

大型锻件 制造缺陷与对策



MANUFACTURING DEFECTS AND COUNTERMEASURES OF LARGE FORGINGS

王宝忠 著

大型锻件制造缺陷与对策

王宝忠 著



机械工业出版社

本书详细介绍了大型锻件在制造过程中出现的各种形式的缺陷与处理对策,共100例。书中运用大量详实的试验数据客观真实地展示了各类大型锻件制造中的缺陷形式,通过宏观与微观的分析方法揭示了缺陷产生的根本原因,并以制造出形神兼备(铸件的形状、锻件的质量)的大型锻件为目标,以改变制造方式为切入点,给出了预防和根治大型锻件缺陷的方法与对策。

本书内容对改进和提高大型锻件质量具有一定的参考价值,对未来新技术研发具有指导意义。

本书可供从事锻压工艺与锻件制造的生产技术人员、科研人员使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

大型锻件制造缺陷与对策/王宝忠著. —北京:机械工业出版社, 2019. 1

ISBN 978-7-111-61635-1

I. ①大… II. ①王… III. ①大型锻件-缺陷-研究 IV. ①TG316. 1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第299707号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:孔劲 责任编辑:孔劲 张亚捷

责任校对:刘岚 封面设计:鞠杨

责任印制:李昂

北京瑞禾彩色印刷有限公司印刷

2019年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·19.5印张·2插页·476千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61635-1

定价:129.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

序 一

作为大型锻件制造的科技工作者，很高兴应著者之邀为《大型锻件制造缺陷与对策》一书作序。

伴随着人类文明的进步，锻造行业虽一脉相承却也是日新月异，为社会发展提供了基础与保障。大型锻件制造业不仅关系到国计民生与国家安全，更是国力的重要组成部分，因而它已成为关乎国民经济命脉的不可或缺的战略行业，其发展水平是衡量一个国家综合实力的重要标志。大型锻件是电力、冶金、石化、造船、矿山、航空航天、军工等装备的基础部件，其经济带动性强，辐射作用大，是装备制造业产业链上不可缺少的重要一环。

在大型锻件的长期发展历程中，一直沿用传统的制造方式——冶炼、铸锭、开坯、自由锻、热处理。冗长的流程、繁杂的工序以及诸多不可预见的影响因素，不仅导致了较多的固有冶金缺陷，而且锻造与热处理等缺陷也时有发生。特别是在新产品与新工艺的研发制造过程中，各种常见与罕见的缺陷更是层出不穷。本书对大型锻件制造过程中的代表性缺陷进行了列举，对产生原因进行了深入的剖析，并提出了预防措施。通过改进前后的数据对比，给出了减少大型锻件缺陷的方法。

为了从根本上治理大型锻件制造过程中的缺陷，著者在试验研究的基础上提出了增材制坯和近净成形的理念。通过将新思路制造过程的数值模拟结果与传统制造方式的结果进行对比，给出了提质降耗的初步结论，描绘了大型锻件的发展方向。

由于现今在线监测与检测技术的局限性，使得大型锻件的制造过程还难以完全实现自动化、标准化与程序化，因此其点滴进步都是由一个个失败催生出来的，若不能得到亲历者的记录与传承，将是令人扼腕痛惜的。本书就是很好的记录与传承，书中用大量详实的数据为大型锻件制造行业提供了宝贵的缺陷案例，给出了预防措施和治理方法。

衷心希望此书能为从事大型锻件研究、制造工作者提供借鉴，为从事热加工学习者提供參考。

中国工程院院士

序 二

锻造是一个古老而又充满活力，艰苦却又作用巨大的行业，虽然时常被装备制造业边缘化，但其对工业发展和社会进步所作出的贡献是任何行业都无法替代的。

作为锻造产品之一的大型锻件有着广泛的用途，主要用于电力、冶金、石化、船舶、机车车辆、模具、航空航天、兵器、重型机械和汽车、矿山机械、通用机械等行业和机械。大型锻件制造业是关系到国计民生的战略性行业，也是国家能力的重要组成部分，其发展水平体现着一个国家的综合实力。

