



钢铁材料金相图谱

GANGTIE CAILIAO JINXIANG TUPU

李炯辉 施友方 高汉文 编著

上海科学技术出版社

序

金相图是金属显微检测技术的摄影成果。它反映了金属及其合金在一定工艺条件(例如铸造、锻压、焊接、热处理等)下所呈现的内部组织。金相组织与材料性能之间关系的研究是人类百年来为之努力不懈的一大课题。

金相学是一门古老的学科。近几十年来,随着现代科学技术的进步,在不断提高、完善普通光学金相显微设备的基础上,发展了高温金相、低温金相等技术。同时电子金相技术随着透视电子显微镜、扫描电子显微镜、场离子显微镜的采用而开始崛起,在结合了离子探针、激光探针、俄歇能谱仪等表面分析手段的基础上,对于材料的组织、形貌(表面或断口)以及微区成分可以进行综合分析测定,这样,人们对于金属材料的认识由表及里,已经深入到“无微不至”的境地,这对材料的质量控制、失效分析以及对新材料的研制都有着十分重大的作用。

金相学也是一门技术性很强的手艺。金相图片的制取,从选样、制备、观察、定点摄影到最后的暗室操作,尽管目前已有各种设备可以利用,然而要制得一幅优秀的金相图片,无一不需金相工作者付出大量的精力和心血。出色而有意义的金相图片可以看做是艺术珍品,达到科学与艺术相互辉映,令人爱不释手。

李炯辉、施友方、高汉文三位同志编制的《钢铁材料金相图谱》集三十年金相工作的经验,较为全面、细致地以大量金相图片为线索,介绍了常用钢铁材料在不同工艺状态下的性能特点,尤其可贵的是本图谱还由一般到特殊介绍了大量由材料内在质量缺陷引起的失效实例。它反映了黑色材料领域金相技术的不断发展和对生产、科研的作用。

本图谱图文并茂,并附有理论说明,对从事金属工作的科技人员是一本实用的工具书。

我相信:本图谱的出版必将有助于促进我国金相界的交流和提高。

周志宏

1981年5月20日于上海

钢铁材料金相图谱

李炯辉 施友方 高汉文 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

发行所上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 63.5 插页 4 字数 2,081,000

1981年10月第1版 1981年10月第1次印刷

印数 1—2,000

统一书号: 15119·2142 定价: (科五) 9.20 元

前 言

大力开展材料科学技术的研究,对全面实现我国农业、工业、国防和科学技术现代化具有极其重要的作用,金相分析则是研究材料科学的基础技术之一。

钢铁材料在国民经济中占有很重要的地位。钢铁材料的质量,尤其是内在质量,直接影响到各种产品零件的机械性能和使用寿命。我们编著《钢铁材料金相图谱》的目的,是试图通过宏观、微观以及电子断口和电子金相等技术来显示钢铁材料经过各种热加工工艺处理后的断口和显微组织形貌,以此反映各种钢铁材料的成分、组织、工艺和性能之间的关系,有助于提高钢铁材料的内在质量,正确地选择和控制各种热加工工艺,对钢铁材料的合理选用和充分发挥其潜在性能,作出微末的贡献。

本图谱包括铸铁、碳素钢与低合金钢、高合金钢以及钢铁化学热处理等四篇,并按材料或处理方法分列为十四章。每篇卷首,扼要地介绍了材料和工艺的特点、用途以及成分、组织与性能之间的关系,使读者对每一篇的中心内容有一概括的了解;随后按章列出各种钢铁材料的典型组织,以及各种材料经不同工艺处理后的正常或不正常组织。鉴于失效分析的重要性,特在每章最后一节列出生产、科研中常见的缺陷和失效分析实例,提出行之有效的防止和改进措施。同时,为适应工艺发展的需要,对新材料及新工艺处理后所出现的显微组织,也有一定的介绍。本图谱共汇集图片近2000帧,这些图片大部分是从作者从事金相工作30年来的实践积累中精选出来的,有些则是为了使本图谱内容更趋于完善而特地制作的。因此,本图谱是一本通过金相技术鉴别钢铁材料内在质量和工艺水平的专著,谨献给祖国壮丽的社会主义事业。

本图谱编著时,对每一图片均列出其材料名称、处理情况和组织说明。在组织说明一栏里,除叙述各种显微组织的形貌、特征、含量以及分布情况外,尽可能从理论上阐述合金元素的作用、组织的形成机理和形成这些组织的工艺参数等。同时示范地介绍了试样制备技术对显微组织显示的影响以及如何正确鉴别这些显微组织的典型实例。本图谱之所以采取这样的编著形式,主要是为了让金相检验人员和热加工工艺人员都能对材料及其组织、性能与各种热加工工艺之间的关系有一个比较全面的认识,进而应用于实践,有利于发挥材料的作用,延长材料的使用寿命,提高和改进热加工工艺的水平。

本图谱承中国科学院学部委员、著名冶金学家周志宏教授撰写了序言;并在编著过程中,得到有关部门和同志们们的热情关注和支持,在此一并表示衷心的感谢。限于作者的水平,本图谱缺点、错误在所难免,欢迎批评指正。

