，但由于需电炉熔炼当时未能发展，直到 1958 年美国的 Climax 钼公司 T.E. Norman 工程师才公开发表了 15Cr-3Mo 高铬白口铸铁。这两种铸铁的基体均为马氏体，目前仍被公认为最优越的抗磨材料而广泛应用，许多国家并制订了国家标准，如 VDG、BS4844、ASTM532-75Q 等。70 年代苏联、日本等国又相继发展了高钒白口铸铁 (>6%V)，给白口铸铁增添了一个新的系列。在这期间我国沈阳铸造研究所结合国内资源研制了高钨白口铸铁，含 18%W 的高钨白口铸铁混凝土搅拌机叶片，使用寿命达到高铬白口铸铁水平^[12]。上海工业大学研制的锰白口铸铁 (含 5.5~6.5%Mn) 颞式破碎机颞板在生产上获得了应用，使用寿命可与高锰钢媲美^[13]。

目前具有一定韧性而又十分抗磨的高铬白口铸铁在国外受到很大重视。英、美、西德等国使用高铬钼白口铸铁，苏联使用高铬锰白口铸铁，而法国则研制高铬钒白口铸铁。我国除研制和应用 15Cr-3Mo 高铬白口铸铁外，还开展了以锰代钼和低铬白口铸铁的研究。

此外，中锰球墨铸铁在球磨机磨球上的应用也取得一定效果^[14]。特别值得提及的是浙江大学二十多年来的研究成果，他们根据铸铁金相学特征，采用铸铁固态相变强韧化的工艺措施，先后研制成功了超强韧白口铸铁，游离双高碳相抗磨铸铁和复相强韧化抗磨球墨铸铁等，用这些材料所研制的各种抗磨易损件，均取得了良好的经济效果，为根据我国资源条件，具有我国特色的独特的抗磨材料系列开辟了一条新的途径。

总之，随着科学技术的发展，人们对抗磨铸铁研究的不断深

入，这一支生力军将在磨料磨损领域内占据重要地位，而且使用范围将越来越大，在许多工况条件将取代高锰钢和其它抗磨合金钢。

二、我国抗磨铸铁研究动向

对抗磨铸铁的研究已得到各国材料工作者的普遍重视，开展了大量的研究工作，而且进展较快。现就我国的研究现状和发展动向提出自己的看法，与同行们商榷。

（一）珠光体型白口铸铁的研究和应用得到了重视

白口铸铁具有很高的抗磨性能，与灰口铸铁相比，断裂时它们变形和挠度小（但不等于零），有较高的抗拉和弯曲强度很限，以及相当于钢的弹性模数，是一种很理想的抗磨材料。但由于亚共晶白口铸铁的铸态组织由珠光体+莱氏体离异共晶（呈网状）+二次渗碳体针组成。由于渗碳体呈网状分布，严重割裂了基体的连续性，因此很脆，冲击值一般低于 3.0 焦耳/厘米²，过去一般用来制作表面激冷白口铸铁的抗磨件，如冷硬轧辊等，除很不重要的抗磨件外，很少采用全白口铸铁。实践证明，这一概念不完全正确，这可能是由两方面原因所造成，一是过去对白口铸铁改善性能方面的研究不够，另一方面则由于人们对某些工况条件认识不足，过分强调安全运行而对韧性提出过高的要求，使材料不能充分发挥它应有的作用。作者认为，珠光体白口铸铁具有良好的抗磨性能，且原材料供应方便，不用添加任何合金元素，制造工艺简单，在满足工况条件下应推广应用。研究发展珠光体型白口铸铁以下几方面的动向值得注意：

1. 在分析工况条件的基础上，适当调整化学成分，使所研制的抗磨件达到安全服役。在许多场合材料的浪费往往是由于设计

者对材料性能上提出过高要求造成的，例如用于球磨机的磨球，国内外普遍采用锻钢球以避免磨球在工作过程中承受严重冲击而破碎。实际上球磨机在运转过程中磨球所受的撞击并不象人们所想象的那样严重。球磨过程是被研磨的物料夹在相邻的一些磨球之间和磨球与衬板之间，虽然磨球的抛落发生频繁的撞击，但撞击力不大，不是主要的破碎力，磨球的滑移滚动和翻滚才产生最有效的磨制作用。因此，对磨球材质的要求是：具有相当高的硬度以抵抗物料中硬质点对磨球的切削作用造成的微切削磨损，并具有一定的韧性以防止磨球在运行过程中破碎和减少疲劳磨损。通过对球磨机工况条件的分析，资料[15]采取降低含碳量的措施，研制了低破白口铸铁磨球，其化学成分为： $2.1\sim 2.3\%C$ ， $<1.0\%Si$ ， $0.3\sim 0.6\%Mn$ ， $<0.1\%P$ ， $<0.1\%S$ 。取代锻钢球在电厂球磨机上使用，获得了良好的经济效益，其使用寿命为锻钢球的2~2.5倍，碎球率仅0.07%。目前这种球主要供应华东电管局所属电厂应用。在水泥行业应用也取得显著效果。

