

大锻件热处理

东北重型机械学院
第一重型机器厂 编
第一机械工业部情报所

机械工业出版社

大锻件热处理

东北重型机械学院

第一重型机器厂 编

第一机械工业部情报所

(内部发行)

*

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 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $16 \frac{1}{2}$ ·字数 397 千字

1974年10月北京第一版·1974年10月北京第一次印刷

印数 00,001—15,500·定价 1.35 元

*

统一书号: 15033·(内)604

出版说明

高效优质地生产大锻件是重型机器制造业中的关键问题。国内外的生产实践经验证明，大锻件的生产如果过不了关，重型机器制造业就不能向前发展。由于大锻件尺寸不断增大，性能要求不断提高，与此相适应的生产工艺也不断改进和革新。为了总结和交流这方面的先进经验，促进我国大锻件热处理工艺的革新和发展，由第一重型机器厂与东北重型机械学院对大锻件热处理进行了广泛调查研究，并把收集到的好经验整理编写成这本资料。

内容主要围绕提高大锻件质量问题，根据大锻件的特点，简要地分析了各种冶炼方法可能产生影响质量的冶金特性；不同锻造工艺对质量的影响；以及真空除气技术的应用，这些都是制订正确热处理工艺的重要依据。本资料着重总结了国内外大锻件的各种热处理工艺的生产经验，并分析了国外几起大锻件发生断裂事故的实例。由于我们各方面的水平有限，不当与错误的地方不少，请读者提出批评指正。

第一机械工业部情报所

绪 言

大锻件热处理,在基本理论与工艺方面同一般中、小型零件的热处理是一致的。但是,在实际热处理工艺中又有自己的特点。

一、制订大锻件热处理工艺要考虑钢锭和锻件的冶金特性因素

由于钢液中总有气体和其他杂质存在,以及在凝固过程中形成偏析的结果,使钢锭的组织成分总是不均匀。钢锭越大这种现象越严重,而且在锻造过程中,又往往保证不了完全锻透,这些冶金缺陷就不同程度的残留在锻件中,成为制定随后热处理工艺的重要依据。例如,近来应用了真空脱气技术,基本解决了白点问题,于是才能采用水冷、深冷等剧烈的淬火工艺,有效地提高了大锻件的机械性能。因此,必需了解钢锭和锻件的冶金特性,才能制订出正确的热处理工艺,以及正确地付诸实施。

二、大锻件在热处理中产生较大的瞬时应力和残余应力

大锻件的截面大,加热与冷却时内外温差大,热应力和组织应力也就大,使锻件原有的微裂纹扩大,甚至造成开裂。所以应根据具体情况,正确控制加热与冷却的速度,以保证残余应力最小,防止淬裂现象。

三、相变潜热对加热和冷却过程的明显影响

钢件在加热和冷却过程中发生 $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ 相变时,要放出或吸收大量的相变潜热。相变潜热是12大卡/公斤或15大卡/公斤。因为小零件热传导条件较好,相变潜热的影响小。但是大锻件中心部分由于热传导的限制,不能及时供热或散热,使这部分钢料在相变区间的加热与冷却速度大为减小,造成内外温差大。在冷却过程中,因塑性差就可能造成开裂。加热速度减小,就需要延长锻件在较高温度的停留时间,减弱了重结晶细化晶粒的作用,这也是大锻件晶粒较大的部分原因。

四、回火脆性问题

大锻件从回火温度快冷,也会产生很大的残余应力。例如,直径700毫米的34CrNi3Mo钢锻件从650℃回火温度油冷时,轴向残余应力可达27.9公斤/毫米²。因此,一般大锻件只能采用较低的回火冷却速度,不能单纯为了消除回火脆性采用油冷或水冷工艺。长期以来,采取加入钼合金元素的办法来减小回火脆性,但是这种措施的效果有限。

总之,深入研究大锻件用钢的回火脆性问题,尽量限制回火脆性的发展,以充分发挥钢材的潜力,仍然是一个很重要的任务。

五、细化晶粒问题

大锻件的奥氏体晶粒度一般是3~4级,有时还更大。大锻件的晶粒粗大,是由整个生产工艺过程的特点所决定的,例如,大锻件的锻造比小,而且形变不均匀;另外,加热的温度高且时间长。但是要保证大锻件具有良好的机械性能,获得细小而均匀的晶粒是重要的条件。所以大锻件热处理必须注意晶粒的细化和均匀化问题。

由此可见,大锻件的热处理有自己的特点,应予以足够的重视,经常总结生产经验,以便不断提高产品质量,满足重型机器制造飞速发展的需要。

编 者

目 录

第一章 冶金因素对大锻件质量的影响	1
第一节 冶炼工艺对大锻件质量的影响	1
一、大锻件用钢的冶炼方法	2
二、钢中的非金属夹杂物	3
三、钢中的气体	9
第二节 铸锭工艺对大锻件质量的影响	11
一、铸锭工艺概述	11
二、钢锭的结晶过程和结构	13
三、钢锭的偏析	14
四、大型钢锭中的非金属夹杂物	25
五、大型钢锭中的气体和缩孔	27
第三节 钢液真空处理对大锻件质量的影响	28
一、真空处理的原理	29
二、真空处理工艺方法	30
三、真空处理的效果	31
四、真空处理对大锻件性能的影响	32
五、真空脱氧(真空碳脱氧)	32
第四节 锻造工艺对大锻件质量的影响	35
一、锻造工艺概述	35
二、大锻件锻造工艺中的一些主要问题	37
三、锻造工艺对大锻件性能和热处理的影响	43
四、锻造工艺中常见的缺陷	46
第二章 大锻件第一热处理	50
第一节 第一热处理的目的	50
第二节 大锻件内的白点	50
一、白点的外观特征	50
二、白点对锻件质量的影响	51
三、氢脆、白点形成原因与机理	51
四、影响白点形成的因素	53
五、防止白点产生的措施	54
第三节 氢在钢中的溶解度与扩散	55
一、氢在钢中存在形式	55
二、氢在钢中的溶解度	55
三、氢在钢中的扩散	56
第四节 过冷奥氏体的分解与防止白点的热处理(工艺曲线与 S 曲线的关系)	57
第五节 大锻件第一热处理中晶粒的细化与调整	58
一、大锻件内晶粒粗大与不均匀性	58
二、粗大与不均匀晶粒对锻件性能与超声波探伤的影响	60