作 者

1981年6月于上海

目 录

第一篇 铸 铁	1
第一章 白口铸铁金相组织	10
第一节 白口铸铁	10
第二节 合金白口铸铁	17
第二章 灰口铸铁金相组织	29
第一节 片状石墨形态	29
第二节 灰口铸铁	37
第三节 合金灰口铸铁	55
第四节 共晶团及磷共晶形态	75
第五节 缺陷实例	92
第三章 可锻铸铁金相组织	118
第一节 可锻铸铁石墨形态	118
第二节 珠光体可锻铸铁	124
第三节 铁素体可锻铸铁	129
第四节 缺陷实例	137
第四章 球墨铸铁金相组织	148
第一节 球墨铸铁石墨形态	148
第二节 球墨铸铁各种组织形态	196
第三节 铸造、退火、正火的组织	200
第四节 淬火、回火和等温淬火的组织	236
第五节 缺陷实例	262
第二篇 碳素钢与低合金钢	301
第五章 碳素钢金相组织	322
第一节 各种典型组织	322
第二节 碳素结构钢	349
第三节 碳素铸钢	387
第四节 碳素工具钢	394
第五节 缺陷实例	405
第六章 低合金钢金相组织	435
第一节 低合金结构钢	435
第二节 低合金铸钢	512
第三节 弹簧钢	523
第四节 轴承钢	543
第五节 低合金工具钢	564

第六节 缺陷实例·····	583
第七章 铁基粉末冶金金相组织·····	647
第一节 铁基粉末冶金·····	647
第二节 缺陷实例·····	663
第三篇 高合金钢 ·····	669
第八章 高合金工模具钢及高锰钢金相组织·····	685
第一节 高合金工模具钢·····	685
第二节 高速工具钢·····	711
第三节 高锰钢·····	728
第四节 缺陷实例·····	733
第九章 不锈钢金相组织·····	758
第一节 Cr13型不锈钢·····	758
第二节 高铬不锈钢·····	771
第三节 18-8型不锈钢·····	791
第四节 缺陷实例·····	803
第十章 高合金耐热钢金相组织·····	815
第一节 马氏体型耐热钢·····	815
第二节 奥氏体型耐热钢·····	831
第三节 缺陷实例·····	844
第四篇 钢铁化学热处理 ·····	859
第十一章 渗碳处理的金相组织·····	881
第一节 渗碳退火、正火的组织·····	881
第二节 渗碳淬火、回火的组织·····	893
第三节 缺陷实例·····	912
第十二章 氰化处理的金相组织·····	932
第一节 中温氰化的组织·····	932
第二节 缺陷实例·····	942
第十三章 氮化处理的金相组织·····	947
第一节 气体渗氮钢·····	947
第二节 气体氮化处理的组织·····	955
第三节 软氮化处理的组织·····	966
第四节 缺陷实例·····	981
第十四章 其它化学热处理的金相组织·····	991
第一节 渗硼处理的金相组织·····	991
第二节 渗钒、渗铬、渗铝、渗硫以及三元共渗的组织·····	1003

第一篇 铸 铁

铸铁是含碳大于2.06%的铁碳合金。碳在铸铁中除少量溶解于金属基体外,通常以游离状态的石墨存在,或以化合状态的渗碳体存在。铸铁按化学成分可分为一般铸铁和合金铸铁两类。在一般铸铁中,除了铁和碳以外,还含有硅、锰元素以及硫、磷等杂质元素。在合金铸铁中则含有铜、铬、钼、镍元素或根据需要加入的其他合金元素等。

一般说来,以铸铁与钢比,虽然在机械性能方面较钢为低,但其生产成本低廉,且具有许多优良的性能如减震性、耐磨性、铸造性和切削性。同时,铸铁的生产工艺和熔化设备比较简单,因此在工业生产中得到广泛地应用。按重量比统计,在汽车、拖拉机工业中,铸铁用量约占50~70%;在机床工业中,铸铁用量约占60~90%。

铸铁的性能包括机械性能和物理化学性能,是由铸铁的金相组织决定的。铸铁的金相组织,除存在各种形态和分布特征的石墨碳以外,金属基体的显微组织通常为珠光体和珠光体-铁素体,它们是在铸件的连续冷却过程中得到的。此外,铸铁还含有两种特殊的组织组成物,即渗碳体和磷共晶。随着进行不同的热处理,铸铁的金属基体还可以获得马氏体、贝氏体、索氏体等组织。因此,随着铸铁的化学成分以及热处理工艺的不同,铸铁的金相组织可以在很大范围内变动。研究铸铁的各种组织,包括各种石墨形态的结晶过程、形成机理,以及各种组织的相变过程,对掌握铸铁材料的性能具有十分重要的意义。为便于读者参考,以下对铸铁的牌号、性能、组织鉴别以及金相检测等方面的问题,作一概括的论述。

按照铸铁的化学成分、铸造工艺和断口来划分,可将铸铁分为白口铸铁;灰口铸铁;可锻铸铁和球墨铸铁等四类。

一、白口铸铁

铸铁中含硅量较低,同时由于快速冷却,抑制了石墨化,从而得到白口铸铁。在白口铸铁中所含的碳全部以化合状态即渗碳体(Fe_3C)的形态存在,其断口呈亮白色,故名。白口铸铁按其成分和组织,可分为亚共晶、共晶、过共晶白口铸铁。含碳4.3%者为共晶白口铸铁,其组织为共晶莱氏体(高温时为渗碳体和奥氏体,室温时一般为渗碳体及珠光体所组成);含碳小于4.3%者为亚共晶白口铸铁,其组织为初生枝晶状珠光体(高温时为奥氏体)和莱氏体;含碳大于4.3%者为过共晶白口铸铁,其组织为初生条状渗碳体及莱氏体。由于白口铸铁中存在大量的渗碳体,因此它显得非常硬而脆,难以切削加工,在工业生产中很少直接

