

大型铸锻件 缺陷分析图谱

大型铸锻件行业协会

大型铸锻件缺陷分析图谱编委会 编著



机械工业出版社

大型铸锻件是冶金、电力、石油、化工、矿山、交通运输和原子能等工业大型设备的重要支柱，提高大型铸锻件的质量，对保证其安全性和可靠性具有十分重要的意义。

本图谱汇集了三十年来我国重型机械行业生产、科研单位大型铸锻件缺陷分析，将其分类，使之系统化，并力求将每种缺陷的特征、产生原因、一般性对策加以简要的概括和分析。它是一份珍贵的技术资料，汇集的 700 余张照片均取自生产第一线，其中大型钢锭、大型锻件及铸件的解剖分析，更是经过周密组织和多方协作才完成的，因此本图谱是一代工程技术人员和金相工作者心血的结晶，对提高大型铸锻件质量是一本有价值的参考书。

大型铸锻件缺陷分析图谱

大型铸锻件行业协会
大型铸锻件缺陷分析图谱编委会 编著

*

责任编辑：张绪江 责任校对：宁秀娥
封面设计：郭景云 版式设计：张世琴

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）
（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆ 印张 21³/₄·字数 540 千字
1990 年 10 月北京第一版·1990 年 10 月北京第一次印刷
印数 0,001-3000·定价：20 元

*

科技新书目：229-006
ISBN 7-111-02500-8/TG·581(X)

序

大型铸锻件是大型机电设备的支柱，在设备运转时，承受着巨大而复杂的载荷。由于它们体积大，重量重，生产工艺复杂，所以出现缺陷的几率较高，缺陷形态亦较特殊。如果一定形状、大小的缺陷出现在关键部位，就可能导致铸锻件判废或监督使用。三十余年来，我国各大重机厂的工程技术人员以及为数众多的金相技术工作者和材料研究人员，为提高大型铸锻件的质量和承载能力，延长其工作寿命，耗去半生精力，付出了艰辛的劳动。他们通过对大量大型铸锻件的缺陷研究、废品分析和失效分析，逐步对缺陷的特征和产生机制有了规律性的认识，并提出了一些行之有效的控制缺陷产生的措施和判废标准。

这套图谱就是一代工程技术人员和金相技术工作者心血的结晶。它标志着我国大型铸锻件的缺陷检测技术已从单一的金相分析发展到诸如电子探针、电子显微镜、无损检测等先进技术的应用阶段，标志着我国大型铸锻件行业已建立了一支既有理论又有生产实践经验的工程队伍，标志着我国大型铸锻件的生产已经有了相当坚实的基础。“图谱”的诞生必将对我国大型铸锻件的生产检验起到有力的指导作用。因此，我们应当感谢“图谱”的作者们对我国重型机械制造行业的发展做出的突出贡献。

“图谱”是一份珍贵的技术资料。图谱中的 700 余幅照片均取自大型铸锻件生产第一线。它们仔细记录和描绘了各种缺陷的形态特性，有些资料的获得相当不易。55t, 34CrMoA 钢锭的解剖分析，12000kW 发电机转子锻件的解剖分析，重 42t 的水轮机不锈钢叶片分析，都是周密组织，多方协作，按设计要求做出产品，然后实体解剖，进行了全面的检测分析，因而资料十分详尽、可靠、难得，异常珍贵。我见过不少国外出版的综合性或专业性图谱，当然各有特色，但这样大量由生产现场取样精选制做的，详尽而有权威性的图谱还第一次见。希望今后隔一年再版一次，去掉一些过时的，补充一些新鲜的内容，多年以后，这一系列图谱将成为我国大型铸锻件发展史的一个重要篇章。

我怀着极大的热忱向读者推荐这本图谱，希望“图谱”能对大型铸锻件生产工艺的改进，质量检测水平的提高以及从事这方面工作的同志业务的进步起到应有的作用。



1990. 10.

序 言

大型铸锻件是重型机器产品的一个重要组成部分，其质量水平直接影响机器产品的使用寿命。为了适应冶金、矿山、电力、石油、化工、造船、国防以及其它国民经济部门发展的需要，我国大型铸锻件的生产已经经历了恢复时期、建设时期、生产发展时期、质量提高时期，目前，正在向全面提高质量和经济效益的方向发展。在发展过程中，由于各时期的技术水平、质量管理和生产条件的局限，必然会在各类大型铸锻件中出现各种各样的缺陷，如电站锻件中的夹杂，支承辊的延迟断裂，冷轧工作辊的剥落，水轮机不锈钢叶片的偏析，大型锻件的白点，大型钢锭的纵裂、横裂等。大型铸锻件的生产，就是在不断地发现缺陷，分析缺陷，控制缺陷的产生，从而不断地提高技术水平发展起来的。

这本大型铸锻件缺陷分析图谱，就是我国大型铸锻件发现缺陷、分析缺陷、控制缺陷产生的部分记录。它是在大型铸锻件行业协会倡议和具体组织下，经过多年的收集、整理、筛选完成的。将低倍、金相显微镜、扫描电镜、透射电镜、能谱仪等测试手段分析得来的各类图片、数据，编撰成为内容比较系统、图例比较典型、分析比较实际的一册图谱。对正确地进行质量分析，不断减少缺陷和废品，改进热加工工艺，提供非常有价值的基础技术资料。

参加图谱编辑的集体是由有三十年左右长期从事大型铸锻件质量分析的工程技术人员组成的。他们具有丰富的实践经验和理论水平。尽管如此，由于编者积累的资料还不够多，书中出现一些缺点是难免的。希望广大读者将意见随时反馈给编委会，以便进一步修改、补充和完善，为提高大型铸锻件质量水平服务，为振兴重型机械工业做出贡献。

机械电子工业部第二装备司 庄大象
1990. 10.