大型锻件的研究发展必须走“材料-加热-锻造-第一热处理-机加工-第二热处理”的一体化综合路线，其影响因素之多，范围之广，以及不可预期性之强是非从业人员无法想象的，为此在大型锻件的研发与创新过程中，曾付出了惨痛的代价。成功固然令人敬佩，但失败更值得研究，因为成功需要掌控所有因素，缺一不可，而失败的因素不用多，沾上一个就前功尽弃。但失败却是创新的引擎，回顾曾经的失败是获得成功的关键。

作为曾经分管中国一重热加工技术几十年的副总工程师，著者所掌握的热加工知识与经验来自于国家、行业与公司的培养，几十年亲历亲为的大锻件研发创新之路，不仅丰盈和沉淀了著者的理论基础，更激发了其无数的创新灵感，特别是一个个缺陷的产生，它既是成功道路上突兀的荆棘，也是走向成功的必由之路。为了回馈社会，助力行业振兴，使大型锻件在实现“形神兼备”之目标的研发过程中有所借鉴，以问题为导向，借助大量珍贵的图表将各类缺陷的形成原因及避免措施等撰写成册，与大家分享。

《大型锻件制造缺陷与对策》一书所介绍的各种缺陷的解决办法与预防措施均是具有诀窍且可以传承的，是企业技术总结中的精髓，在迄今为止公开发表的诸多文献书籍与研究报告中颇为鲜见。而书中众多的图表与数据则是几代科技工作者和工程技术人员智慧与心血的结晶，特别是在书的最后，著者博观而约取，厚积而薄发，准确地为大型锻件的转型升级指明了发展方向。此书在技术传承与提升以及人才培养方面弥足珍贵。

中国锻压协会秘书长



前言

作为重大装备制造业的基础，大型锻件制造业是一个非常重要的行业。它既是发展国民经济的关键所在，又是国防建设所必需，不仅关系到国家产业安全，同时也是国家能力的重要组成部分，其发展水平代表了一个国家综合实力的强弱。

随着制造技术的发展与装备的更新，大型锻件制造方法正在从自由锻造逐步向仿形锻造乃至近净成形锻造发展。由于大型锻件的这一进步是在近乎“一穷二白”的基础上所进行的探索和攻关，故曾付出了惨痛的代价。然而因为没有进行系统且深入的总结，这些代价不仅没有得到很好的汲取，甚至有的还在重复发生。著者所掌握的热加工知识来自于大型锻件制造行业的培养，既有在中国一重集团有限公司几十年的积累，也有多次在同行企业连续十几个小时的现场亲历。为了回馈社会、助力行业振兴，使大型锻件在实现转型升级之目标的研发过程中有所凭借，并少走弯路，著者将几十年之所见所闻、所知所感与所思所悟述诸笔端，以问题为导向，借助丰富的大数据对各类事件进行一一评述与深刻剖析，以便温故而知新。

始于钢锭终于性能热处理的大型锻件的制造贯穿于热加工全过程，其中冶炼及铸锭被称为“优生”，而锻造与热处理被视为后天的培养。在制造过程中产生的外在和内在的质量不合乎要求的各种毛病称之为锻件缺陷（forging defects），其主要表现有冶炼与铸锭不当引起的成分偏析、夹杂、有害相；锻造不当引起的折叠、流线不连续、裂纹、肥头大耳；热处理不当引起的变形、裂纹、性能不满足要求等。

本书第1章对大型锻件的应用领域、分类以及常见缺陷进行了概述；第2章介绍了偏析、夹杂、有害相等冶金缺陷；第3章详细论述了锻造缺陷的形式、产生原因及预防措施；第4章对变形、裂纹、性能不满足要求等热处理缺陷的形式、成因及预防措施进行了阐述；第5章针对以预防和根治大型锻件缺陷为目标，提出了增材制坯及近净成形锻造的发展方向。

在本书的撰写过程中，得到了中国一重集团有限公司、河北宏润核装备科技股份有限公司、中国科学院金属研究所等单位的大力支持，刘颖对本书进行了校对；本书的出版得到了上海电机学院上海大件热制造工程技术研究中心的鼎力支持，在此一并表示感谢！