用白口铸铁来制造机器零件的,它主要被用作炼钢的原材料,或用来制造可锻铸铁零件的毛坯。但白口铸铁的生产工艺简单、成本低廉,而且耐磨性良好,因此某些要求获得较高的表面硬度和耐磨性的零件,如内燃机推杆套筒、火车轮圈、冷铸轧辊、拖拉机犁铧等,常采用激冷的方法使其表面获得白口铸铁的组织,而其心部则维持灰口铸铁的组织,这种铸铁称为激冷铸铁或冷硬铸铁。

在白口铸铁中加入铬、钼、钒、镍等合金元素,易使白口铸铁的耐磨性获得显著地提高,可用来制造发动机的挺杆、推土机的密封环以及泥浆泵的壳体和叶片等。合金白口铸铁的显微组织通常为合金碳化物和马氏体基体所组成。

二、灰口铸铁

灰口铸铁因其断口呈暗灰色而得名。灰口铸铁的金相组织由金属基体与游离态片状石墨所组成。常用灰口铸铁的成分多在共晶附近,从而使灰口铸铁具有良好的流动性。灰口铸铁在结晶过程中,由于石墨的大量析出(约有80%的碳以石墨形式析出),减少了整个铸件在结晶过程中的收缩。石墨的析出给灰口铸铁带来两方面的特点,一方面由于石墨强度很低(抗拉强度不到2公斤/毫米²,布氏硬度不到3),且以片状形态存在于铸铁中,割裂了基体的连续性,因此灰口铸铁的强度不高,脆性较大,但却具有较高的抗压强度。另一方面,由于石墨存在,使铸件在震动时,能够迅速地吸收震动,具有良好的减震性能。因此灰口铸铁是制造机器底座的好材料。此外,由于片状石墨易使切屑断裂,导致灰口铸铁具有良好的切削性;同时,石墨还可以作为天然的润滑剂,相应地提高了灰口铸铁的耐磨性。由于片状石墨本身犹如铸铁中的内部裂纹,因此灰口铸铁的缺口敏感性较小。

片状石墨是灰口铸铁所特有的石墨形态。石墨形态的分类、长度和分布特征,在很大程度上受铸件的化学成分、生产工艺(孕育处理)及结晶条件的影响。根据第一机械工业部颁发的灰口铸铁金相标准(JB 2264-76),灰口铸铁的石墨形状按其分布特征分为:A型(片状石墨均匀分布);B型(片状与点状石墨聚集成菊花状分布);C型(部分带尖角块状、粗大片状初生石墨及小片状石墨);D型(点、片状枝晶间石墨呈无向分布);E型(短小片状枝晶石墨呈方向性分布);F型[星状(或蜘蛛状)与短片状石墨混合均匀分布]。石墨长度按ASTM标准分为8种:1号>100毫米;2号=50~100毫米;3号=25~50毫米;4号=12.5~25毫米;5号=6~12.5毫米;6号=3~6毫米;7号=1.5~3毫米;8号<1.5毫米。

灰口铸铁的石墨数量愈多,石墨彼此之间的隔离程度愈小,则对降低机械性能的影响也就愈明显。具有均匀分布的A型石墨,有最好的机械性能,其次是菊花状B型石墨。F型石墨的灰口铸铁具有很好的耐磨性,它常出现在过共晶成分、电炉熔炼的单体铸造活塞环中,是一种正常的石墨形态。块片状C型石墨在一般铸件中是很少见的,而且它属于铸件中不允许存在的石墨形态。枝晶点状D型和枝晶片状E型石墨,具有明显的过冷倾向,由于过冷作用,石墨大量析出,造成周围贫碳,冷却后该处易析出铁素体,使铸件的耐磨性遭致明显地降低,因此在有些零件的技术标准中对过冷石墨的数量给予明确的限制。但是目前有一种倾向,认为在有硬相质分布的耐磨铸件中,过冷石墨的数量可以不受限制,尤其是无方向性分布时。我们则认为,D型和E型石墨是过冷条件下形成的石墨形态,细小的点片状石墨增大了它的表面积,容易在使用中形成氧化膜,同时往往有多量的铁素体伴随过冷石墨产生,这些因素均对耐磨性不利。

灰口铸铁除片状石墨外,基体组织一般为珠光体、珠光体-铁素体、铁素体。由于铁素体灰口铸铁的强度极低,在生产中很少应用。因此,生产珠光体基体的灰口铸铁乃是我们的目标。因为珠光体的强度比较高,有铁素体存在时会降低灰口铸铁的强度,然而并不增加其塑性,这主要是片状石墨切割金属基体起主导作用的结果。

磷、硫元素在灰口铸铁中属于杂质元素,而在耐磨铸铁中,磷则作为一种重要的可利用元素,它将构成耐磨件的主要组成相——磷共晶组织,从而提高铸铁的耐磨性。

我国的灰口铸铁有七个牌号,它的分类、性能及用途见表 1-1。相应的化学成分见表 1-2。这七个牌号的灰口铸铁按金相组织分类:HT 10-26 为铁素体灰口铸铁;HT 15-33 为铁素体-珠光体灰口铸铁;HT 20-40、HT 25-47 为珠光体灰口铸铁;HT 30-54、HT 35-61 以及 HT 40-68 为孕育铸铁。

表 1-1 灰口铸铁的牌号、机械性能及用途(GB 976-67)

牌 号	抗拉强度 σ_b (公斤/毫米 ²)	抗弯强度 σ_w (公斤/毫米 ²)	硬 度 (HB)	用 途
HT 10-26	10	26	143~229	低负荷不重要的零件,如盖、外壳、手轮、支架、水泵叶轮等
HT 15-33	15	33	163~229	适用于中等负荷的零件,如轴衬套、壳体、轴承座、齿轮箱等
HT 20-40	20	40	170~241	承受较大负荷的零件,如汽缸、齿轮、机座、飞轮、床身、缸套、活塞、刹车轮、联轴器、齿轮箱、轴承座、油缸等
HT 25-47	25	47	170~241	
HT 30-54	30	54	187~255	具有一定的抗拉、抗弯强度,用来制造承受高负荷的零件,如汽缸体、缸套、缸盖以及大型机床的床身,高压的油缸、水泵泵体、阀体等
HT 35-61	35	61	197~269	
HT 40-68	40	68	207~269	