前 言

大型铸锻件是冶金、电力、石油、化工、矿山、交通运输行业和原子能工业等大型设备的重要支柱，因此，提高大型铸锻件的质量，保证其运行过程中的安全性和可靠性，具有十分重要的意义。

失效分析证实，经过周密设计，被认为极可靠的大型铸锻件所发生的早期低应力破坏多与宏观冶金缺陷、类裂纹以及氢脆、应力腐蚀等诸因素有关。因此，正确认识与判断大型铸锻件的缺陷类型，研究其产生机制，为改进生产工艺提供可靠依据，以防止这些缺陷的重复发生，一直是金相工作者、工艺人员和材料研究人员不断探索的重要课题之一。

本图谱汇集了我国重机行业和有关研究单位的大型铸锻件缺陷分析案例，将其分类，使之系统化，并力求将每种缺陷的特征、产生原因、一般性对策加以简要的概括和分析，这对加强质量管理，进一步提高大型铸锻件质量来说，是一本可以借鉴的参考资料。

大型铸锻件的使用条件恶劣，技术条件要求苛刻，生产工艺复杂，加之其本身所具有的物理的和化学的不均匀性以及其它独特的缺陷，所以，缺陷分析方法不同于中、小铸锻件。为此，本图谱在第1章较系统地阐述了缺陷的产生、检测和分析三部分内容；第2章所展示的大型钢锭、转子锻件及不锈钢水轮机叶片的解剖分析，不仅揭示了大型铸锻件的结晶规律，而且也揭示了结晶缺陷的特征、分布状态及其形成机制，故有助于我们增加对大型铸锻件的理性认识；第3章及第4章是大型铸锻件缺陷分析图谱部分，内容丰富，涉及面广，所展示的图片共计700余张，按缺陷类别分节，并简要概述了缺陷的定义、特征、产生原因以及防止缺陷产生的一般性措施；为了说明材质内在缺陷因素对失效的影响，在第5章提供了大型铸锻件失效分析案例，以作参考。

提供上述缺陷研究、废品分析与失效分析案例的单位有第一重型机器厂、第二重型机器厂、上海重型机器厂、太原重型机器厂、洛阳矿山机器厂、沈阳重型机器厂、北京重型机器厂、昆明重型机器厂、西安重型机器厂、大连重型机器厂、本溪钢厂、郑州机械研究所、上海材料研究所、中国机械工程学会失效分析工作委员会等单位。图谱的编辑工作是在齐齐哈尔铸锻焊研究所的具体组织下进行的。在编写过程中，西安交通大学周惠久教授、李年副教授以及重型机械行业的著名专家庄大象、韩玉斌、朱尧全、贾乃昌、吴季恂、张伯森、刘鹏、陈玉民、张绪江高级工程师给予了指导，并对图谱进行了审定工作，哈尔滨工业大学雷廷权教授、德阳大锻件研究所陈正三高级工程师，太原重型机器厂高炳章高级工程师和郑州机械研究所陈书贵高级工程师对图谱的出版也给予了热情的关注和支持，在此一并表示感谢。

由于编著者水平所限，图谱中一定存在不少问题和缺点，期望读者批评指正。

大型铸锻件缺陷分析图谱编委会

1990. 10.

大型铸锻件缺陷分析图谱编委会

人员名单

主编：庞 钧

主审：吴景之

编委：董春生 徐彦和 常 竞 于淑卿 李秀兰 毛照樵
张丽娟 白小明

责任编辑：张绪江

目 录

1 大型铸锻件缺陷的分析方法	1
1.1 缺陷的产生	1
1.1.1 生产工艺与缺陷的产生	1
1.1.2 大型铸锻件缺陷产生的特点	3
1.2 缺陷的检出	6
1.3 缺陷的特征研究	12
1.3.1 研究手段	12
1.3.2 缺陷试样的制备	12
1.3.3 研究内容	13
1.4 缺陷的分析	16
2 大型钢锭及大型铸锻件解剖分析	17
2.1 55t,34CrMo1A 钢锭的解剖分析实例	17
2.1.1 硫印及低倍组织	17
2.1.2 化学成分的不均匀性	22
2.1.3 氢、氧的分布	26
2.1.4 夹杂物类型及分布状态	27
2.1.5 结论	32
2.2 34CrMo1A 钢 1.2 万 kW 发电机转子锻件的解剖分析实例	33
2.2.1 硫印及低倍组织	35
2.2.2 化学成分的不均匀性	38
2.2.3 力学性能与显微组织的不均匀性	39
2.2.4 夹杂物的类型及分布状态	42
2.2.5 结论	48
2.3 ZG0Cr13Ni6Mo 不锈钢 17.5 万 kW 水轮机叶片铸件的解剖分析实例	48
2.3.1 硫印	50
2.3.2 低倍组织及断口	50
2.3.3 宏观偏析与微观偏析	56
2.3.4 显微组织的不均匀性	60
2.3.5 力学性能的不均匀性	60
2.3.6 结论	63
3 大型锻件缺陷	64
3.1 夹杂物	64
3.2 缩孔残余	88
3.3 气泡	93