三、调整与细化晶粒的热处理工艺措施	62
第六节 大锻件第一热处理工艺的制定原则	63
一、按白点敏感性对钢分类	63
二、使锻件尽快地、充分地由奥氏体分解为铁素体——碳化物混合物	64
三、略低于 A_1 温度下长时间保温	65
四、重结晶的应用	66
五、等温保温后的缓慢冷却	66
第七节 国内某些工厂大锻件第一热处理工艺	67
一、碳钢与低合金钢中、小截面锻件的锻后冷却	67
二、锻件第一热处理	68
第八节 国外一些工厂大锻件的第一热处理工艺	71
第九节 高温形变热处理在锻件锻后冷却中的应用	76
第十节 大锻件防止白点热处理规范的计算	77
一、计算方法的原理	77
二、计算举例	79
三、应用计算方法的几个问题	81
第三章 大锻件的第二热处理	84
第一节 大锻件淬火和正火的加热	84
一、加热方式	84
二、加热温度的选择	85
三、阶梯加热	85
四、快速加热	89
第二节 大锻件淬火和正火的冷却	93
一、大锻件冷却的组织及性能分布	93
二、几种常用的冷却方式	97
三、大锻件淬火时的终冷温度和冷却时间	115
第三节 大锻件的回火	123
一、回火时的组织转变和内应力的消除	123
二、入炉温度和保持时间	127
三、加热速度	127
四、回火温度的确定	129
五、均温和保温时间	135
六、回火冷却	135
七、出炉温度	137
八、钢的回火脆性	137
第四节 大锻件在热处理过程中的内应力与断裂	141
一、热处理时的基本内应力	141
二、影响热处理内应力的因素	144
三、表面淬火时的内应力分布	148
四、回火时的内应力变化	150
五、热处理生产过程中的断裂实例	152
第五节 大锻件的加热与冷却计算	156
一、周围介质温度恒定时的加热与冷却计算	157

二、工件表面等速加热与冷却计算	162
第六节 热应力的计算	163
一、加热过程中热应力的计算	164
二、回火冷却时热应力的计算	164
第七节 大锻件淬透性的计算和测定	169
一、根据连续冷却转变曲线和冷却曲线计算临界直径	169
二、关于按化学成分计算临界直径的方法	174
三、关于大锻件沿截面组织分布的计算	177
四、计算结果在生产中的校验	180
③ 五、大锻件淬透性的实验测定及模拟试验	183
第四章 冷轧工作辊的热处理	189
第一节 冷轧工作辊的技术要求及生产工艺过程	189
第二节 冷轧工作辊的预备热处理	191
一、锻后退火	191
二、调质	193
三、预备热处理工艺讨论	196
第三节 冷轧工作辊的最终热处理	198
一、整体加热淬火	199
二、工频淬火	202
三、低温回火	210
② 第四节 轧辊热处理缺陷	212
一、轧辊的横向断裂	212
二、辊颈及轧辊的纵向断裂	212
三、轧辊脱肩	212
四、轧辊表面“崩裂”	213
五、轧辊的自然断裂	213
第五节 轧辊在使用中的破坏	214
第五章 汽轮机与发电机转子锻件的热处理	216
第一节 发电机转子和低压转子的热处理	216
一、对发电机转子和低压转子的性能要求	216
二、脆性转变温度与组织的关系	220
三、发电机转子与低压转子用钢	220
四、发电机转子与低压转子锻件预备热处理	223
五、最终热处理	225
第二节 高、中压转子的热处理	231
一、性能要求与使用钢种	231
二、高压、中压转子的热处理	232
第三节 断裂韧性基本原理及其应用于防范汽轮发电机转子的脆性断裂	235
一、发电机转子的脆性断裂事故	235
二、断裂韧性的基本原理	237
三、断裂韧性的测定方法	240
四、循环应力下裂纹的亚临界扩张	244
五、发电机转子锻件断裂韧性测定结果及其应用	245

第一章 冶金因素对大锻件质量的影响

在大锻件生产工艺流程中，热处理以前的工序主要是炼钢、铸锭和锻造。这些工艺过程对锻件质量的影响通称为冶金因素的影响。

这些工艺过程造成的有些缺陷往往不容易及时发现，直到热处理时或者热处理后对锻件的性能进行检验时才暴露出来。大锻件性能的好坏，固然与热处理工艺密切相关，但是，炼钢、铸锭和锻造对锻件性能起着更为重要的作用。没有恰当的热处理工艺，就不能使锻件的潜在性能充分发挥出来，甚至造成热处理废品，但是，如果经过冶炼、铸锭和锻造生产出的锻件毛坯有缺陷，那么无论怎样的热处理工艺也是徒劳无益的。这是因为许多冶金因素造成的缺陷如偏析、非金属夹杂物，锻造内裂等都不可能通过热处理的办法加以消除。

国内外长期生产实践证明，冶炼和铸锭是决定大锻件质量水平的首要环节。

热处理工作者有必要了解和掌握冶金因素对锻件质量的影响，以便正确制订热处理工艺。同时，就我国情况来说，大锻件的冶炼、铸锭和锻造都是和热处理一起在机械制造厂进行的，这就造成了有利条件，使热处理工作者能够直接了解这些冶金过程，并且同这些部门的工人和技术人员一起开展社会主义大协作，为不断提高大锻件的质量，革新大锻件的整个生产工艺而奋斗。

下面从大锻件热处理工作者的角度简要讨论一下炼钢、铸锭和锻造工艺的特点，同热处理工艺的关系和对大锻件质量的影响。至于炼钢、铸锭和锻造工艺本身的问题，则不在讨论范围之内。

第一节 冶炼工艺对大锻件质量的影响

冶炼出质量优良的钢液是生产质量优良的大锻件的基础。

为此，在炼钢过程中主要满足下列要求：

- (1) 化学成分符合钢种规格，出钢温度符合要求；
- (2) 有害元素如硫、磷等的含量要尽量地低；
- (3) 尽量减少钢中的非金属夹杂物；
- (4) 尽量减少钢中的气体，特别要减少引起白点和氢脆的氢气。