表 1-2 灰口铸铁的化学成分

牌 号	化 学 成 分 (%)					备 注
	C	Si	Mn	P(不大于)	S(不大于)	
HT 10-26	3.2~3.8	2.1~2.5	0.5~0.8	0.4	0.2	
HT 15-33	3.1~3.5	1.8~2.4	0.5~0.8	0.4	0.15	
HT 20-40	2.9~3.4	1.5~2.2	0.6~0.9	0.3	0.12	
HT 25-47	2.8~3.3	1.4~2.0	0.8~1.1	0.2	0.12	根据需要可作孕育处理
HT 30-54	2.7~3.2	1.1~1.5	0.8~1.2	0.15	0.12	需经孕育处理
HT 35-61	2.7~3.1	1.0~1.4	0.9~1.2	0.15	0.1	
HT 40-68	2.7~3.0	1.0~1.4	1.0~1.3	0.15	0.1	

灰口铸铁中由于片状石墨的存在,故一般不作热处理。少数灰口铸铁零件也有施以热处理的,如消除铸件白口的退火或正火;为提高铸铁硬度的淬火与回火等。这些热处理虽能改变金属的基体组织,但不能从根本上消除片状石墨的有害作用。灰口铸铁还可以采用表面热处理的方法如表面火焰淬火、高频淬火以及表面渗氮处理等,来提高铸件的表面硬度和耐磨性。

消除应力的时效处理则是灰口铸铁生产过程中一道不可缺少的工序, 因为铸件在冷却和组织转变过程中, 通常会出现内应力(热应力和组织应力), 由于这些内应力可能引起裂纹或翘曲, 导致铸件在机械加工后由于内应力的重新分布而变形, 影响铸件的加工精度, 为此, 必须进行消除内应力的时效处理, 在机械加工以前将铸件在仓库中静置 12~18 个月, 或将铸件加热到 500~550°C, 以每 25 毫米壁厚保温 2 小时计算, 随后以 30~50°C/小时的速度随炉冷却至 200°C 时出炉空冷。

灰口铸铁主要是由铁、碳、硅、锰为主要元素的多元合金。铸铁中的各种元素, 除碳主要以石墨、化合碳等形式存在外, 其他元素或溶解于渗碳体、铁素体, 或与铸铁的其他组元形成新的结构组分。决定铸铁组织的因素主要是化学成分和冷却速度, 亦即各种元素对石墨化过程的影响, 是削弱碳原子和铁原子之间的结合能力, 还是增强两者的结合能力。凡是能够促使碳析出成为石墨的元素, 如铝、碳、硅、钛、镍、铜、磷、钴、锆等, 称之为石墨化元素; 反之, 凡是阻止碳析出成为石墨的元素, 如钨、锰、钼、硫、铬、钒、铁、镁、铈、硼等, 则称之为反石墨化元素; 另外, 铌为中性元素, 既不能促进石墨化也不阻碍石墨化。化学成分是控制灰口铸铁性能的重要工艺参数, 为了计算某一成分铸铁的石墨化能力和结晶过程, 生产中通常采用碳当量(CE)和共晶度(S_c)这两个概念, 其数值按下式决定。

$$CE = C + \frac{1}{3}(Si \% + P \%)$$

$$S_c = \frac{C}{4.23 - \frac{1}{3}(Si \% + P \%)}$$

式中: C、Si、P 分别为铸铁的碳、硅、磷含量(%)。

按共晶度的大小可将铸铁分成三大类:

$S_c = 1$ (CE = 4.23) 为共晶铸铁;

$S_c < 1$ (CE < 4.23) 为亚共晶铸铁;

$S_c > 1$ (CE > 4.23) 为过共晶铸铁。

工业上常用的灰口铸铁属亚共晶铸铁, 从化学成分来看, 越接近共晶成分其铸造性能越好。但同样成分的灰口铸铁, 由于铸件壁厚的不同, 其强度可以相差 1~2 个牌号, 而且还有其它因素的影响, 所以一般灰口铸铁对于成分未作严格的规定。生产中可作为炉前控制, 以调整成分使不出现白口为宜, 灰口铸铁的牌号实际上是按照强度分级的。在灰口铸铁牌号标准中, 规定对不同壁厚的零件采用不同直径的试棒, 但通常所讲的牌号一般系指直径 30 毫米试样的检验结果。

灰口铸铁的石墨分布、大小以及基体组织, 对材料的性能有直接的影响, 因此, 利用金相方法来鉴别铸铁的质量是十分重要的手段。

三、可 锻 铸 铁

可锻铸铁又称展性铸铁或马铁。它是由白口铸铁经过石墨化退火而制成, 经过退火处理的可锻铸铁常获得团絮状石墨, 从而大大提高了铸铁的机械性能。所谓可锻铸铁, 是根据外来语直译的, 仅说明它具有一定的韧性和塑性, 在使用中能承受变形; 并不等于说它可以锻造。

可锻铸铁按其生产工艺不同, 通常有两种类型:

1. 白心可锻铸铁

白心可锻铸铁对铁水化学成分的要求没有下述黑心可锻铸铁那么严格,化学成分大致如下:退火前碳含量在2.8~3.2%;退火后碳含量在0.5~2.4%;硅含量为0.7~1.1%;锰含量为0.4~0.7%;硫含量为0.12~0.2%;磷含量为0.2%以下,由上可见,碳含量可以较高,甚至在铸态下可允许石墨出现,硅含量可以较低,硅低有利于脱碳而不利于石墨化。上述成分的白口铸铁生胚在氧化性介质中加热至950~1000°C经长时间退火而制成白心可锻铸铁。

白心可锻铸铁的断口呈银白色。心部的显微组织因退火冷却较快而得到珠光体和少量团絮状石墨,表层由于处于氧化性介质中长期地加热而氧化、脱碳,组织为铁素体,过渡层为铁素体和片状珠光体。

白心可锻铸铁由于生产工艺陈旧,脱碳退火周期很长,且机械性能不高,因此目前我国已很少生产。

2. 石墨化可锻铸铁

石墨化可锻铸铁的化学成分大致如下: C 2.4~2.7%; Si 1.4~1.8%; Mn 0.5~0.7%; P < 0.08%; S < 0.25%; Cr < 0.06%。注意,铬不能超过0.06%,否则难于进行石墨化;适当提高硅含量,可以消除一些铬的有害作用。石墨化可锻铸铁又可分为铁素体可锻铸铁(即黑心可锻铸铁)和珠光体可锻铸铁。

(1) 铁素体可锻铸铁,系将白口生胚置于退火箱中,用火泥密封,然后加热至900~960°C,进行保温后(第一阶段退火)炉冷至700~750°C再进行保温(第二阶段退火),待冷至600~650°C时即出炉空冷。

在上述处理过程中,共晶渗碳体在第一阶段保温时进行石墨化,在随后冷却时,奥氏体中碳的溶解度随之下降而析出石墨,它或依附渗碳体分解的石墨而析出或生成新相,然后至共析温度,奥氏体中的碳即进一步析出,析出的石墨将依附高温退火石墨而存在。此时基体组织为铁素体,其上布有退火石墨。表层由于生胚在退火过程中的脱碳作用而出现铁素体,或铁素体和片状珠光体;或片状珠光体等组织。

铁素体可锻铸铁因其断口呈黑绒状,边缘表层由于脱碳在共析转变温度析出珠光体而呈亮白色,故称这种铸铁为黑心可锻铸铁。

(2) 珠光体可锻铸铁,是白口生胚在高温(900~960°C)加热保温后,以较快的冷却速度通过共析转变温度,从而得到的基体为片状珠光体,其上布有团絮状石墨的组织。

我国可锻铸铁的牌号及其主要机械性能见表1-8。可锻铸铁的抗拉试样是用毛坯试棒进行试验的,各牌号的性能指标是以直径16毫米试棒获得的结果。

化学成分是决定可锻铸铁的机械性能及热处理的重要因素,可锻铸铁的化学成分应符合下列条件:

(1) 要求铸件完全白口化,退火时能促使渗碳体分解而获得退火石墨,若白口铸件存在片状石墨,则在石墨退火时,碳将依附原有片状石墨析出,从而不能获得团絮状石墨。

(2) 要求石墨化能力较强,以缩短石墨化退火的周期。

(3) 具有良好的铸造性能。

可锻铸铁推荐的化学成分: C 2.4~2.7%; Si 1.3~1.5%。碳、硅含量需根据铸件壁厚及其含硫量而定,当 $S \leq 0.15\%$ 时, $C+Si = 3.7 \sim 4.0\%$ 为宜;当 $S \geq 0.25\%$ 时, $C+Si =$

表 1-3 可锻铸铁的牌号和机械性能(GB 978-67)

牌 号	抗拉强度 σ_b (公斤/毫米 ²)	屈服强度 σ_s (公斤/毫米 ²)	伸 长 率 δ (%)	硬 度 (HB)	种 类
KT30-6	30	—	6	120~163	铁素体可锻铸铁
KT33-8	33	—	8	120~163	
KT35-10	35	—	10	120~163	
KT37-12	37	—	12	120~163	
KTZ45-5	45	28	5	152~219	珠光体可锻铸铁
KTZ50-4	50	34	4	179~241	
KTZ60-3	60	42	3	201~269	
KTZ70-2	70	55	2	240~270	

3.8~4.2%。铸件愈薄，C+Si量可愈高。但硅量过高，若在650°C以下缓冷，将会引起白脆缺陷。锰是稳定珠光体元素，会阻碍石墨化。硫是反石墨化元素，且会恶化铸造性能。锰则可以平衡硫的有害作用，当 $S < 0.2\%$ 时，锰量可按式决定： $Mn\% = 2S\% + 0.2\%$ ；若 $S > 0.2\%$ 时，锰量则按下式决定： $Mn\% = 1.75S\% + 0.2\%$ 。磷在可锻铸铁中被认为是有害元素，因为它会使铸铁的塑性及韧性急剧降低，磷还会引起冷脆，当可锻铸铁含硅量超过1.5%时，磷含量应控制在0.1%以下。前已述及铬元素应严格控制在0.06%以下，否则将严重影响石墨化退火。

可锻铸铁的快速退火，国内外已有许多研究报道，一是石墨化退火前进行一次正火和淬火，造成铸件内部缺陷，以作为石墨结晶的核心，加速石墨化。二是调整铸件的化学成分，并加入适量的变质剂，如加入一定量的铈、硼、铝进行变质处理，它不仅能缩短退火时间，并能细化晶粒，提高铸件的机械性能。通常在加入铈、硼、铝等元素时，可以单独加入，亦可混合加入。