3.4	翻皮	98
3.5	轴心晶间裂纹	104
3.6	疏松	106
3.7	偏析	109
3.7.1	锭型偏析	109
3.7.2	点状偏析	113
3.7.3	电渣重熔钢锭中的波纹状偏析	120
3.7.4	电渣重熔钢锭中的斑块状偏析	120
3.8	钢锭裂纹	122
3.8.1	钢锭的纵裂纹	122
3.8.2	钢锭的横裂纹	127
3.9	锻造裂纹	131
3.9.1	钢锭中的内部宏观缺陷引起的锻造裂纹	131
3.9.2	钢中微量有害元素沿晶析出引起的锻造裂纹	139
3.9.3	第二相引起的锻造裂纹	143
3.10	过热和过烧	160
3.10.1	过热	160
3.10.2	过烧	160
3.11	折叠	166
3.12	因锻造工艺不当而产生的裂纹	169
3.13	淬火裂纹	175
3.13.1	纵向淬火裂纹	176
3.13.2	横向淬火裂纹	181
3.13.3	径向剥离型淬火裂纹	185
3.13.4	网状淬火裂纹	187
3.14	回火脆性	188
3.15	白点	191
3.16	缺陷断口	208
3.16.1	层状断口	208
3.16.2	云片状断口	215
3.16.3	撕痕状断口	218
3.16.4	茶状断口	220
3.16.5	偏析线断口	223
4	大型铸件缺陷	226
4.1	缩孔	226
4.2	缩松	229
4.3	气孔	234
4.4	偏析	236
4.5	冷裂与热裂	239

4.6	合金铸钢中的白点	242
4.7	铸钢件中的沿晶断口	244
4.7.1	氮化铝引起的沿晶断口	244
4.7.2	硫化物引起的沿晶断口	251
4.8	球墨铸铁件中的石墨漂浮缺陷	254
4.9	球墨铸铁件中的球化不良缺陷	258
4.10	球墨铸铁件中的夹渣	261
4.11	大型铸锻件中的焊接缺陷	264
4.11.1	气孔	265
4.11.2	夹渣	265
4.11.3	未焊透	265
4.11.4	焊接裂纹	265
5	大型铸锻件失效分析与案例	273
5.1	材料缺陷引起的失效	273
5.1.1	缩管残余和疏(缩)松引起的失效	273
5.1.2	非金属夹杂物引起的失效	277
5.1.3	组织不均匀引起的失效	281
5.1.4	裂纹引起的失效	287
5.1.5	氢和残余应力引起的失效	297
5.2	设计、制造、安装、使用与维护不当引起的失效	299
5.3	与工作环境有关的失效	307
5.4	失效分析案例	311
〔案例 1〕	船闸拉杆断裂事故分析	311
〔案例 2〕	水轮机转轮失效分析	317
〔案例 3〕	冷轧辊断裂分析	323
〔案例 4〕	汽轮发电机转子表面裂纹分析	329
	主要参考文献	335

1 大型铸锻件缺陷的分析方法

大型铸锻件的质量主要表现在纯净性、均匀性和致密性三方面。纯净性、均匀性和致密性的任何不足都会影响质量，而成为缺陷。缺陷愈严重，对质量的影响也愈大，缺陷超过限度导致铸锻件的质量不能满足技术条件的要求而报废。所以，通过对缺陷的分析，了解缺陷的性质，明确缺陷产生的原因，可为研究和控制缺陷的产生提供依据。

大型铸锻件的生产，工序多，周期长，工序中的每个细小环节都影响着产品质量，控制稍有不当，就会产生足以影响质量的缺陷。由于铸锻件的生产过程大部分是在高温状态下进行的，缺陷不能及时检出，所以，在前一道工序产生的缺陷，往往在多道工序之后，甚至到产品终检时才被发现，这就给缺陷的识别带来困难。由于缺陷的产生和工艺过程密切相关，所以，要正确识别缺陷的性质，判定缺陷产生的原因，不仅要熟悉检测技术，采用正确的分析方法，掌握缺陷的宏观、微观特征，而且还要了解缺陷产生的过程和工艺之间的关系。

1.1 缺陷的产生

1.1.1 生产工艺与缺陷的产生

1) 冶炼

钢液的质量是决定铸锻件质量的先天条件，钢液质量具体表现在成分、气体和夹杂物含量与温度等方面；目前普遍采用的碱性电炉和碱性平炉炼钢，可去除硫、磷等杂质，但无法去除铜、锡、锑、铅、砷等有害微量元素，所以，炉料的准备不可忽视；炉料在装炉前必须充分烘烤，以免增高钢液的气体含量；氧化与还原是除气、净化、调整成分和温度的过程，沸腾不充分、还原不足都会导致气体和夹杂物含量的增高；钢液温度、炉渣碱度及流动性的控制是关键，这是炉渣与钢液充分反应的保证，决定着钢液的纯净度。

