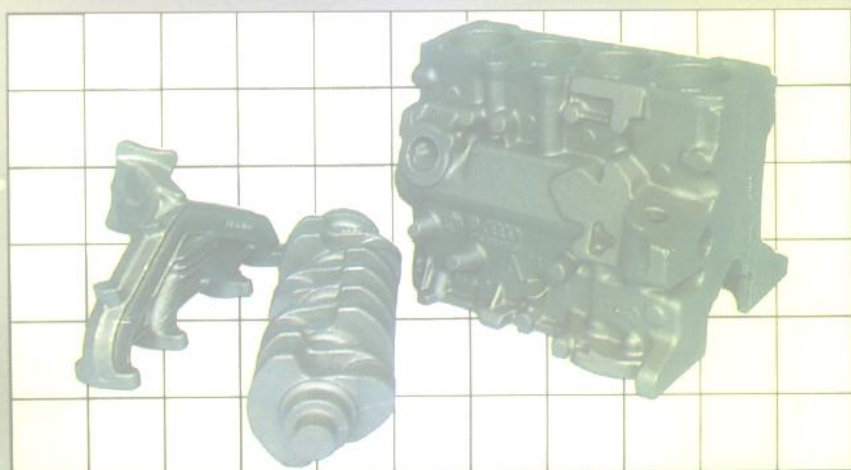


# 铸件挽救工程

● 钱翰城 主编



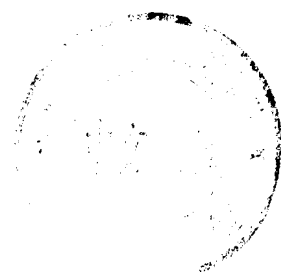
10250.6

版社

● 重庆大学出版社

# 铸件挽救工程

钱翰城 主编



重庆大学出版社

## 内 容 提 要

本书是为推动铸件挽救工程技术在制造业中应用而编写的。

全书共分 10 章,分别为概论(主要叙述挽救工程的意义及内容,铸造缺陷的形成与预防),金属学基本知识,熔焊修复技术,钎焊修复技术,溶解扩散焊修复技术,扩散焊及其应用,喷涂技术,电刷镀技术,粘接修补技术,渗漏缺陷挽救技术等。其中溶解扩散焊技术为作者的研究成果,现已在国内广泛应用。

本书可作为高等院校本科生及研究生教材或教学参考书,也可供制造行业的技术人员、技工及从事挽救工程的研究人员参考。

DV40/10

### 铸件挽救工程

钱翰城 主 编

责任编辑 梁 涛

\*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆建筑大学印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:11 字数:275 千

1996年6月第1版 1996年6月第1次印刷

印数:1—3000

ISBN 7-5624-1116-6/TH·51 定价:12.50 元

(川)新登字 020 号

# 前 言

铸件挽救工程(Salvage Engineering for Castings)是近年来在国内外发展起来的一个新技术领域。它是指对带有缺陷的铸件毛坯,在制品及模具等进行修复使之成为合格品的技术。众所周知,市场竞争的两个主要因素是质量及价格,如何保证质量又以最低的成本进行生产就构成了大规模工业生产的主题。一方面,将不良品代替良品就不能保证质量;另一方面,随意废弃不良品而不进行挽救又将增加成本。挽救工程即是将这一矛盾统一的手段。它既保证了产品的质量,又降低了生产成本。因此,目前已受到国内外的普遍重视。

事实上,可以这样来认识铸件挽救工程的重要性。在人类社会,无论你是否采取措施,先天性缺陷、疾病及意外损伤总是不可避免的,因此就出现了医疗技术。在铸造工程中也完全一样。因此铸件挽救工程事实上就是铸件医疗技术。当然,在工程中更重视的是其挽救的质量及价值。

本书是为推动铸件挽救工程技术在我国发展而编写的,其内容包括传统技术与新技术两个方面,其中也有编写者的成果。由于编写时间仓促,又无先著,因此自感不足,谨请同仁批评。