可锻铸铁中最有代表性的石墨形态是团絮状石墨，存在这种形状的石墨，将大大有利于减轻金属基体强度的降低，并使之具有塑性。通常，在可锻铸铁中较多出现的是团絮状石墨和絮状石墨两种；有时还会出现球团状及聚虫状石墨；由于某些工艺因素的影响，铸态易出现一次结晶石墨，在金相检验时它呈枝晶状。

根据我国第一机械工业部铁素体可锻铸铁金相标准(JB 2122-77)，按照石墨由紧密到松散逐渐过渡的特点，排列了常见的五种形状：即球团状(石墨较致密，外形近似圆形，周界凹凸)；团絮状(类似棉絮状，外形较不规则)；絮状(较团絮状石墨松散)；聚虫状(石墨松散，类似蠕虫状石墨聚集而成)；枝晶状(由颇多细小的短片状、点状石墨聚集而成，呈树枝状分布)。

铁素体可锻铸铁中的石墨很少以单一形态出现，往往是由几种形状同时存在，而以一种形状为主。根据石墨形状对机械性能的影响，可以分为五级：

第一级 石墨大部呈球团状，允许有不大于15%的团絮状等石墨存在，不允许有枝晶状石墨。相应于牌号KT37-12。

第二级 石墨大部呈球团状、团絮状，允许有不大于15%絮状等石墨存在，但不允许有枝晶状石墨。相当于牌号KT35-10。

第三级 石墨大部呈团絮状、絮状,允许有不大于15%聚虫状及小于试样截面积1%的枝晶状石墨存在。相当于牌号KT33-8。

第四级 聚虫状石墨大于15%,枝晶状石墨小于试样截面积的1%。相当于牌号KT30-6。

第五级 枝晶状石墨大于或等于试样截面积的1%。机械性能达不到最低牌号要求。

铁素体可锻铸铁中的石墨分布对机械性能有直接的影响,按石墨分布分级:第一级,石墨分布均匀或较均匀;第二级,石墨分布不均匀,但无方向性;第三级,石墨为有方向性分布。此外,可锻铸铁金相检测的特点是:以石墨颗数来衡量固态下石墨化的程度,至于石墨大小,则因可锻铸铁石墨形状很不规则而无法测量,这点与灰口铸铁或球墨铸铁不同。铁素体可锻铸铁中的珠光体量作为退火不完全而残留在基体中的一种组织,珠光体的存在将使铸铁的韧性下降,因此残存的珠光体量(百分数)是考核铁素体可锻铸铁的质量指标之一。

四、球 墨 铸 铁

球墨铸铁作为一种新型的结构材料,已在机械工业各部门得到广泛地应用。它是通过浇注前往铁水中加入一定量的球化剂和墨化剂(硅铁或硅钙合金),使石墨结晶时成为球状而铸成的。并因此而得名。

我国球墨铸铁生产大都使用纯镁或稀土镁作为球化剂。镁的球化能力强,并适用于从亚共晶到过共晶较广范围内的铁水成分,它白口倾向小,球化稳定,是常用的球化剂。但是,用纯镁处理的球墨铸铁,铸件的缩松、夹渣、皮下气孔等铸造缺陷很难避免。1965年前后,自我国应用稀土镁作球化剂获得成功以来,稀土镁球墨铸铁即在全国得到广泛的推广和应用,使铸件的夹渣、缩松等铸造缺陷显著减少,性能有所提高,而且简化了球化处理工艺,操作亦较安全。关于球化处理的方法通常有压入法和冲入法两种。以纯镁作球化处理时,采用压力包压力加入法;以稀土镁作球化剂时,一般采用包底冲入法。

球墨铸铁最有代表性的石墨形状是球状。球状石墨的光学性能:低倍时,近似圆形;高倍时,通常不是球状而是多边形。典型的球状石墨,在明场下呈辐射状,结构清晰;在暗场下具有一个亮圈;在偏振光下有明显的各向异性效应。

球状石墨是一种最理想的石墨形状。与纯镁处理的球墨铸铁比较,加入稀土后,除小件、薄壁铸件以及采用包外孕育、多次孕育等工艺浇铸的铸件外,一般不易获得全部的球状石墨。要获得球状石墨,必须控制原铁水的化学成分、孕育处理、球化处理、浇铸温度、停留时间和冷却速度等各种条件。镁是主要的球化元素;稀土元素也有一定的球化作用,但主要是减少铸铁中的夹渣、疏松等铸造缺陷,改善铸铁的性能,相应地减少了镁的使用量。一般说来:用纯镁处理时,在正常的孕育强度下,中小型铸件保证球化所需的残余镁量为0.04~0.06%;用稀土镁处理时,则当残余镁量为0.03~0.06%、残余稀土量为0.02~0.04%时,形成球状石墨的可能性较大。

在稀土镁球墨铸铁中,除球状石墨外,常见的石墨形状尚有团状石墨、团片状石墨、厚片状石墨、开花状石墨和枝晶状石墨等六种。

孕育处理、球化处理是保证球化的重要条件,而孕育处理又是球化处理后必不可少的一道工序,一般是用75%硅铁进行孕育。多次孕育、包外孕育、型腔内孕育等工艺,对提高稀土镁球墨铸铁球墨的圆整程度,和防止铸件孕育衰退出现白口等均有显著的效果。

球墨铸铁的机械性能比灰口铸铁有明显的提高,因为球墨铸铁中的石墨呈球状,它的表面积与体积之比最小,切割基体作用小;由于石墨呈球状分布,使应力集中程度最小,可有效地利用基体强度的70~90%(而灰口铸铁一般只能利用基体强度的30%),球墨铸铁还可以通过合金化来强化基体,并可施行各种热处理,以改变其基体的显微组织,从而使基体的强度、塑性和韧性得到充分的发挥,并获得较好的耐磨、耐热和耐蚀等性能。