2) 出钢

平炉或电炉炼好的钢液要从炼钢炉排入盛钢桶，然后运送到锭模或铸型附近进行浇注，这个过程的关键是尽可能地保持钢液的温度和纯净度，出钢槽和盛钢桶必须仔细清理并充分预热，若清理不好，耐火材料或炉渣碎块卷入钢液，如不能全部上浮，就会形成外来夹杂物；出钢槽或盛钢桶预热不充分，使钢液温度降低，也影响卷入夹杂物的上浮。出钢过程往往要向盛钢桶中加铝或硅钙进行终脱氧，加入量要注意控制，过多的铝量，会形成大量的氯化铝夹杂物，增大铸锭或铸件的开裂倾向，降低钢的韧性。

3) 注锭

将炼好的钢液注入钢锭模，得到表面良好、内部纯净、均质而致密的钢锭，这是铸锭的基本要求。要根据锻件的要求设计或选择适当的锭型，它直接影响钢锭的凝固过程，小高径比和大锥度的锭型有利于顺序凝固，减轻轴心疏松，但同时也使底部沉积锥加剧；锭模模面要平整，模面凹凸不仅会影响脱模，还会因妨碍钢锭收缩而引起表面开裂；锭模要充分烘烤干燥，否则会引起皮下气泡；锭模温度不可过高，温度过高，会减缓钢锭的凝固速度，而加大偏析，钢液在盛钢桶内要有足够时间镇静，使夹杂物充分上浮，然后浇注；注锭过程是保

证钢锭质量的重要环节，注速的控制很重要，过快会使钢锭产生纵裂，过慢会使钢液二次氧化增大，夹杂物增多；在整个浇注过程，锭身的注速要快，冒口的注速要慢，以达到充分补缩的作用；钢流要平稳，使液面平稳上升，不稳定的钢流会将液面氧化膜卷入内部，形成翻皮，而断流则会造成冷隔，这些都是浇注过程中的禁忌；钢液的浇注温度要适当，温度过高使凝固速度减慢，会增大缩松和偏析，而温度过低使钢液粘度增大，易在水口形成结瘤，甚至将水口堵塞影响浇注。

真空除气技术的采用可显著降低钢中的氢含量；真空浇注还可避免二次氧化；真空碳脱氧工艺有显著的除气效果，而且用碳脱氧代替炉后铝或硅钙脱氧，可使脱氧产物减少，大大提高钢的纯净度。

4)脱模、冷却或热送

浇注好的钢锭要静置足够的时间，使内部充分凝固，才能脱模，过早地翻动会引起内裂；脱模后要及时热送或送入冷却炉(坑)缓冷，以免因过度冷却产生过大热应力和组织应力，而引起轴心的晶间裂纹或纵向裂纹。

5)锻造

锻造的目的不仅是成型和得到所需的尺寸，而且还要求打碎铸态粗大晶粒，使内部孔隙锻合，以得到致密的内部组织。加热使钢的变形抗力降低，热塑性提高，为锻造创造必要的条件，不过，加热温度过高，会引起过烧，锻时发生龟裂；而无锻比加热时，温度更应严格限制，以免晶粒粗大，给锻后热处理带来困难；冷锻加热要注意装炉温度和升温速度的控制，对合金钢和高碳钢尤其要注意，过高的装炉温度和过快的升温速度，都会引起过大的热应力，而使钢锭产生横裂。锻造是塑性变形过程，要根据变形要求，选择合理的变形方式，对心部性能有要求的轴类锻件，更要注意中心缩松的锻合；钢锭的粗大柱状晶热塑性很低，始锻时要轻压倒棱，将粗晶充分打碎，这对于开裂倾向大的钢锭是很必要的。拉应力是引起锻造开裂的根源，对锻造过程中形成的拉应力要特别注意，低温强压和小进给大压下工艺是锻造中的禁忌。

锻造时要注意控制钢锭顶部与尾部的切除量，顶部切除不足，常使锻件出现缩孔残余，尾部切除不足，常使夹杂物密集的沉积锥进入锻件，而引起层状断口。

6)铸造

铸造是一种由液态直接凝固成型的工艺过程，从造型，制芯，合箱，浇注，落砂到清理，每个环节都严格控制，才能保证铸件质量。芯砂透气性不好，涂料中的石英粉含杂质过多，砂型与泥芯烘烤不干，合箱后铸型放置时间过长，不能及时浇注，铸型排气结构不恰当，砂型与泥芯中的气体不能及时排出，均易形成气孔；型砂应有较好的退让性，以防止因严重阻碍铸件收缩而造成热裂；浇注温度及速度应严格控制，浇注要平稳，不要断流，以免卷入空气而使铸件出现皮下气孔；应正确控制打箱时间，合金钢铸件或形状复杂的铸件尤应注意，过早打箱会使铸件因收缩不均而产生冷裂；铸件结构的合理性，冒口尺寸、数量和位置的确定、冷铁的选用以及浇注系统的正确设计，则是保证铸件质量的先决条件；应力求实现顺序凝固，以避免缩孔和缩松。