著 者

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 概述..... 1

1.1 大型锻件的应用领域 1

1.1.1 冶炼设备 1

1.1.2 轧制设备 2

1.1.3 锻压设备 2

1.1.4 矿山设备 3

1.1.5 电力设备 4

1.1.6 石油、化工设备 6

1.1.7 航空、航天设备 7

1.1.8 专项及科研装备 8

1.2 大型锻件的分类 8

1.3 大型锻件的常见缺陷 8

第 2 章 大型锻件冶金缺陷与对策 12

2.1 偏析 12

2.1.1 EPR 上封头 12

2.1.2 低压转子 14

2.1.3 高中压联合转子 16

2.1.4 5m 支承辊 17

2.2 夹杂 20

2.2.1 支承辊 22

2.2.2 转子 29

2.2.3 接管段 52

2.2.4 接管 58

2.2.5 真空吸注 61

2.3 有害相 62

2.3.1 带状组织 62

2.3.2 网状碳化物 63

2.3.3 高温铁素体 64

2.3.4 Y 相 65

2.4 钢锭表面缺陷 66

2.4.1 龟裂 66

2.4.2 环裂 67

2.4.3 黏模 68

2.5 酸溶铝 69

2.6 异金属 69

2.7 凝固不充分 73

2.7.1 笔筒形钢锭 73

2.7.2 提前脱帽 74

第 3 章 大型锻件锻造缺陷与对策 75

3.1 裂纹 75

3.1.1 转子开裂 75

3.1.2 支承辊开裂 81

3.1.3 水室封头开裂 91

3.1.4 主管道裂纹 93

3.1.5 不锈钢泵壳裂纹 95

3.2 混晶 96

3.2.1 低压转子 96

3.2.2 齿轮 97

3.2.3 主管道 98

3.2.4 CENTER 整体封头 99

3.3 折叠与折伤 103

3.3.1 主管道折叠 103

3.3.2 封头锻件折伤 104

3.3.3 筒体锻件折伤 106

3.3.4 JTS (中心压实) 法折伤 107

3.3.5 Ni 基合金钢锭镦粗折伤 108

3.4 氧化皮 109

3.4.1 加氢反应器筒体 109

3.4.2 锥形筒体 110

3.4.3 接管段 110

3.4.4 管板 111

3.4.5 水室封头 113

3.4.6 稳压器下封头 114

3.5 “肥头大耳” 115

3.5.1 主管道 115

3.5.2 蒸汽发生器水室封头 116

3.5.3 管板 118

3.5.4 锥形筒体	121	4.2.2 转子	173
3.5.5 加氢反应器过渡段	121	4.3 淬火裂纹	181
3.5.6 支承辊	123	4.3.1 水室封头	181
3.5.7 水轮机大轴	124	4.3.2 管板	202
3.5.8 风机轴	125	4.4 冷却速度不足	204
3.5.9 曲拐	126	4.5 淬火装置不完善	206
3.6 附具设计及使用不当	132	4.6 取样位置不匹配	207
3.6.1 锤头设计不当	132	4.7 支承辊开裂	223
3.6.2 下模设计不当	132	4.7.1 置裂	223
3.6.3 套筒使用不当	134	4.7.2 服役过程中断裂	224
3.6.4 模具使用不当	136	4.8 材料潜力发挥不足	236
3.7 拉应力	138	4.8.1 接管段	236
3.7.1 不锈钢转子轴端心部裂纹	138	4.8.2 主法兰与机壳	238
3.7.2 支承辊钳口缩孔	139	4.8.3 筒体	242
3.8 其他	140	第5章 大型锻件的发展方向	247
3.8.1 抱芯棒	140	5.1 目标	247
3.8.2 白点	141	5.1.1 形神兼备	247
3.8.3 立料夹痕	142	5.1.2 极端制造	249
3.8.4 缴粗形状偏差	143	5.1.3 标准自主化	252
3.8.5 钳口缺陷	144	5.2 均质化制坯	255
3.8.6 锻件不同心	145	5.2.1 超大型钢锭制坯	256
3.8.7 偏载锻造	147	5.2.2 增材制坯	261
3.8.8 “歪瓜裂枣”	148	5.3 近净成形锻造	267
3.8.9 管嘴翻边定位偏差	149	5.3.1 锻轧成形	268
3.8.10 轴身拔长弯曲	150	5.3.2 锻挤成形	269
3.8.11 钢锭压冒口	151	5.3.3 锻弯成形	289
3.8.12 “糊状区”锻造	154	5.3.4 热弯成形	291
3.8.13 焊接附件引发的裂纹	154	5.4 铸件改锻件	292
第4章 大型锻件热处理缺陷与		5.4.1 主泵泵壳	292
对策	156	5.4.2 水轮机零件	292
4.1 预备热处理不当	156	5.4.3 汽轮机零件	296
4.1.1 接管段	156	5.4.4 其他零件	296
4.1.2 低压转子	158	5.5 装备保障	297
4.1.3 发电机转子	159	5.5.1 液压机	298
4.1.4 厚截面筒体	160	5.5.2 配套设备	298
4.2 性能热处理尺寸变化	169	案例索引	300
4.2.1 环体与封头	169	参考文献	303