球墨铸铁广泛用来制造各种机械的运动件,如曲轴、凸轮轴、连杆、齿轮等,它不需要大型的锻压设备,是以铸代锻、以铁代钢、降低生产成本、保证使用安全的一种重要的金属材料。

球墨铸铁的合金化,有以要求高强度、耐磨性为目的,加入铜、铝合金元素的铜铝球墨铸铁;有以要求耐热性为主的高硅和硅铝耐热球墨铸铁;以及要求耐磨和具有一定韧性的含锰球墨铸铁;从而充分满足各种工程的特殊要求,扩大球墨铸铁的应用范围。

球墨铸铁热处理的种类也是多种多样的,有加热到 A_1 温度以上,保温一定时间后,随炉冷至 600°C 出炉,得到铁素体基体的退火处理;有加热至 A_1 温度以上,保温一定时间后出炉,通过喷雾冷却或空冷得到珠光体、或珠光体加铁素体基体的正火处理;有在加热至 A_1 以上奥氏体化后,再快速冷却到某一温度(例如 300°C),并在这一温度下等温适当时间,使奥氏体在恒温下发生贝氏体相变,以提高球墨铸铁的综合机械性能的等温淬火;有在加热至 A_1 以上保温淬火后高温回火的热处理工艺(即调质处理)。此外,球墨铸铁尚可针对产品零件的特殊要求而施以表面处理,如表面高频淬火、表面渗氮处理等。

我国的球墨铸铁有七个牌号;表1-4所列即为球墨铸铁的牌号及其机械性能。

表1-4 球墨铸铁的牌号和机械性能(GB 1348-78)

牌 号	抗拉强度 σ_b (公斤/毫米 ²)	屈服强度 σ_s (公斤/毫米 ²)	伸 长 率 δ (%)	冲击韧性 a_k (公斤-米/厘米 ²)	硬 度 (HB)
QT40-17	40	25	17	6	179
QT42-10	42	27	10	3	207
QT50-5	50	35	5	—	147~241
QT60-2	60	42	2	—	229~302
QT70-2	70	49	2	—	229~302
QT80-2	80	56	2	—	241~321
QT120-1	120	84	1	3	

从表1-4的组织状态分析,球墨铸铁QT40-17、QT42-10属铁素体型球铁,QT40-17采用石墨化退火来获得铁素体基体,QT42-10则是铸态铁素体球铁,主要用于汽车的底盘和手扶拖拉机后桥壳等。QT50-5为珠光体-铁素体型球铁,可在铸造状态得到牛眼状组织或通过部分奥氏体化正火的热处理来达到,一般用于具有适当强度、适当伸长率,要求综合机械性能较好的零件;也可用来制造锻模。

QT60-2、QT70-2和QT80-2属于珠光体型的球铁(通过微量合金化或热处理手段来达到),一般用于重要的零件,如发动机的曲轴、凸轮轴等。

QT120-1 是贝氏体型球铁, 需要加入少量的合金元素钼与铜, 并施加等温淬火热处理来达到, 是一种具有高强度、高硬度、高韧性, 综合机械性能较好的材料。

球墨铸铁热处理时的原理与钢基本相似, 但又不同于钢。主要有以下两个特点。

第一: 球墨参与相变, 它象“仓库”一样, 在加热或冷却时能吸收或放出碳原子, 致使基体的碳含量能在较大范围内变动。

第二: 基体的化学成分存在微观偏析, 球墨周围硅量较高, 称为高硅区; 共晶团晶界处磷、锰含量较高, 称为高磷、高锰区。经电子探针测定, 球墨周围高硅区的硅量要比共晶团晶界处高出一倍左右, 而共晶团晶界处的锰量则比高硅区高三倍, 该处的磷量也远较一般基体为高。所以这两个区域具有不同的临界点和马氏体转变点。

上述两个特点不是孤立的, 而是相互联系的。由于球墨的存在, 可以增加或降低基体的成分偏析; 反之, 基体的成分偏析, 也能加速或减慢碳的溶解和吸附。同时, 磷共晶的溶解、分解和转变为另一种新的组织, 也将增加或减少基体中的成分偏析。

由于上述两个区域的成分不同, 导致其临界点也不同, 从而使球铁在加热或冷却过程中的组织转变产生了复杂性。这种复杂性, 使球铁在热处理时产生了一系列的特点和现象。

铁素体-珠光体球铁在加热时, 一般基体(高硅区)的珠光体, 当加热至珠光体→奥氏体开始转变温度时, 即开始向奥氏体转变, 随着温度的上升, 这一转变逐渐增多, 当温度到达珠光体→奥氏体转变终了温度时, 高硅区的珠光体已完全转变为奥氏体; 此时铁素体开始向奥氏体转变。但在共晶团晶界处的珠光体, 由于成分偏析的作用, 则于此时刚开始向奥氏体转变。因此, 高磷、高锰区的珠光体向奥氏体转变迟于高硅区。这时组织转变同时存在以下三种情况: (1) 高硅区全为奥氏体, 该处少部分球墨发生溶解, 使一部分碳溶于奥氏体; (2) 一部分铁素体向奥氏体转变; (3) 高磷、高锰区的珠光体开始转变为奥氏体。当温度继续升高至铁素体转变终了温度时, 高磷、高锰区的珠光体尚未完全转变, 仍有一部分保留下来, 只有当温度继续上升超过 A_1 时, 高磷、高锰区未转变的珠光体才能继续不断地向奥氏体转变。与此同时, 将有更多球墨的碳原子溶入奥氏体, 使奥氏体中的碳量不断增加。球铁在加热时的这种组织转变的复杂性, 使它在热处理时的相变出现交叉重叠的情况。上述特点, 在淬火、等温淬火的回火处理时, 将表现得更为突出。一般说来, 高硅区的 M_s 点较高磷、高锰区为高, 淬火后, 导致这两个区域获得的组织有所不同, 后者将存在大量的残留奥氏体, 以致在同一温度回火时, 其回火产物也不同。如在低于 550°C 回火时, 高硅区为回火索氏体; 高磷、高锰区则为回火马氏体。在大于 600°C 回火时, 高硅区索氏体中的渗碳体除开始聚集、粗化外, 还将发生墨化, 析出二次石墨碳; 高磷、高锰区则刚开始转变为索氏体组织。