2. 对珠光体型白口铸铁进行变质处理，以改善其性能。我国富有稀土元素，可充分利用这些资源对白口铸铁进行变质处理，以达到细化晶粒并促使铸铁在一次结晶时网状渗碳体断开并孤立化，从而提高冲击韧性。试验结果指出^[10]，随着稀土变质量的增加，碳化物的形貌由粗大聚集物的网变为网结处局部断开的网，再变为许多长带和个别孤立的块，最终变为点状孤立块，白口铸铁的韧性也随之提高。但过量变质也不好。最近在稀土复合变质剂对白口铸铁进行变质处理，取得了很大的进展，经变质处理后可使高钒白口铸铁碳化物球化，因此，对普通白口铸铁采用适当的稀土复合变质剂的研究工作应引起重视。除稀土外，其它变质剂或用高熔点碳化物粉粒（如碳化钨等）进行孕育处理，以改变铸铁的结晶条件，使碳化物在凝固过程中呈孤立状的研究很值得注意，这不仅对新变质剂的探索或变质工艺的改进都有必

要，而且具有很大的经济意义。

3. 利用机械或电磁振动或扰动改变白口铸铁结晶过程 目前它引起人们的关注，这很可能是改善白口铸铁韧性的新途径，这是新动向。

(二) 根据我国资源条件发展我国独特的合金白口铸铁系列，并大力开展低合金白口铸铁的研究

近年来我国在研制和应用镍硬白口铸铁和高铬白口铸铁方面已取得显著成效。但由于我国缺镍，发展镍硬铸铁受到限制，高铬白口铸铁含铬量高且含钼，原材料供应及成本均有问题，因此很有必要根据我国资源条件发展独特的抗磨材料系列。国内有关单位对此十分重视，已做了大量工作，先后研制成功钨系抗磨白口铸铁，锰铜抗磨白口铸铁，锰钼抗磨白口铸铁，铬-钼-铜抗磨白口铸铁，中锰强韧白口铸铁等。据报导^[16]，钨系白口铸铁含钨18%，用以制作混凝土搅拌机叶片，使用寿命与高铬白口铸铁相当，锰铜、锰钼白口铸铁根据铸件壁厚适当控制合金元素含量获得铸态马氏体基体，这种铸铁用在抛丸机叶片、分丸轮上效果良好^[17]。铬-锰-钼-铜马氏体白口铸铁当其化学成分为：C3.0~3.6%，Si<0.8，Mn0.4%左右，Mo1.6~2.0%，Cu2.5%左右，Cr3.0%左右，P.S<0.1%，所研制的电厂中速平盘磨磨煤机辊套，其寿命比ZGMn-13辊套高一倍^[18]。在上述研究的基础上，为了改善白口铸铁的韧性，对化学成分作了适当调整，又研制了铬-钼-铜白口铸铁，在LM10/750平盘磨煤机辊套上使用，寿命可达6000~7000小时，接近镍硬铸铁的使用寿命。

根据上述研究收获和积累的经验，今后合金白口铸铁发展的研究工作有如下趋势。

1. 钨和钼是我国富有元素，它们的作用与铬相似，当含量达

到一定时可使白口铸铁的碳化物网断裂成孤立状，对改善白口铸铁韧性极为有利，且由于其碳化物显微硬度高及理想的分布形态，提高白口铸铁的耐磨性。但目前所研制的高钨和高钒白口铸铁中钨和钒的含量均太高，影响产品成本，发展受到限制，今后应在降低钨或钒含量方面下功夫。有关资料指出^[18]，当白口铸铁含碳量为2.2~2.4%时，钒含量大于3.27%便能基本消除莱氏体，使碳化物呈分散的鱼骨状或孤立团聚状。在钒白口铸铁中添加少量钼和铜（Mo0.5~0.8%，Cu约1.0%），进一步改善了碳化物形态，使之完全呈孤立块状分布。同时指出，这种复合合金化的白口铸铁通过适当的热处理，可大幅度提高综合机械性能，冲击值大于10焦耳/厘米²，抗弯强度在1000牛/毫米²以上，硬度均大于HRC50，是一种较理想的强韧抗磨白口铸铁材料。因此，要进行这方面的研究工作，可从以下两方面着手，一是添加少量其它合金元素进行复合合金化，二是寻求合适的热处理规范。