全书共分10章,编写者分别为:第1章钱翰城;第2、3章彭晓东;第4章李俊;第5章钱翰城、赵建华、陈星明;第6章杨大壮;第7章赵建华;第8章钱东航、李俊;第9章张晓梅;第10章林惠德、耿煜、付荫林、张伯年。全书由钱翰城终审定稿。

在编写过程中,值得提出的是重庆大学合金研究室的陈如松同志,他负责了全书稿件的抄写和制图工作,为本书的完成付出了大量的劳动,在此致谢。

编者

1996年3月

# 目 录

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第1章 铸件挽救工程概论         | 1   |
| 1.1 挽救工程的定义及其意义      | 1   |
| 1.2 常用挽救工程技术及其适用范围   | 1   |
| 1.3 铸件挽救工程技术的分类及内容   | 2   |
| 第2章 金属学基本知识          | 10  |
| 2.1 金属的结构            | 10  |
| 2.2 钢铁的组织与性能         | 17  |
| 2.3 钢铁的相变            | 26  |
| 第3章 熔焊修复技术           | 32  |
| 3.1 熔焊原理             | 32  |
| 3.2 手工电弧焊            | 36  |
| 3.3 铸铁的熔焊修复          | 42  |
| 3.4 铸铁加热减应焊补工艺       | 53  |
| 第4章 钎焊修复技术           | 58  |
| 4.1 概述               | 58  |
| 4.2 钎料               | 61  |
| 4.3 钎焊去膜过程           | 63  |
| 4.4 钎焊方法及设备          | 65  |
| 4.5 钎焊修复过程           | 67  |
| 4.6 钎焊应用举例           | 69  |
| 第5章 溶解扩散焊修复技术        | 73  |
| 5.1 溶解扩散焊原理          | 73  |
| 5.2 工艺装备及材料          | 76  |
| 5.3 溶解扩散焊操作工艺        | 76  |
| 5.4 溶解扩散焊热过程的研究      | 78  |
| 5.5 应用实例             | 88  |
| 第6章 扩散焊接修补技术         | 89  |
| 6.1 概述               | 89  |
| 6.2 扩散焊过程分析          | 91  |
| 6.3 扩散焊接规范参数的选择      | 93  |
| 6.4 常用材料的扩散焊         | 98  |
| 6.5 液相过渡扩散焊在铸件修补中的应用 | 99  |
| 第7章 喷涂技术             | 100 |
| 7.1 概述               | 100 |

|             |                |            |
|-------------|----------------|------------|
| 7.2         | 基本原理           | 100        |
| 7.3         | 主要材料和工设备       | 103        |
| 7.4         | 工艺过程           | 106        |
| 7.5         | 涂层缺陷分析         | 110        |
| <b>第8章</b>  | <b>刷镀技术</b>    | <b>112</b> |
| 8.1         | 概述             | 112        |
| 8.2         | 刷镀原理及其工艺特点     | 112        |
| 8.3         | 刷镀设备           | 113        |
| 8.4         | 刷镀溶液           | 120        |
| 8.5         | 刷镀工艺和规范        | 123        |
| 8.6         | 刷镀层的组织和性能      | 127        |
| 8.7         | 刷镀应用实例         | 129        |
| <b>第9章</b>  | <b>粘接</b>      | <b>132</b> |
| 9.1         | 概述             | 132        |
| 9.2         | 粘接剂的组成         | 133        |
| 9.3         | 粘接机理           | 134        |
| 9.4         | 金属的粘接          | 137        |
| 9.5         | 粘接技术在修补方面的应用   | 138        |
| 9.6         | 修复实例           | 141        |
| <b>第10章</b> | <b>渗漏缺陷的修复</b> | <b>144</b> |
| 10.1        | 浸渗技术的作用和应用范围   | 144        |
| 10.2        | 浸渗方法及浸渗工艺流程    | 146        |
| 10.3        | 浸渗剂的种类和特征      | 150        |
| 10.4        | 浸渗设备           | 164        |
| 10.5        | 应用效果           | 166        |
| 10.6        | 内压式渗透补漏技术      | 167        |