由此可见, 球墨铸铁在热处理时的组织转变是十分复杂的, 出现了许多少见的现象和特点, 但这些现象和特点都是受上述两个基本特点制约的, 或者说是由这两个基本特点派生出来的。

第一节 白口铸铁

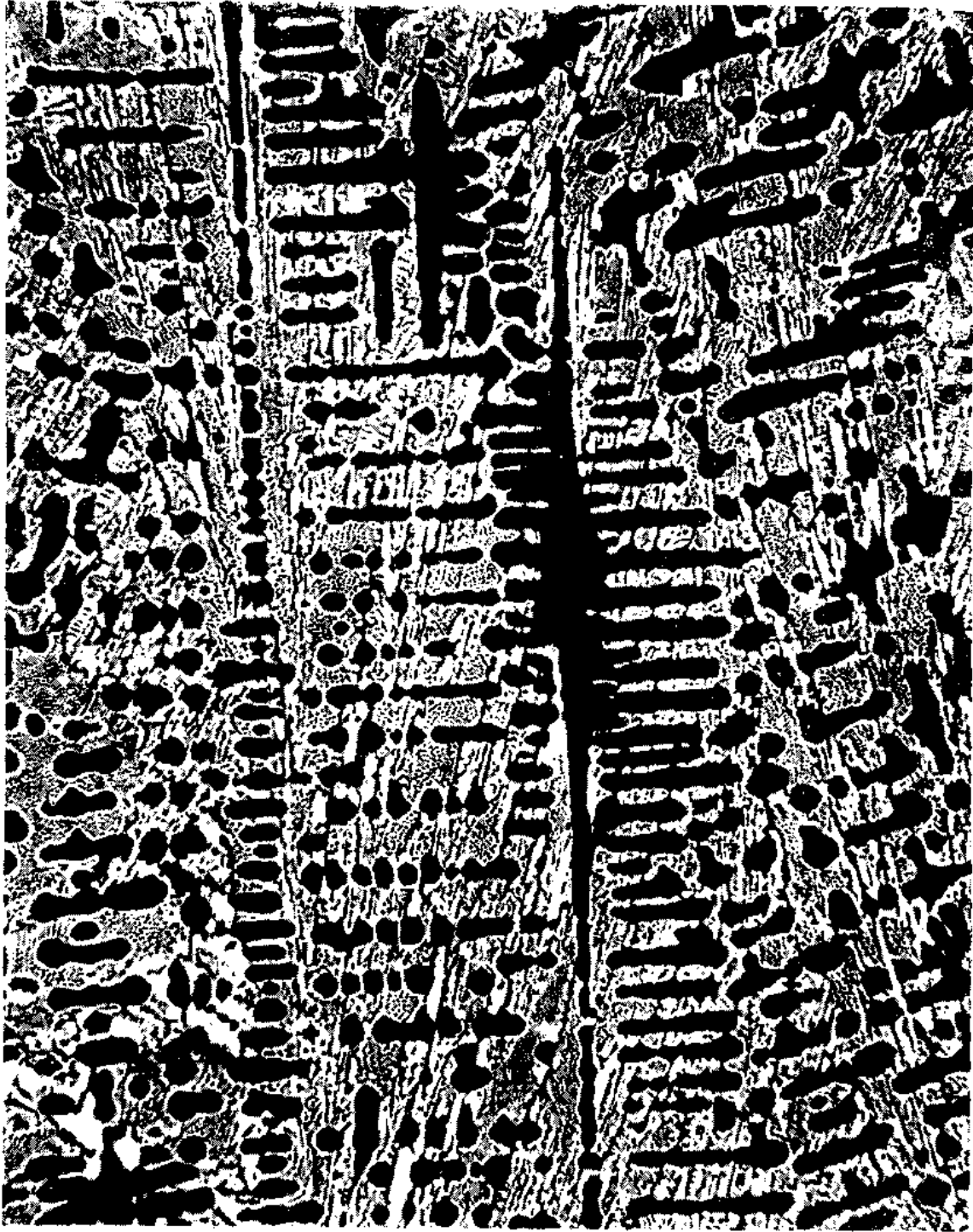


图 号: 1-1

200 ×

材料名称: 亚共晶白口铸铁。

浸 蚀 剂: 4% 硝酸酒精溶液。

处理情况: 铸造状态。

组织说明: 典型的亚共晶白口铸铁组织。

黑色枝晶状为细珠光体(初生奥氏体的转变产物), 基体为共晶莱氏体组织。



200x

图 号: 1-2

材料名称: 共晶白口铸铁。

浸 蚀 剂: 4% 硝酸酒精溶液。

处理情况: 铸造状态。

组织说明: 典型的共晶白口铸铁组织。

共晶莱氏体组织——白色基体为共晶渗碳体, 黑色圆粒及长条为珠光体。