第1章

概述

大型锻件是金属被施加压力，通过塑性变形塑造成要求的形状的物件。大型锻件制造是重大装备制造关键的一环，其质量直接影响到重大装备的整体水平和运行可靠性，是发展电力、船舶、冶金、石化、重型机械和国防等工业的基础，也是发展先进装备制造业的前提。

1.1 大型锻件的应用领域

1.1.1 冶炼设备

涉及大型锻件的冶炼设备有大型转炉（见图 1-1）、板坯连铸机（见图 1-2）等大型设备。代表性的大型锻件有大型转炉的耳轴（见图 1-3）和板坯连铸机中起弯曲及矫直作用的夹送辊（见图 1-4）等零件。



图 1-1 大型转炉



图 1-2 板坯连铸机



图 1-3 大型转炉的耳轴

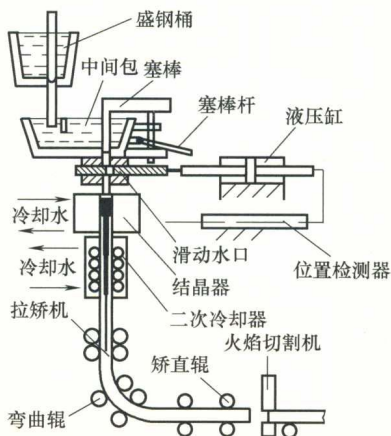


图 1-4 板坯连铸机中的夹送辊

1.1.2 轧制设备

涉及大型锻件的轧制设备有热连轧机（见图 1-5）等大型设备。代表性的大型锻件有轧辊和传动零件。其中轧辊又分为与钢板（钢坯）直接接触的工作辊（见图 1-6）和对工作辊起支承作用的支承辊（见图 1-7）。传动零件包括齿轮（见图 1-8）、齿轮轴（见图 1-9）和接轴（见图 1-10）等。



图 1-5 热连轧机



图 1-6 工作辊



图 1-7 支承辊

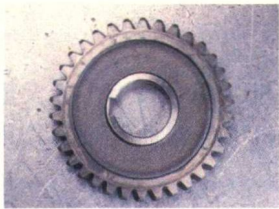


图 1-8 齿轮



图 1-9 齿轮轴



图 1-10 接轴

1.1.3 锻压设备

涉及大型锻件的锻压设备主要是液压机，分为水压机（见图 1-11）、油压机（见图 1-12）、模锻压力机（见图 1-13）、机械压力机（见图 1-14）和模锻锤（见图 1-15）等设备。