可见，冶炼工艺的主要任务除保证化学成分和出钢温度合格外，还必须尽量提高钢液的纯净度。完成前一任务并不困难，而尽量提高钢液的纯净度则是目前冶炼工作者全力为之奋斗的艰巨任务。

世界各国大锻件的生产中，开始时都是采用钢中气体较少、质量稳定的酸性平炉，自从广泛应用钢液真空处理以后，逐步改用碱性平炉或碱性电炉。特别是碱性电炉，应用越来越多，电炉的最大容量已达 360 吨。

日本还开始试用氧吹转炉（LD 或 Kaldor）来冶炼大锻件用钢^{〔2〕}。

我国目前大锻件用钢的冶炼主要采用碱性平炉、酸性平炉和碱性电炉，而且碱性电炉的应用也开始逐步增加。

下面首先介绍我国正在使用的各种大锻件用钢的冶炼方法。然后就冶炼过程中两个主要

问题——气体和非金属夹杂物进行简要的专门讨论。

一、大锻件用钢的冶炼方法

1. 碱性平炉法

炉底和堤坡用碱性耐火材料如镁砖、铝镁砖、镁砂和白云石等砌成的平炉称为碱性平炉。这种以碱性炉渣来炼钢的平炉，其特点如下：

(1) 因为采用碱性渣，可以大量除去硫、磷，因而炼钢原料不象酸性平炉法那样严格控制。这是这种方法的最大优点。

(2) 炉渣碱度的提高，虽然有利于除去硫、磷，但是，氢在钢中的溶解度和扩散能力却随之增大，因而钢中的氢含量较酸性平炉为高，一般碱性平炉钢液中含氢量为6~8PPM^{(1)*}。

(3) 碱性平炉钢中的非金属夹杂物主要是氧化物和硫化物。硫化物夹杂会给钢造成热脆性，本身有一定塑性，经压力加工后，沿金属的主要变形方向呈条状分布。使锻件的横向或切向性能降低，提高锻件的各向异性。

2. 酸性平炉法

炉底和堤坡用酸性耐火材料如硅砖，石英砂等砌筑成的平炉称酸性平炉，在冶炼中采用酸性渣操作。其特点如下：

(1) 因为是采用酸性炉渣，冶炼过程中不能除去炉料中的硫、磷。因此，必须选用硫、磷含量在成品钢要求含量以下的原材料，当然，这将使钢的成本提高。

(2) 酸性炉渣中 SiO_2 是过饱和的，自由 FeO 的浓度很低。在熔炼末期，熔池温度升高时，熔池中的铁能使渣中硅产生还原，使钢液很好地自动脱氧。因此，精炼末期可以不加或少加硅铁、锰铁和铝等脱氧剂脱氧，生成的脱氧产物也就很少，而这种脱氧产物是钢中非金属夹杂物的主要来源，所以酸性平炉钢中非金属夹杂物较少，纯净度高。

(3) 氢在酸性炉渣中的溶解度和渗透能力较小，炉渣对钢液起着保护作用，因此，钢液中的含氢量较其他方法冶炼的钢液为低，一般为4~6PPM⁽¹⁾。所以酸性平炉钢的白点敏感性较小。

(4) 残存于钢液中的非金属夹杂物不仅数量较少且主要是不易变形的硅酸盐类夹杂物，在钢中多呈球状分布，所以，酸性平炉钢同碱性平炉钢比较，塑性指标较好，各向性能比较均匀。

酸性平炉冶炼法按照对熔炼后期硅的还原程度不同，可分为两种操作方法：

(1) 硅还原法。此法的特点是使硅充分还原，使钢液中的硅含量达到0.2%以上。因此，钢液可以充分自动脱氧，不需要再加脱氧剂。这样炼出来的钢，夹杂物极少，而且出钢温度容易控制，因而成品钢的质量一般较高。但是，熔炼时间较长，炉底容易损坏。

(2) 限制硅还原法。精炼时用分批加入矿石法，限制炉渣中硅的还原，使出钢前钢液中的硅含量限制在0.17%以下。其目的是加速碳的氧化，缩短熔炼时间。同时，沸腾状况比硅还原法更为强烈充分，更有利于脱气。但是，出钢前，需要加入一定量的脱氧剂使钢液补充脱氧。此外，出钢温度不易控制，这些都不利于钢液质量的提高。

在我国大锻件生产中，硅还原法和限制硅还原法都经常采用，主要根据炉体情况和所炼

* 1PPM 为百万分之一，相当于 $1.125 \text{ 厘米}^3/100 \text{ 克}$ 。

钢种来决定。一般来说,为了保证钢液质量,尽量采用硅还原法。

我国第一重机厂自1965年以来,采用硅锰还原法,冶炼了200多炉钢,其中包括各种容量的汽轮发电机转子用钢,获得了较好的效果^[3]。

实际上,在我国酸性平炉法主要是在碱性平炉——酸性平炉双联法中应用。这种方法是先将炉料在碱性平炉中冶炼,除去硫、磷,然后将含有规定碳分的半成品钢液转入酸性平炉中进行精炼,这样钢液的纯净度较高,质量更好。当然成本也随之有所增加。

3. 碱性电炉法

碱性电炉的冶炼原理和碱性平炉相同,不同的是采用高温电弧加热,冶炼过程不象平炉那样,受炉气的限制。碱性电炉法分为氧化法(国外通称为双渣法)和不氧化法(返回法)。氧化法与不氧化法不同之点是在熔化期后,还原期前有一个加铁矿石使熔池激烈氧化沸腾的氧化期。

碱性电炉法的特点是:

(1) 在冶炼过程后期,可以在炉内人为地造成还原性气氛,这种气氛有利于还原期中脱氧、去硫和合金化等操作的顺利进行;

(2) 在还原期可以造白渣或电石渣进行扩散脱氧。扩散脱氧不产生残留于钢液中的脱氧产物,从而提高了钢液的纯净度;