# 第1章 铸件挽救工程概论

## 1.1 挽救工程的定义及其意义

铸件挽救工程是指将带有缺陷的铸件、毛坯,在制品及模具等进行修复使之成为合格品或恢复其使用性能的技术。它是集物理、化学、材料、冶金、化工及机械等各类基础及应用基础学科知识的综合性应用技术。

在铸造生产中,由于工艺过程的复杂性,将不可避免地出现一定数量的不良品,一般在2%~20%之间。据统计,我国年产铸件约1200万吨,平均废品率为10%,则每年报废铸件120万吨左右,损失甚为可观。此外,有一部分铸件缺陷是在加工过程中发现的,此时铸件已经增值,损失更大。

在模具生产中,常常由于加工错误而导致报废。同时,在使用过程中,也常出现局部磨损或损伤等问题。由于模具属于高值产品,制造周期长,由上述缺陷而报废甚为可惜,必须加以修复。

众所周知,产品的竞争包含着两个主要因素,即质量及成本(价格)。不良品的增加,势必增加成本,降低竞争能力。如果将不良品代替良品,又将降低产品质量,丧失竞争能力。而挽救工程正是将质量与成本进行统一的措施。国际汽车市场的竞争充分说明了这一问题。为了实现高质量低成本生产,目前,工业发达国家的制造业均已引入挽救工程工艺,将一切能进行挽救的铸件(或零件)进行挽救,在保证质量的前提下尽量降低成本。

在我国,这一技术领域已开始受到普遍重视,其首要原因是,改革开放以来,在我国制造业中,亦已开始引入市场竞争机制,生产成本已构成对产品竞争的威胁,特别是我国复关后将进入世界市场的大循环,产品的成本将对市场竞争起十分重要的作用。对于挽救工程的引入,无疑可以加强产品的竞争能力。实际上,人们无论如何注意产品质量,也将不可避免出现不良品,这犹如防病与治病的道理。生产中一旦出现了不良品就应尽一切方法进行挽救,而不是任意抛弃浪费。关键的问题是要使挽救件的性能达到产品的要求。当然,目前尚没有一种技术能适用于所有的情况,因此,发展针对不同的材质,不同产品要求的专用技术就十分重要。

## 1.2 常用挽救工程技术及其适用范围

理想的修复技术应满足的要求是:

- 1)修复部位的强度与母材相当,以保证使用性能。
- 2)修复区、热影响区的硬度与母材相当,以保证加工性能及使用性能。
- 3)外观色泽与母材基本相近。

4)修复后工件的变形量应控制在一定范围内。

5)工作效率高。

6)具有经济性。

7)劳动条件好,无环境污染。

迄今为止 尚没有一种技术能满足上述全部条件,实际上也难以找到一种万能的技术,一般是针对具体情况选用合适的技术。

### 1.3 铸件挽救工程技术的分类及内容

铸件挽救工程技术主要可分为表面缺陷类和内部缺陷类两大类。

#### 1.3.1 表面缺陷类

常见的铸件表面缺陷如气孔、缩孔、缩松、砂眼、缺肉及裂纹等;铸件及模具在加工过程中发现的缺陷及加工过程中因尺寸超差、局部损伤;以及在使用过程中因磨损及缺损而导致尺寸不合格等缺陷。

铸件表面缺陷修复技术的实质是对缺陷部位的充填,它要求充填后达到一定的强度和硬度,同时要考虑色泽的一致性,根据修复部位的重要性,使用情况等不同,可选择不同的修复方法。主要的修复方法如表 1-1 所示。