图 1-11 150MN 水压机



图 1-12 185MN 油压机



图 1-13 800MN 模锻压力机



图 1-14 机械压力机



图 1-15 模锻锤



图 1-16 柱塞

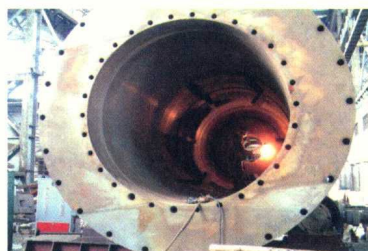


图 1-17 缸体

具有代表性的大型锻件有柱塞（见图 1-16）、缸体（见图 1-17）、锤头、锤杆、模块、传动零件（齿轮、齿轮轴）等。

1.1.4 矿山设备

涉及大型锻件的矿山设备是大型矿用挖掘机（见图 1-18）、破碎机等设备。

矿山设备的代表性大型锻件有挖掘机的卷筒（见图 1-19）、破碎机的齿圈（见图 1-20）等。



图 1-18 大型矿用挖掘机



图 1-19 卷筒

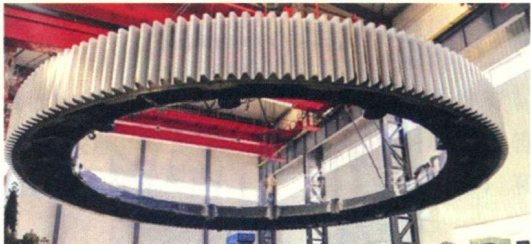


图 1-20 齿圈

1.1.5 电力设备

涉及大型锻件的电力设备主要是核能发电设备、火力发电设备、水力发电设备和风力发电设备。

1. 核能发电设备

核能发电设备分为核岛设备和常规岛设备。核岛中的代表性设备是反应堆压力容器（见图 1-21）和蒸汽发生器（见图 1-22）。



图 1-21 CAP1400 反应堆压力容器



图 1-22 蒸汽发生器

核能发电设备的代表性大型锻件有反应堆压力容器顶盖（见图 1-23）、接管段（见图 1-24）以及蒸汽发生器管板（见图 1-25）、水室封头（见图 1-26）等。



图 1-23 CAP1400 反应堆压力容器顶盖



图 1-24 CAP1400 反应堆压力容器接管段

2. 火力发电设备

火力发电设备主要由锅炉、汽轮机和汽轮发电机组成（见图 1-27），其中汽轮机（见图 1-28）和汽轮发电机（见图 1-29）与核电的常规岛类似。



图 1-25 CAP1400 蒸汽发生器管板



图 1-26 CAP1400 蒸汽发生器水室封头



图 1-27 火力发电设备

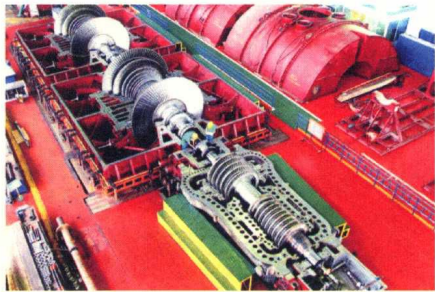


图 1-28 汽轮机

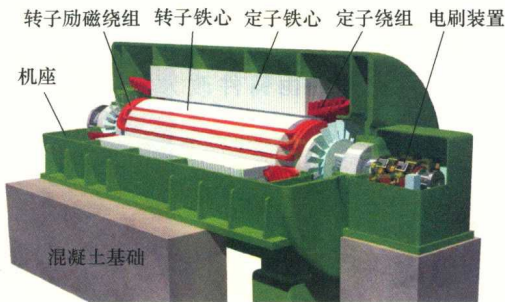


图 1-29 汽轮发电机

发电设备的代表性大型锻件有高中压转子（见图 1-30）、低压转子（见图 1-31）、发电机转子（见图 1-32）、发电机护环（见图 1-33）等。