大型球铁铸件，由于壁厚增加，冷速减慢，当浇注温度过高，残余稀土元素量过高而残余镁量过低时，初生的球状石墨从高温铁水中析出、上浮，大量聚集在铸件的上部，会形成石墨飘浮缺陷，使材料的力学性能急剧恶化，因此，对于厚壁大型球铁铸件，除应严格控制

碳、硅含量外，还应严格控制稀土元素加入量，并加强孕育处理，对个别厚截面部位应设置冷铁。大铸件浇注过程长，要考虑球化衰退问题，处理后铁水中的残留镁量和稀土元素量逐渐减少到不足以保证石墨球化时，会出现团状石墨和厚片状石墨；熔炼时采用的生铁和含硫量过高，铁水脱硫不良或发生氧化，使残留的球化剂量减少，容易产生球化不良缺陷。

7) 锻后热处理

锻后多采用正火和回火处理。细化晶粒，改善组织保证切削性能和扩氢以防白点是锻后热处理的目的。重结晶是实现这种目的的先决条件，而只有当组织在冷却时充分转变，才有可能在加热时发生重结晶，所以过冷温度的控制和保温时间的选择是很重要的环节。温度高，时间短，冷却时转变不充分，就会影响重结晶的效果，或是出现混晶，或是出现心部粗晶；而温度过低，又会引起过高的应力，增加白点的危险性。对于高合金钢往往要经过多次过冷，重结晶处理，才可能使晶粒充分细化。相变区的加热速度要尽可能的快，对于高合金钢低的加热速度会引起晶粒遗传。扩氢和回火过程同时进行，扩氢温度一般控制在 A_{c1} 以下 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，扩氢时间是重要参数，时间的确定要考虑钢中氢的含量、工件截面尺寸和钢种，而严重的偏析、晶粒细化不充分都会增大钢的白点敏感性，对于高合金钢，回火前的过冷温度过高、转变不充分也会影响扩氢效果。

8) 性能热处理

铸锻件通过性能热处理调整组织，以满足规定的性能要求，合金钢多采用淬火与回火工艺。为获得良好的强韧性，总是希望淬火时激冷、深冷，而深冷会产生很大的热应力和组织应力，控制不当可能会引起淬火开裂；通常淬火介质、冷却时间和终冷温度要根据钢种、截面尺寸、性能要求和冶金质量确定，冷却时间短，终冷温度高，淬裂危险性减小，但力学性能可能难以保证；冷却时间长，终冷温度低，可以得到良好的强韧性，但淬裂的危险性增大。性能热处理的质量还表现在残余应力的水平，因此，回火温度、时间、冷却速度和出炉时间都是不可忽视的因素。

1.1.2 大型铸锻件缺陷产生的特点

大型铸锻件由于截面尺寸大，所以，在相同的加热冷却条件下和小件相比，温度的变化缓慢，而且内外温度和温度变化的差别较大，此外，塑性变形时，内外金属流动程度的差别也较大，这种特点导致一些过程在大型铸锻件中得到充分发展，而形成以下各种形式的缺陷。

1) 严重的偏析

钢液缓慢凝固使选分结晶过程充分发展，碳、硫、磷等元素富集，即形成各种形式的偏析；结晶前沿析出的气体，在上浮过程中使富集杂质的钢液沿气泡上浮的轨迹形成须状的〔八〕形偏析；钢锭在凝固过程中，顶部先结晶的晶体由于比容减少而下沉，在钢锭底部形成负偏析区，最后凝固部分为碳、硫、磷等杂质元素富集，在钢锭顶部形成正偏析区。

2) 严重的疏(缩)松

缓慢凝固使粘稠的钢液不能补充凝固时的体积收缩，而在最后凝固区产生严重的疏松。

3) 密集的夹杂物

缓慢凝固过程使夹杂物有机会聚集，形成密集的夹杂物，而凝固时顶部先结晶的晶体下沉，将钢中的氧化物及硅酸盐带到底部，使钢锭底部的负偏析区成为这类夹杂物的堆积区。

4) 发达的柱状晶

钢液的缓慢凝固使柱状晶得到充分发展，柱状晶尺寸可达 $\Phi 10 \times 100\text{mm}$ 。一些元素含量尽管不高，但根据选择分布的特点，会随着溶解度的降低而向晶界析出，粗大的晶粒减少晶界的表面面积，增加析出相的密集程度，降低晶界的结合力，严重时会使铸件或钢锭在冷却时开裂，或使钢锭在锻造时开裂。

5)晶粒的遗传倾向

奥氏体稳定的高合金钢，在缓慢冷却时往往只发生贝氏体和马氏体的转变，和母相保持一定的位向关系，这种组织在缓慢升温条件下，沿惯析面析出的碳化物有充分时间转变成较为稳定的合金碳化物，延缓碳化物的团聚过程，而弥散分布的碳化物质点阻碍铁素体的再结晶，保持原始结晶位向，在奥氏体化后恢复原来晶粒的形态，导致晶粒遗传，因之，高合金钢大件有严重的晶粒遗传倾向。遗传倾向和成分有密切关系，成分偏析易造成不同区域间遗传倾向的差别，所以，大件易于出现混晶现象(见图 1.1.1, 图 1.1.2a,b)。