(3) 可以最大限度除去硫和磷。从冶金原理可知,去硫的条件是:炉渣碱度高,熔池温度高,渣中FeO少和渣量足够大。而碱性电炉还原期的白渣和电石渣碱度为3.0~5.5,FeO含量可低到1%,而碱性平炉渣的碱度为2.0~2.3,FeO含量为~10%。所以一般碱性平炉脱硫最多为50%(不造新渣),而碱性电炉的脱硫能力则大得多。同时,如果采用氧化法的双渣操作,则可以在除磷条件非常好的氧化期将钢液中的磷充分除掉,并将氧化渣扒净,使还原期不致回磷。所以碱性电炉可以将硫、磷含量降低到0.015%以下,有些降低到0.01%^[4]。

(4) 钢液的含氢量由于碱性炉渣的缘故,仍然高于酸性平炉,一般为5~7PPM^[5]。

大型钢锭一般由两台以上炉子配炉浇注,因为采用一台炉子熔炼浇注时,一方面,不必要地增大单炉容量,另外一方面,一包浇注,浇注时间长,耐火材料不易抵抗长时间浇注的侵蚀冲刷,同时温降也增大。

多炉合浇时,则各炉的出钢温度和时间可便于调节。从这点来看,酸性平炉能够待炉好几个小时,出钢温度容易控制,而碱性平炉则能获得较高的出钢温度,碱性电炉则兼有这些优点。

二、钢中的非金属夹杂物

1. 钢液中非金属夹杂物的生成和除去

非金属夹杂物一般是指经过加热和冷却等热处理过程不易消失的非金属化合物。表1是钢中通常存在的几类非金属夹杂物及其主要特性。

实际上钢中存在的非金属夹杂物的成分和结构是非常复杂的,多以复合化合物的形式存在。

夹杂物的组成和结构可以通过化学分析法、X射线结构分析法、金相法加以确定。不同夹杂物对超声波的反射能力不同,例如,硅酸盐的反射能力较强,氧化物的反射能力次之,

表1-1 [6] [7] 钢中主要非金属夹杂物及其主要性质

类 别	组 成	熔 点 (°C)	热压力加工时的可塑性
硅酸盐类	$2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ($\text{SiO}_2 < 40\%$) $(\text{SiO}_2 > 40\%)$ $(\text{Fe} \cdot \text{Mn})\text{SiO}_4$ 等	1300~1340 1180~1380 1380~1700	可以塑性变形
硫化物类	FeS MnS 、 $(\text{FeMn})\text{S}$ $(\text{FeCrMn})\text{S}$ $(\text{CrFe})\text{S}$ 等	1170~1197 1620	可以塑性变形
氧化物类	$\text{FeO} \cdot (\text{FeMn})\text{O}$ MnO Al_2O_3 Cr_2O_3 等	1420 1780 2030 2265	不能塑性变形, 而可能 成不连续的粒状分布
氮碳化合物	TiC 、 TiN 、 $\text{Ti}(\text{CN})$ AlN 等	2930(3177)	不能塑性变形, 呈分散粒状分布

硫化物的反射能力则最弱, 所以, 在积累大量试验资料的基础上, 有可能用超声波无损法初步判定夹杂物的种类。

夹杂物按来源可以分为两类:

(1) 外来夹杂物

在冶炼和铸锭过程中钢液不断同耐火材料、炉渣和空气接触。被浸蚀掉的耐火材料碎粒, 由空气氧化产生的氧化物和小粒炉渣等经常混入钢液中形成所谓外来夹杂物。当然这些混入物也会同钢液中各种成分产生反应而生成新的夹杂物。

外来夹杂物一般占夹杂物总量百分之几到30%左右^[6]。当然, 因其生成原因的偶然性很大, 其含量极不稳定。

(2) 内生夹杂物

由于脱氧和脱硫等反应在钢液中形成的夹杂物称内生夹杂物。这是钢中夹杂物的主要来源。

夹杂物按尺寸分类则有:

(1) 宏观夹杂: 即肉眼可见的尺寸在1毫米以上的夹杂包括砂眼、夹渣等。目前, 超声波探伤能够发现尺寸1毫米以上的缺陷, 所以, 锻件内部的宏观夹杂完全可以查明。

(2) 显微夹杂: 即借助光学显微镜才能观察到的尺寸在 $1 \sim 10^{-4}$ 毫米范围内的夹杂。一般按金相方法进行评级。

(3) 超显微夹杂: 即光学显微镜观察不到的尺寸在 10^{-4} 毫米以下的夹杂。

非金属夹杂物一般来说是有害的, 应该尽量除去。

减少钢中夹杂物主要是尽量减少夹杂物的来源和使已经形成的夹杂物在凝固以前上浮到钢液表面。现简要叙述如下:

(1) 减少外来夹杂物的来源主要是提高耐火砖 (特别是盛钢桶衬砖、座砖、塞头等) 的质量, 即降低气孔率提高耐侵蚀性, 不致在冶炼和浇铸过程中被熔化、冲刷或崩裂。

(2) 出钢、浇注过程中尽量防止钢液被二次氧化, 如采用氩气保护, 在盛钢桶的钢液

表面铺盖一层粉渣保护。

(3) 除去夹杂物的主要方法是使其从钢液中尽量上浮。

夹杂物比重比钢液比重小得多, 按照斯托克斯定律, 可以上浮到钢液表面而被排除到渣中。上浮速度为

$$V = K \cdot \frac{1}{9} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot g \cdot r^2 (D_m - D_s) = 218 r^2 \frac{D_m - D_s}{\eta}$$

V ——夹杂物上浮速度, 厘米/秒;

K ——在钢液夹杂物系统内 $K = 1$;

η ——钢液粘度, 克/厘米·秒;

g ——981厘米/秒²;

$D_m \cdot D_s$ ——钢液和夹杂物的比重, 克/厘米³。

斯托克斯公式是假定夹杂物为球状刚体, 而且同钢液之间不产生滑动。如果考虑到夹杂物与钢液之间存在一定的滑动摩擦, 则上浮速度将大于该式计算出的数值。再如考虑到有些夹杂物处于液体状态, 则其上浮速度比计算出的更大^[44]。