图 1-30 高中压转子



图 1-31 低压转子

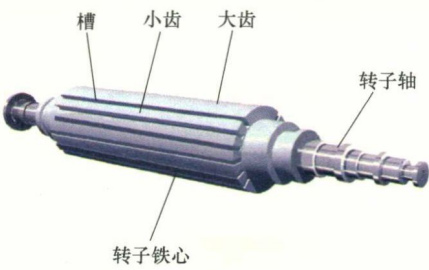


图 1-32 发电机转子



图 1-33 发电机护环

3. 水力发电设备（见图 1-34）

水力发电厂的一些最基本的设备是水轮机和发电机。代表性锻件有水轮机轴（见图 1-35）、镜板（见图 1-36）等。



图 1-34 水力发电设备

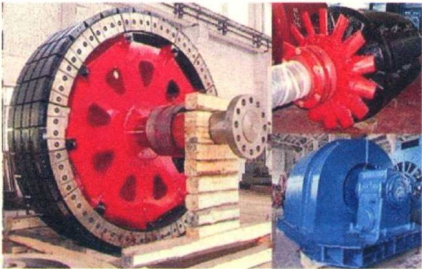


图 1-35 水轮机轴

目前的大型水轮机转轮（见图 1-37）是由上冠、下环和叶片组焊而成。为了解决马氏体不锈钢铸件“汽蚀”问题，叶片已开始由铸件改为锻件；待具备条件后，上冠和下环也将改为锻件。



图 1-36 镜板



图 1-37 水轮机转轮

4. 风力发电设备

风力发电设备如图 1-38 所示，其代表性大型锻件为风机轴（见图 1-39）等。

1.1.6 石油、化工设备

涉及大型锻件的石油、化工设备主要是加氢反应器（见图 1-40），其中具有代表性的大型锻件有加氢筒体（见图 1-41）、加氢过渡段（见图 1-42）、加氢封头（见图 1-43）和加氢管板（见图 1-44）等。



图 1-38 风力发电设备

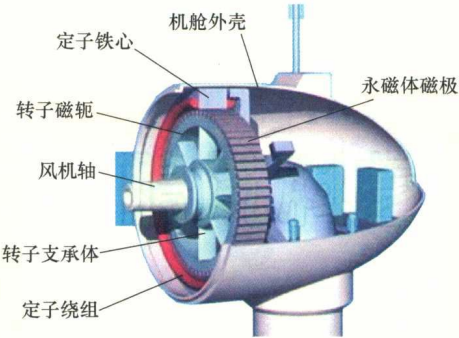


图 1-39 风机轴等零件



图 1-40 加氢反应器



图 1-41 加氢筒体



图 1-42 加氢过渡段



图 1-43 加氢封头



图 1-44 加氢管板

1.1.7 航空、航天设备

航空、航天设备的代表性大型锻件有涡轮盘（见图 1-45）等。

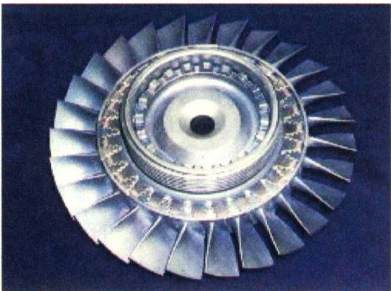


图 1-45 涡轮盘

1.1.8 专项及科研装备

专项及科研装备有舰载火炮（见图 1-46）等，其中的代表性大型锻件有压力筒、身管（见图 1-47）等。



图 1-46 舰载火炮

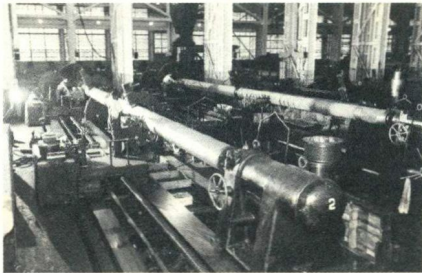


图 1-47 身管

1.2 大型锻件的分类

大型锻件分为实心件和空心件两大类。

实心件又分为轴类、饼类和封头类，其中，轴类锻件又分为光轴（无台阶）、台阶轴（工作辊、支承辊）和带法兰轴（转子、水轮机轴、中间轴、螺旋桨轴），饼类锻件包括管板、法兰、涡轮盘等，封头类锻件包括带接管和不带接管两种。