6)敏感的白点倾向

氢和应力是形成白点的条件，在扩氢过程，截面尺寸大，内部氢的逸出缓慢，在冷却过程中，因截面尺寸大，增加内外温差，产生较大应力，所以大件具有敏感的白点倾向；另一方面，随着截面尺寸增大，易于出现严重偏析和聚集分布的夹杂物，成分偏析使奥氏体冷却时的转变发生先后的差别，碳和合金元素富集的偏析区，转变迟于周围，由于氢在奥氏体中有较高的溶解度，先转变区排出的氢即聚集在未转变的偏析区，造成氢的局部富集，氢也会向夹杂物区富集，夹杂物在钢中如同缺口一样，引起应力集中，在夹杂物附近形成应力峰值，这些都使大件产生白点的倾向增大。

7)加热冷却的开裂倾向

在相同的加热、冷却条件下，内外温差随截面尺寸增大而增大，由于比容随温度的变化，而造成的内外膨胀量(或收缩量)的差别，可引起很大的热应力；奥氏体冷却时，相变伴随着比容的变化，而内外冷速的差别、转变不同时进行，转变产物不同，内外膨胀量不同，故会引起很大的组织应力；大件材料内部缺陷总是难免的，因此，如果材料抵抗裂纹的扩展能力很小，加热速度稍快，产生的热应力就足以导致开裂，而对于中碳高合金钢，虽然具有较高的抵抗裂纹扩展能力，淬火的激烈冷却如不加以控制，组织应力和热应力相迭加，也可引起开裂。

8)回火脆性

大件在淬火和回火处理时，为降低残余应力，对回火冷速须加以控制。如果回火后缓慢冷却，磷、锡、锑、砷等微量杂质元素会在晶界发生富集，而产生回火脆性，大件的严重偏析，会使富集磷及杂质元素的正偏析区产生较为严重的回火脆性。

9)组织与性能的不均匀性

严重的偏析造成成分的宏观与微观的不均匀性。热处理冷却时，因工件沿截面的冷速不同而造成不同区域奥氏体转变过程的差别，将导致大型铸锻件组织与性能的不均匀性。铸件是由于结晶状态、夹杂物聚集程度以及致密程度沿截面而变化，锻件则由于沿截面的金属塑性变形程度不同，而造成夹杂物变形程度和压实程度的差别，则是导致大型铸锻件组织与性能不均匀性的另一重要原因。