由式可见, 决定上浮速度的主要因素是夹杂物半径。半径越大, 越易上浮。

采用复合脱氧剂时, 能生成熔点较低的复合型夹杂物, 容易互相聚合, 形成较大的体积而上浮。使钢液强烈搅动, 例如, 熔炼后期保持较大的脱碳速度, 使熔池强烈沸腾, 向盛钢桶的钢液中吹入惰性气体, 电磁搅拌等, 都有助于夹杂物的聚合和使夹杂物随上升液流而加速上浮。所有这些都是除去夹杂物的重要措施。

最后一批夹杂物是在浇注期间从盛钢桶的下部钢液中上浮的。如果盛钢桶中钢液深度为250厘米, 浇注时间为50分钟, 则钢液面下降速度为 8.3×10^{-2} 厘米/秒。其上升速度与钢液面下降速度相等或更大的夹杂物就一定能够上浮到钢液表面。如果取夹杂物的比重为3, 钢液的比重为7, 粘度为0.0169, 那么来得及上浮的夹杂物的最小半径为

$$r_{\text{最小}} = \sqrt{\frac{V \cdot \eta}{218(D_m - D_s)}} \approx 0.0013 \text{ 厘米}$$

也就是说, 浇注前, 半径大于0.0013厘米的夹杂都能从钢液中除去而不致进入锭模中。所以较粗大的夹杂, 特别是大部分外来夹杂都能上浮除去。只有在浇注过程中或者以后混入的粗大夹杂物才可能保存在钢锭中。

如果浇注温度过低, 钢液粘度增大, 由上式可以看出有些较大的夹杂也将来不及上浮而进入锭模。

斯托克斯公式只考虑钢液和夹杂物的比重差和钢液粘度的影响。而影响夹杂物上浮的另一个重要的因素是钢液对夹杂物的润湿性。润湿性决定于钢液的表面张力; 表面张力越小, 则钢液越容易润湿夹杂物, 在钢液和夹杂物的界面层内两者的分子相互渗透良好, 因而夹杂物上浮困难, 甚至根本不能上浮。在钢液温度下处于熔体状态的 SiMn 复合脱氧产物, 能很好地被钢液润湿, 因此, 尽管按照斯托克斯定律它们通过凝聚长大而可能上浮, 但是由于被钢液充分润湿, 实际上浮困难, 结果仍然有相当多的数量残留在钢液中。而处于固体状态的 Al_2O_3 等夹杂物不易被钢液润湿。所以尽管不易凝聚而尺寸较小, 仍然能够很快上浮。