空心锻件分为筒体类、环类、圈类。空心筒体类锻件分为等截面和变截面两种。

1.3 大型锻件的常见缺陷

大型锻件的质量主要表现在纯净性、均匀性和致密性三方面^[1]。锻件缺陷（forging defects）是指在锻件制造过程中产生的外在和内在的影响锻件质量的各种缺陷，包括锻件热加工缺陷，主要有冶炼与铸锭不当引起的成分偏析、夹杂、有害相等；因锻造不当引起的折叠、流线不连续、裂纹、肥头大耳等缺陷；因热处理不当引起的变形、裂纹、性能不满足要求等缺陷。

大型锻件的常见缺陷、特征、形成原因、危害及对策见表 1-1。

表 1-1 大型锻件的常见缺陷、特征、形成原因、危害及对策

常见缺陷			特征	形成原因	危害	对策
分类	细分类型					
偏析	宏观偏析	正偏析	钢锭中各元素成分或杂质含量高于其平均水平	均匀成分的液态合金凝固时,高熔点的组分先行结晶,加之气体上浮,造成合金组元的浓度和杂质分布不均匀	造成组织与性能的不均匀	1)采用炉外精炼、真空脱氧及底部吹氩等工艺,降低钢中硫、磷等偏析元素和气体含量 2)采用多炉合浇、冒口补浇、冒口保温等措施,以增强冒口补缩能力 3)严格控制注温与注速,选择高径比合适的锭型
		负偏析	钢锭中各元素成分或杂质含量低于其平均水平			

(续)

常见缺陷			特征	形成原因	危害	对策
分类	细分类型					
偏析	微观偏析	晶内偏析	晶粒内部成分不均匀	小区域范围内的扩散可能会导致微观偏析。凝固初期浮选或沉淀过程均可能导致物理位移	造成组织与性能的不均匀	1) 高温扩散 2) 合理的锻压变形 3) 均匀化热处理
		晶界偏析	晶界与晶粒内部存在成分差异			
夹杂	外来夹杂物		混入金属中的炉衬耐火材料或炉渣颗粒, 包括钢带入的, 或与金属液发生化学反应而在成分和结构上已有相当大改变的	1) 冶炼及浇注中, 钢液表面所浮的炉渣, 炼钢炉、出钢槽等带入钢液中的炉渣、熔渣或剥落的耐火材料 2) 钢液被大气氧化所形成的氧化物	破坏钢基体的连续性, 使钢的组织 and 性能的不均匀性增加, 质量下降	1) 提高钢液的纯净性 2) 提高耐火材料的质量 3) 在出钢及浇注过程中, 避免钢液的二次氧化
	内生夹杂物		在熔炼、凝固过程中, 熔融金属中含有的各化学元素的化学反应产物来不及排除, 仍保留在固态金属中	1) 脱氧产物 2) 出钢和浇注过程中因钢液温度下降其内部成分平衡移动时生成的产物 3) 钢液凝固时生成的产物 4) 钢液在凝固后的冷却过程中由于发生相变使溶解度变化而析出的化合物		
有害相	带状组织		材料显微组织的两相或相组成物呈方向性的交替分布	1) 热轧(再结晶温度以上)时钢内存在的偏析组织或含量较高的非金属夹杂物沿压力加工方向呈带状分布, 再结晶时成为铁素体(F)非均匀形核的核心, 形成带状铁素体, 形成的珠光体(P)也呈带状分布 2) 热轧时停锻温度在两相区, 铁素体沿流动方向形成带状结晶, 使奥氏体(A)呈带状分布, 所以转变成的珠光体也呈带状分布	使钢的组织不均匀, 并影响钢材性能, 形成各向异性, 降低钢的塑性、冲击韧性和断面收缩率, 造成冷弯不合、冲压废品率高、强韧性降低。淬火后易形成混晶组织和非马氏体组织, 使零件淬火变形倾向增大	1) 低碳合金钢中的带状组织是钢锭中粗大枝晶偏析在轧制过程中形成的。可用电渣重熔、增大结晶速度、提高终轧温度、增大锻造比或扩散退火来改善或避免 2) 调质钢为了消除带状组织, 在热处理中经常采用两次正火以满足金相组织的要求