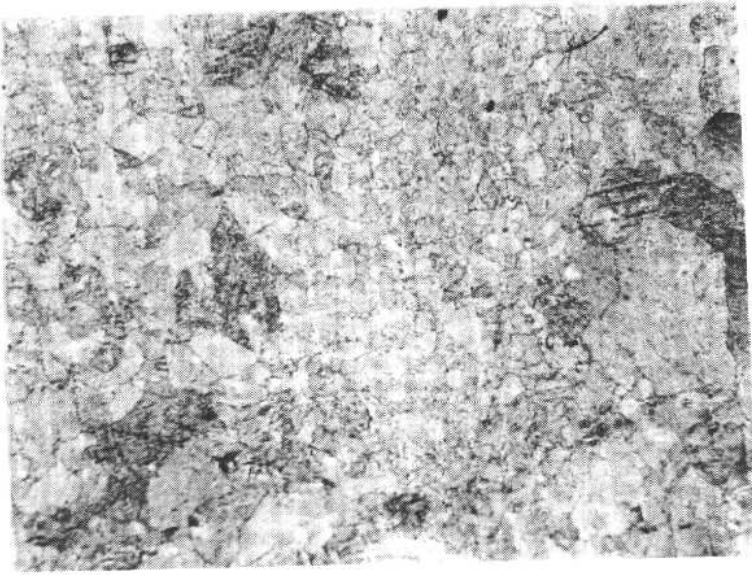


图 1.1.1 枝晶偏析引起的混晶
LM 4%硝酸酒精侵蚀 100×

图 1.1.2a) 遗传的粗大晶粒因终锻温度过高, 20MnMoNi5 钢, 经常规锻后热处理工艺处理后, 产生晶粒遗传
LM 4%硝酸酒精侵蚀 100×

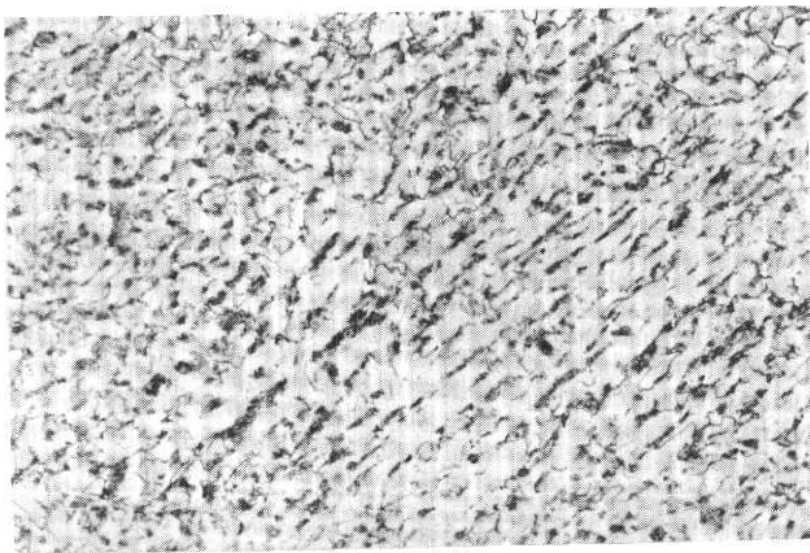
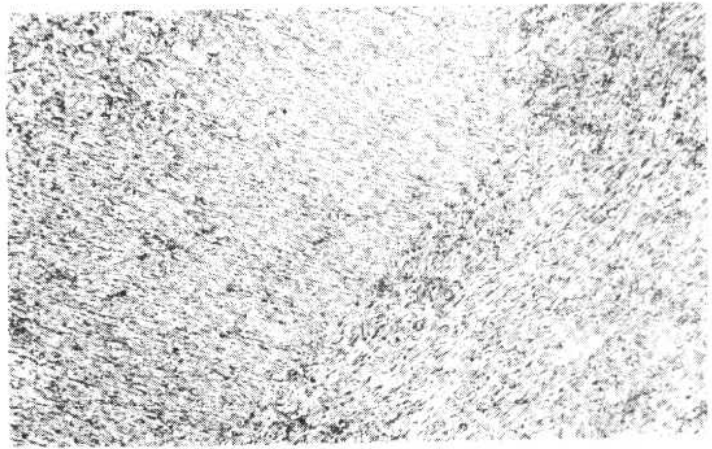


图 1.1.2b) 遗传的粗大晶粒具有明显的取向
LM 4%硝酸酒精侵蚀 500×

1.2 缺陷的检出

大型铸锻件的生产从冶炼、浇注、锻造、到热处理这一系列热加工过程中,可能出现各种缺陷,为确保大型铸锻件的质量,应根据不同用途和要求,采用不同的检查方法,及时检出所不允许的缺陷。普遍采用的有以下一些方法。

1)化学分析

通常化学分析的内容为碳、锰、硅、硫、磷及合金元素的含量。锻件从相当冒口端取样。重要部件为了了解偏析程度,从两端取样;重要件往往还要分析气体、夹杂物及微量杂质元素的含量。氢含量的分析,在大气浇注时,一般在浇注时取样。真空浇注时,在浇注结束时从锭中取样,分析结果可作为确定工艺参数的依据。

2)力学性能试验

拉伸、冲击和弯曲是常用的试验项目。从性能数据可以发现材质存在的问题。钢中气泡、疏松、裂纹、夹杂物、晶粒度及回火脆性往往可在试样断口上得到反映。

3)低倍检验

硫印、酸洗、断口是常用的检查项目。硫印可以显示硫在截面上的分布情况;酸洗可以显示成分偏析和疏松、缩孔、皮下气泡、夹杂物、翻皮、白点等各种宏观缺陷。

断口检查是一种简便而实用的方法,可以发现硫印、酸洗所不能显露的缺陷;锻后热处理状态或冷态压断得到的断口往往是脆性断口,断口呈结晶状(图 1.2.1a),可以显露粗晶(图 1.2.1b)、萁状断口(图 1.2.1c)及石状断口(图 1.2.1d)等缺陷;调质状态或在热态(150~250℃)压断得到的多为韧性断口,呈纤维状(图 1.2.2a),由于应力集中作用,可使各种孔隙性缺陷和夹杂物充分暴露,随着夹杂物状态和分布的不同,断口表面呈现不同的宏观形貌,如木纹状、叠层状、撕痕状、贝壳状、灰片状、杆状等等(图 1.2.2b、c、d、e、f、g)。

通过这几种方法检查,可以对钢中缺陷的存在情况有一个比较全面的了解。酸洗、硫印可在加工表面大面积上进行,轴类件的酸洗、硫印常在横向切片上进行,检查白点的切片应在距端面 $1/2R$ (半径)以内切取。