进入锭模的夹杂物, 仍然可以继续上浮。有人认为, 当锭内产生20%的固相以后, 夹杂物的上浮乃完全停止^[10]。

(4) 保持良好的热工制度, 认真维护炉体, 也是减少外来夹杂物很重要的方面。

(5) 通过改变夹杂物的组成、形状和分布情况,以减少其危害作用。

圆粒状夹杂物比角状夹杂物的危害性较小。采用复合脱氧剂,降低夹杂物的熔点,使其成圆粒状存在而降低其危害性。

夹杂物的分布状况与钢锭的偏析密切相关。夹杂物的偏析程度越小,危害性越小。有关大锻件中的夹杂物的生成、分布及其与偏析的关系在下节还要讨论到。

2. 非金属夹杂物在锻造和热处理工艺中的变化

尽管在冶炼和铸锭过程中,竭力采取各种提高钢液纯净度的措施,而钢锭中仍然存在一

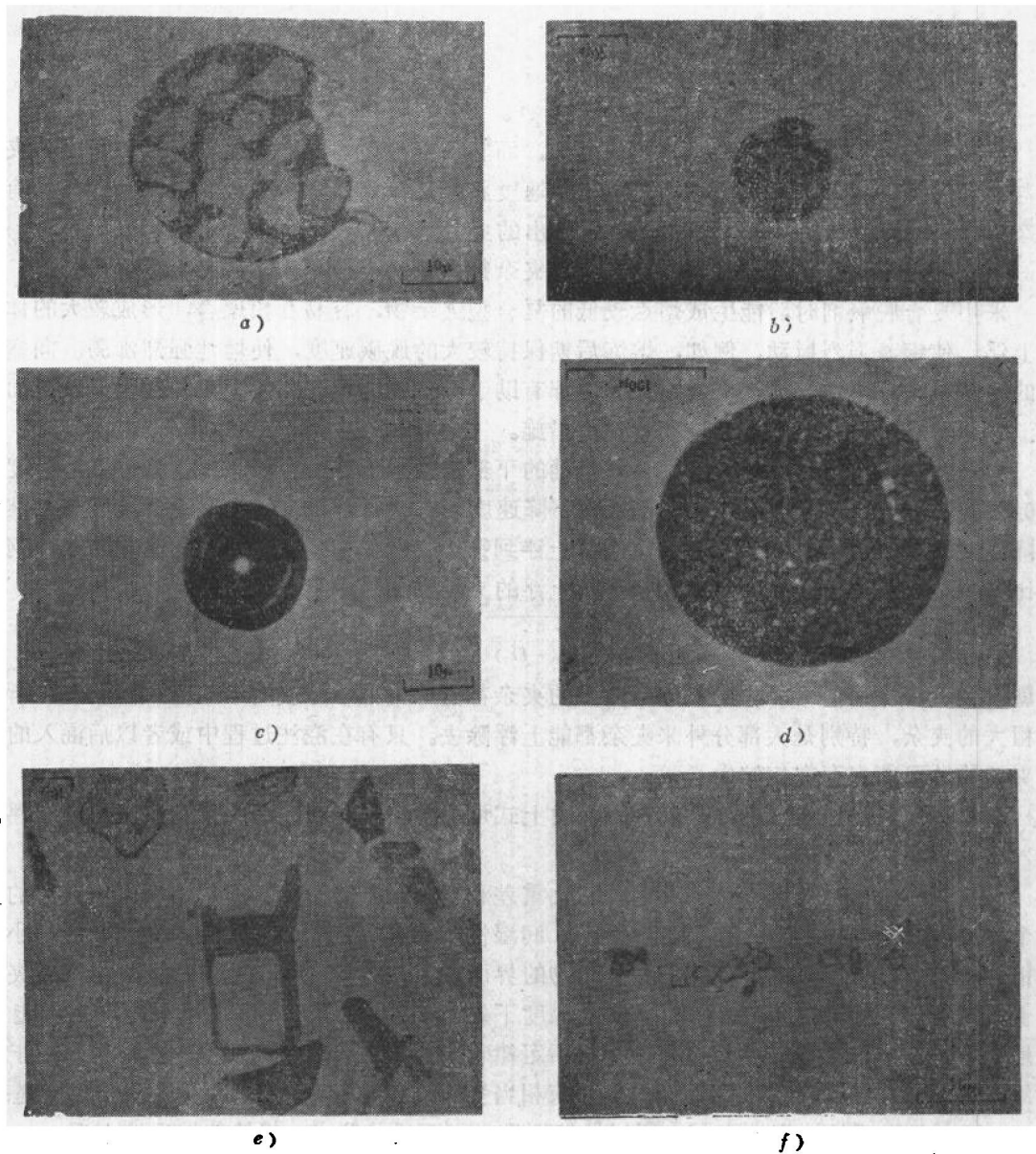


图1-1 钢锭中的夹杂物

(a) 沸腾钢中硫化物(灰色)和氧化物(暗色); (b) 半镇静钢中氧化铝(角状)、硫化物(灰色)硅酸盐; (c) Mn—Si 高强度钢中硅酸盐夹杂物; (d) 中碳钢中铝硅酸盐夹杂物; (e) (f) 氧化钛(暗色)和氧化氮(白色)

定量的非金属夹杂物。

钢锭中夹杂物的形状是各种各样的。硅酸盐夹杂物或硅酸盐与硫化物和氧化物的复合型夹杂物往往呈圆球状；而含有特殊合金元素的夹杂物如铬酸盐、钛化物和氮化物等则往往成角状体。图 1-1 是钢锭中的夹杂物。

钢锭经过锻压、轧制后，夹杂物同基底金属一起承受形变应力，而可能产生变形。图 1-2 是锻件中的夹杂物。

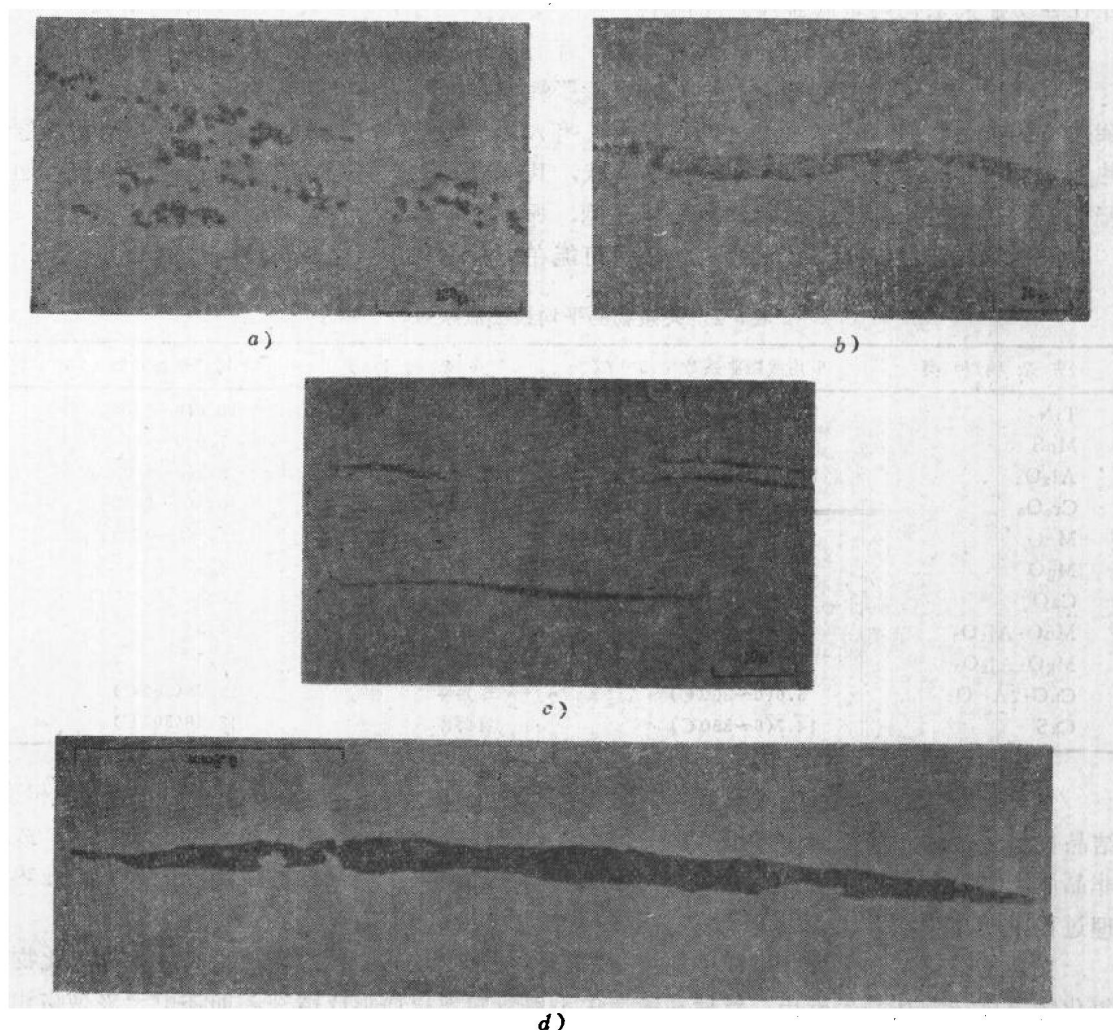


图1-2 锻件中的夹杂物

(a) 低合金钢中氧化铝夹杂物 (锻件)；(b) 沸腾钢中硅化物和氧化物 (轧材)；
(c) 硅酸盐夹杂物 (轧材)；(d) 锻造中碳钢中的夹砂、氧化物和硅酸盐

夹杂物在形变以后的形状对锻件性能的影响非常重要，所以有关夹杂物的形变特性被很多人研究过。根据形变特性，一般将夹杂物分为三大类：

(1) 由于加工而产生塑性变形的：如硫化物、多数硅酸盐等；在锻件中，顺延伸方向成长条状存在。

(2) 由于加工而成不连续的粒状排列的：主要是铝的氧化物；在锻件中成链状或者沿

着延伸方向成点状集团的形式存在。

(3) 加工中不变形的：大部分氧化物和氮化物等，在锻件中以不规则的点状存在。

当然，可以塑性变形的夹杂物，其可塑性也相差很大。其中硫化物不论在高温下(1150℃左右)或低温下(950℃)都容易变形；铁硅酸盐的可塑性就小得多，特别是在低温下变形极小。铁锰硅酸盐在高温下很易变形，在低温下可塑性就减小了。