2. 锰奥氏体白口铸铁已引起有关材料工作者的重视。这种铸铁具有奥氏体基体，加上分散（或基本不连续）的渗碳体，它具有很好的抗磨性能，并富有韧性。其最佳化学成分为：C1.75~1.85%，Si<0.8%，Mn7.7~8.3%，S、P<0.1%，经950℃奥氏体化保温，然后空冷、风冷或雾冷以破碎网状渗碳体。溶于奥氏体中的碳部分脱溶析出，呈弥散分布于奥氏体基体中，另一部分则仍溶于奥氏体中呈过饱和状态，对形变硬化有利。用这种材料制作的颧式破碎机齿板轧石料，寿命为高锰钢的两倍。锰硼白口铸铁的研究亦取得显著效果^[13]。因此，深入研究中锰易加工硬化白口铸铁，及加入少量其它合金元素（如铜、铬、钼等）研制马氏体白口铸铁，对发展在应力不太高及中、低应力工况条件下服役的抗磨材料以取代高锰钢及高铬和镍硬白口铸铁，具有十分重要的意义。

(三) 开展对白口铸铁热处理的研究, 充分发挥材料的潜力

由于白口铸铁性能很脆, 在发明镍硬铸铁和高铬白口铸铁以前, 很少采用整体白口铸铁, 因此白口铸铁的热处理往往为人们所忽视, 除进行消除内应力的退火和正火处理有时被采用外, 其它热处理工艺很少研究。实际上白口铸铁与钢比较, 差别比灰口铸铁还小, 尤其是与过共析钢相比, 相组成上差异更小, 只是在渗碳体数量上不同而已。因此对于钢的所有热处理规范, 对白口铸铁应该都有效。特别是白口铸铁高温奥氏体化的渗碳体重溶过程, 能有效改善其分布形态, 性能上通过热处理改善的幅度可能会更大。实践证明^[19], 当白口铸铁化学成分为 $C2.2\sim2.8\%$, $Si<1.0\%$, $Mn0.5\sim0.8\%$, $S.P<0.1\%$, 通过高温奥氏体化等温淬火, 综合机械性能和耐磨性均大幅度提高。根据不同工况, 调整碳含量所研制的机引犁铧、饲料粉碎机锤片、碾矿机磨盘、斗齿等抗磨件, 使用寿命分别比原用材料提高50%至三倍。钒白口铸铁热处理研究证明, 运用各种热处理工艺规范均有良好效果, 抗弯强度在1000牛/毫米²以上, 最高达1900牛/毫米², 冲击值在10焦耳/厘米²以上, 最高达24.5焦耳/厘米², 硬度在HRC45~55范围内。由此可见, 白口铸铁热处理是发挥材料潜力和白口铸铁强韧化的有效途径, 效果超过合金化。因此, 为了充分发挥材料的内在潜力, 更广泛地扩大白口铸铁的应用范围, 对白口铸铁热处理的深入研究已为人们重视, 主要涉及以下几方面。

1. 探索奥氏体化加热温度和保温时间以及合适的热处理规范使渗碳体孤立化和球团化。

2. 探索不同热处理规范, 其中包括对球墨铸铁行之有效的部分奥氏体化, 低碳奥氏体化; 二阶段快速正火和等温淬火对白口铸铁综合机械性能的影响, 以及合金元素的影响等。

3. 探索复相抗磨白口铸铁的热处理规范及其影响因素。
4. 探索加热和冷却过程的相变规律及强韧化机制。

(四) 白口铸铁形变强韧化的研究

传统概念认为,白口铸铁性脆,无法进行塑性加工。实际上,在室温下硬度高达HV900以上的渗碳体在700℃时硬度已下降到HV100左右,珠光体这时具有的硬度仅仅达到HV30左右,进入奥氏体化区间后,两相的显微硬度还会进一步降低,因此具有很好的塑性变形能力。试验证明^[20],在700~1100℃温度区间内,其临界变形度随温度升高而增加,700℃时一般为20%左右,1100℃时可高达50%左右。通过锻造其冲击值达30焦耳/厘米²,锻造后再经适当热处理,则可达50焦耳/厘米²,最高达100焦耳/厘米²,抗拉强度高达1300牛/毫米²左右。此种材料可望在大冲击工况条件下替代高锰钢,很有发展前途。今后的研究工作主要侧重在以下几个方面:

1. 对各种形变工艺的研究,如挤压、轧制和模锻等,为下一步生产提供工艺参数。
2. 合金元素对白口铸铁塑性变形能力的影响及其与机械性能的关系。
3. 白口铸铁形变热处理的研究。
4. 对典型抗磨件进行生产实践性试验,探索其实际应用价值。

(五) 最新动向

经过材料工作者的长期努力,近期又推出了一些新型抗磨材料,如奥贝球铁已进入了抗磨铸铁行列,在腭式破碎机腭板上应用其使用寿命超过高锰钢^[21]。根据铸铁金相学特征所研制成功的游离双高碳相抗磨铸铁在矿山、建材等抗磨件上应用均取得良