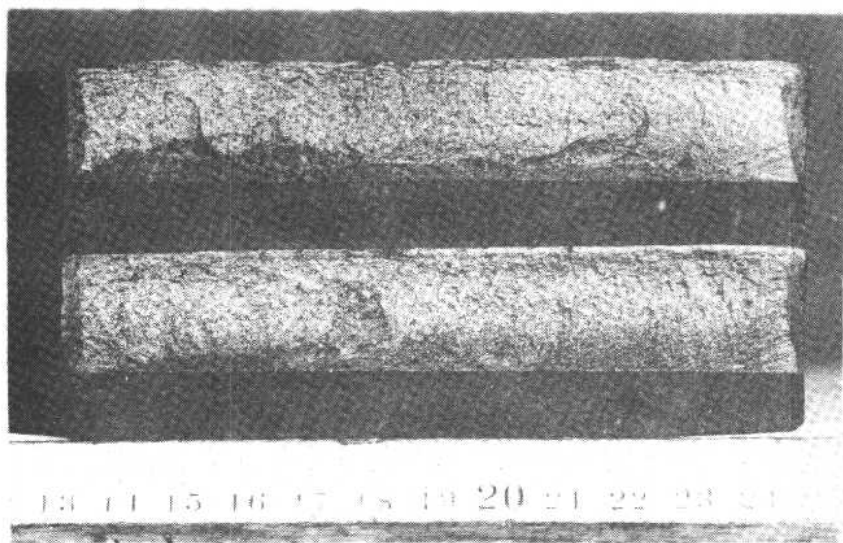
4)金相检验

用光学显微镜(LM)在放大 50~2000 倍下观察抛光的金属表面,试样在未经侵蚀条件下进行夹杂物检查,经侵蚀后进行组织及晶粒度检查,这种方法广泛用于检查微观缺陷,也常用于研究宏观缺陷的微观特征。

由于大件的成分偏析,夹杂物聚集和组织的不均匀性,上述的化学分析、性能试验和金相检验所取得的试样只能代表局部区域,试验结果也只能反映取样位置的质量情况。为了了解大件整体的质量情况,则须从具有代表性的各个部位选取试样,取样数量愈多,范围愈广,了解的质量情况愈全面。

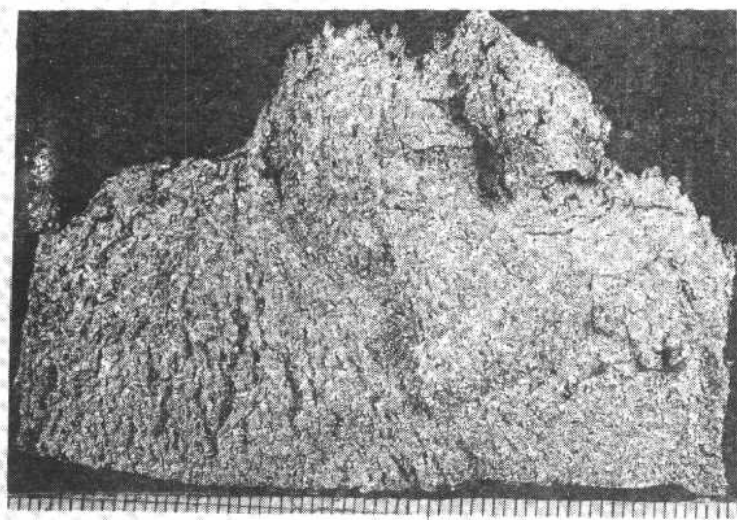
5)无损检测

通常应用的有磁粉、荧光、着色、射线、超声波等方法。正确选择探伤的方法,对大型铸锻件表面及内部的缺陷进行全面细致的检查,可以准确判定存在缺陷的大小、数量及分布,在大型铸锻件的质量检查中,现在已成为一种极为重要的方法。



a) 结晶状断口的宏观形貌

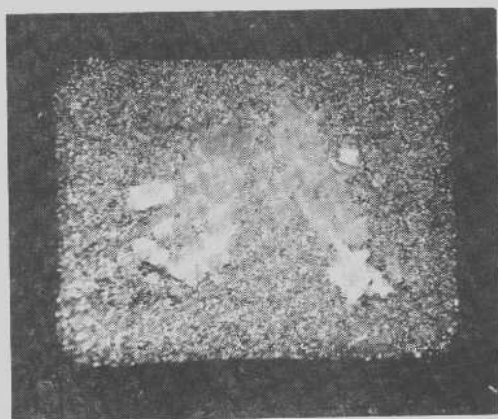
材质 PCrNiMo 正火



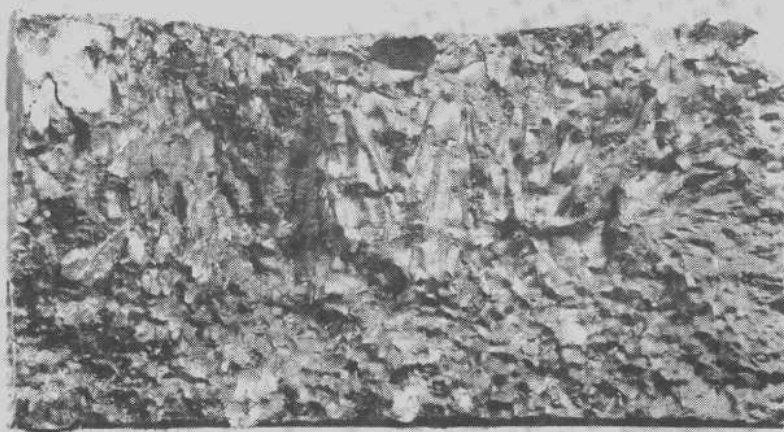
b) 粗晶状断口的宏观形貌

材质 40Cr 正火

图 1.2.1 脆性断口的宏观形貌(之一)



c) 茶状断口的宏观形貌
材质 40CrNi 淬火(过热)



d) 石状断口的宏观形貌
材质 ZG35 退火

图 1.2.1 脆性断口的宏观形貌(之