不变形的或难变形的夹杂物，例如 Al_2O_3 、铝硅酸盐、石英、氮化钛等，在加工过程中往往容易在夹杂物与基底金属之间产生空隙^[8]，这是由于两者的变形能力不同所致。

非金属夹杂物在热处理过程中的变化，有以下几点值得注意：

(1) 夹杂物和基底金属(钢)的热膨胀性能是不同的，在锻件加热和冷却过程中，夹杂物和基底金属之间将产生很大的热应力，有人计算可达 $77\sim 124$ 公斤/毫米²^[9]。当然，这种热应力还决定于夹杂物的种类、大小和形状，其中以氧化铝夹杂物产生的热应力最大。如果坚硬的氧化铝夹杂物为柔软硫化物所包围，那末这种热应力作用将大大缓和。

由于热膨胀性能不同(见表1~2)，也可能在夹杂物和基底之间形成空隙。

表1-2 夹杂物的平均线膨胀系数^{[8][10]}

夹杂物种类	平均线膨胀系数 $\times 10^{-6}/^{\circ}C$	夹杂物种类	平均线膨胀系数 $\times 10^{-6}/^{\circ}C$
TiN	9.4(0~700℃)	$3CaO \cdot Al_2O_3$	10.0(0~800℃)
MnS	18.1(0~700℃)	$12CaO \cdot 7Al_2O_3$	7.6(0~800℃)
Al_2O_3	8.0(20~550℃)	$CaO \cdot 6Al_2O_3$	8.8(0~800℃)
Cr_2O_3	7.9(0~700℃)	$CaO \cdot Al_2O_3$	6.5(0~800℃)
Mn_2O	14.1(0~700℃)	1% C—Cr 轴承钢	12.5(0~350℃)
MgO	13.5(0~700℃)	铁素体	14.5
CaO	13.5(0~700℃)	奥氏体	23.5
$MnO \cdot Al_2O_3$	8.0(0~700℃)	马氏体	11.5
$MgO \cdot Al_2O_3$	8.4(0~700℃)	渗碳体	12.5
$CaO \cdot 2Al_2O_3$	5.0(0~850℃)	珠光体	13.28(500℃)
CaS	14.7(0~850℃)	贝氏体	13.46(500℃)

(2) 夹杂物虽然不能被热处理消除，但在热处理过程中，夹杂物仍然有可能产生相变，结晶化和从过饱和固溶体中析出等等变化。例如某些硅酸盐由非稳定相转变成稳定相，或从非晶质产生结晶化。弄清这方面的变化，将有助于分析钢中夹杂物的生成原因和它们在热处理过程中的作用。

夹杂物在锻造和热处理过程中的变化，必然会影响这些工艺过程的进行。由于硫化物、氧化物等夹杂物在晶界析出，致使在锻造中出现热脆现象而形成锻裂。前述由于夹杂物和基底金属线膨胀系数不等而产生的热应力可能在钢中产生微小裂纹，甚至使锻件淬裂。

在大锻件中，白点往往在夹杂物偏析带出现，这可能与氢向夹杂物的空隙处扩散有关。

3. 非金属夹杂物对锻件性能的影响

除了在易削钢等特殊场合外，钢中非金属夹杂物一般来说对锻件的性能是有害的，对大锻件来说，尤其是这样。夹杂物的存在破坏了基底金属的连续性，起到相当于钢中空穴和裂纹的危害作用。在应力作用下，夹杂物邻近的基底金属或者夹杂物本身中将产生应力集中和形成显微裂纹。此外，如前所述，由于基底金属和夹杂物的热膨胀性能和热变形能力不同，在热加工或热处理时可能产生空隙。所有这些就是夹杂物影响机械性能的根源。

关于夹杂物对机械性能指标的影响,已经作过很多试验,一般结论如下^{〔8〕〔46〕}:

(1) 在静拉伸试验中,夹杂物对纵向、横向试样的强度极限、屈服极限等几乎没有什么影响,而明显地降低断面收缩率,对横向试样比对纵向试样降低更大。加工后容易延伸的硫化物等夹杂物的作用最为明显。夹杂物也使延伸率有所降低,但不明显。

(2) 夹杂物对缺口试样冲击值(缺口韧性)的影响和对断面收缩率的影响相似,即明显降低横向试样的冲击值。那些容易延伸的细长的夹杂物如 MnS 和锰硅酸盐等,其影响更大。在钢中加入钛和铈可以使硫化物球化,采用高温扩散退火可以使细长的硫化物破碎而球化,这些都能提高钢的缺口韧性,即提高抗脆性的能力。

(3) 夹杂物对疲劳强度的影响很大。一般来说都使锻件的疲劳强度下降,而横向试样的疲劳强度降低更大,也即提高了材料疲劳强度的各向异性。

在夹杂物的含量、种类、大小等因素中,以夹杂物的大小的影响最大。夹杂物的平均直径越大,则材料的疲劳强度越低,如图 1-3 所示^{〔8〕},即其一例。

夹杂物含量的影响,在通常的含量范围内,并不明显。而夹杂物种类的影响实际上是存在的,但是尚难得出那种夹杂物最坏的结论。

夹杂物的存在破坏了基底金属的连续性,起到相当于钢中空穴和裂纹的危害作用,即在夹杂的尖锐部分邻近的基底金属中产生应力集中。这就是夹杂物影响机械性能的原因。

加工中容易变形的夹杂物在锻件中沿延伸方向被压成薄片状,这种伸长的夹杂物和其他被延伸的疏松和偏析组织一起是大锻件中出现木状断口(石板状断口)的原因。这时,锻件的横向韧性指标显著降低,锻件的各向异性显著提高。前面指出的硫化物夹杂等容易变形的夹杂物对断面收缩率和冲击值的影响也是与这点一致的。

在机械零件的破断事例分析中,发现很多是由夹杂物引起的。非金属夹杂物造成滚珠轴承的疲劳破损就是一个明显的例子。在大锻件中也经常发现,如转子^{〔11〕}、轧辊^{〔8〕}等疲劳破断的起点就是在非金属夹杂所在的地方。所以提高钢的纯净度和减少夹杂物,尤其是大尺寸的夹杂物,是大锻件生产中非常重要的一个问题。

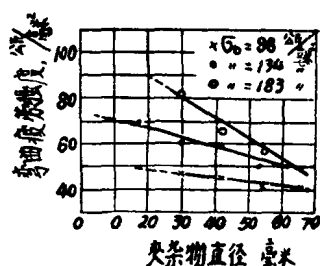


图1-3 成为疲劳断裂起点的夹杂物的几何平均直径和弯曲疲劳强度的关系(铬镍钢)

三、钢中的气体

1. 气体在钢中的溶解和除去

在炼钢过程中,经常有氢、氧、氮等气体溶入钢液,因而在成品钢中总是残存一定量的气体。

在固体钢中,氢是以质子状态溶解于钢中,而最终也是以质子状态存在。也可能形成一部分分子状态氢及氢化物。氮是以原子状态溶入钢液中,而最终在固体钢中主要以氮化物的形式存在。氧在钢液中的存在形式主要是 FeO , 也可能以原子或阴离子的形式存在。在固体钢中,实际上只以氧化物的形式存在。

气体的来源主要是:

(1) 由炉料(废钢、生铁、铁合金及造渣材料等)带入。炉料中的固有气体以及炉料中的水分分解和其他如铁锈等杂质热分解,将产生大量氢、氧、氮而溶入钢中。铁合金和合

金附加料（镍、铝等）带入钢中的氢最多。

（2）由炉气带入。炉气中的 H_2O 、 H_2 、 N_2 、 O_2 、 CO_2 等都有可能经过炉渣或直接与钢液接触而溶入钢中。它们在炉气中的含量越高，则溶入钢液中的量也越多。

需要特别提出的是，大气湿度对钢中的氢含量有着明显的影响。根据 326 炉统计的结果，空气湿度从 1 克冷/呎³* 提高到 6 克冷/呎³ 时，钢中的氢含量从 3PPM 提高到 4PPM^[9]。我国第一重机厂统计了 72 炉氢含量的数据，发现在多雨的夏季炼出的钢氢含量最高，而干旱的冬春季炼出的钢氢含量最低（见图 1-4）。

减少钢中气体的主要措施是：

（1）对所有炉料都应该有良好的干燥和保存制度，保持炉料清洁。对铁合金和脱氧剂尤应注意烘烤，因为这些材料在冶炼末期加入，溶入的气体已不能通过熔池沸腾而充分排出钢液。

（2）降低炉气中有害气体的成分。

（3）在冶炼中，最有效的去气手段是沸腾除气。

在平炉和电炉冶炼的精炼期，必须加入矿石以去掉钢液中过多的碳量，因而造成钢液沸腾，称为矿石沸腾。矿石沸腾后期，停止加入矿石后，钢液由于炉渣中的氧的去碳作用继续沸腾，称为纯沸腾。这种钢液的去碳沸腾是完成精炼期的工艺目的的必要条件。

沸腾期间，钢液中生成大量的一氧化碳气泡上浮到炉渣中，这时，钢液中的氢、氧、氮等溶入气泡并随同一起上浮进入炉渣中。

实际上，沸腾期间存在气体溶入和排出钢液的两个相互矛盾的过程。一方面，气体经由炉渣而溶入钢中；另一个方面，钢液中的气体随气泡转入炉渣。钢中气体的最后含量由这两个过程的消长所制约。实践表明，一般情况下，降碳速度足够大，钢液沸腾足够强烈，则去气过程是主要的，因而，通过沸腾能有效地除去钢液中的气体。

为了保证充分除气所必需的降碳速度，不同资料的结论不一。苏联资料为不小于每小时 0.15~0.20% C，美国人认为不小于每小时 0.3%^[12]。近来，炼钢工作者从实践中认识到较大的降碳速度对于除气（当然，还有非金属夹杂物）是极为重要的，因而有采用较大的降碳速度的趋势。

我国各重机厂在冶炼大锻件钢中对降碳速度都提出明确要求。如第一重机厂在酸性平炉限制硅还原法冶炼 30Cr2MoV、34CrMo、34CrNi3Mo 等转子钢的工艺中规定，矿石沸腾期

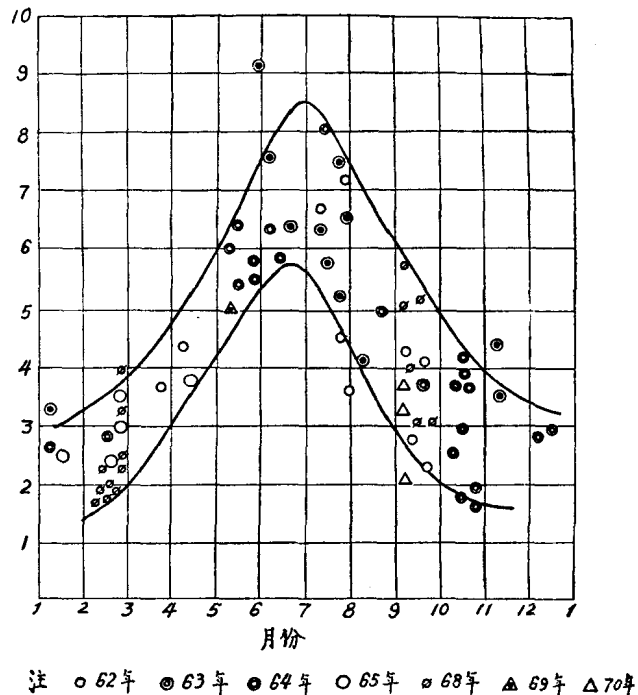


图1-4 氢含量与季节的关系

* 1 克冷/呎³ = 0.0648 克/呎³