应该说明,上述分类决不是绝对的,例如物理化学反应与物理化学-机械反应直至机械结合之间并无严格的界线,但有一点是肯定的,从熔焊→溶解扩散焊→扩散焊→喷涂及刷镀的过程是反应层逐渐浅化的过程,因此连接强度亦逐渐降低。另外,即使是机械镶嵌结合时,随着结合面的贴近亦将逐渐显现出原子之间的物理化学作用。

现对表 1-1 中各类工艺进行一般的说明。

##### (1)熔焊

此法属液相-液相连接法,它是将焊材与基材同时熔化,形成统一的熔池,凝固后形成牢固的连接。例如,电弧焊、气焊等属于此类,其优点是可获得高的连接强度,能量输入密度大,工艺时间短。其不足之处是由于基材熔化,在凝固过程中,由于冷却速度较大而易生成亚稳相,尤其是铸铁材质,熔池与基材界面上因冷速较快而出现一次渗碳体、莱氏体等硬质相,在热影响区则易在冷却过程中出现中温及低温转变的针状组织,如索氏体、贝氏体及马氏体等,其硬度亦较高,造成加工性能恶化。虽然熟练的工艺操作能在一定程度上克服上述缺点,但由于其在原理上的不足而难以获得令人满意的效果,特别是对不同大小、形状及结构的铸件而言,难以找到统一的工艺操作规范。因此在某些场合不允许采用熔焊法修复(例如机床导轨工作面上的缺陷)。

##### (2)溶解扩散连接法

此法属液相-固相连接法,即焊材为液相,基材为固相,基材不需熔化,由于液相在界面上的活化作用,使基材原子迅速向液相焊材中溶解及扩散,在界面上形成溶解扩散层,凝固后即形成高强度接头。此法的特点是由于基材未熔化,不会在冷却过程中形成一次结晶亚稳相,这对铸铁材质更为适合。同时,焊补点的硬度可通过选择焊材的硬度而进行调节,一般在 HB170

~HRC62 之间选择,交界面上的硬度一般为焊材与基材硬度的平均值,界面及热影响区的硬度均可通过对热过程的控制而获得理想的效果。溶解扩散焊焊层的厚度一般在1~500 $\mu\text{m}$ 之间不等,厚度大时连接强度高,厚度小则强度低。对铸钢及灰铸铁而言,其连接强度均可达到或高于基材的强度,其不足之处是输入功率密度受到限制,工艺时间较长,工件变形及应力亦较大。喷熔、高温、中温及低温钎焊过程在界面上均存在扩散过程,故机理上均属于溶解扩散连接。但这种扩散过程将随着基材熔点与钎料熔点之间差距的扩大而削弱。因此,要获得高强度接头,必须根据基材熔点的高低及与钎料的相容性来选择钎料。溶解扩散焊连接法在修复工程中有特别重要的价值。

表 1-1 钢铁件表面缺陷修复技术分类表

| 连接机理        | 充填材料类型     | 充填材料/基材<br>反应特征     | 相应的工艺                         | 特 点                                                      |
|-------------|------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 物理化学作用      | 金 属        | 液相(熔体)<br>/液相(熔体)反应 | 各类熔焊工艺,如电弧焊、气焊、激光焊及粒子束焊等      | 连接强度高,但改变焊区及热影响区组织工件变形大                                  |
|             | 金 属        | 液相(熔体)<br>/固相(固体)反应 | 溶解扩散焊、喷焊、高中温钎焊、液相过渡焊          | 连接强度高 $\rightarrow$ 中,焊区及热影响区组织改变小,工件变形大 $\rightarrow$ 中 |
|             | 金 属        | 固相/固相反应             | 扩散连接如大气、真空或保护性气氛下扩散焊,循环相变连接工艺 | 连接强度中 $\rightarrow$ 低,不改变连接区组织,工件变形小                     |
|             | 金 属        | 液相(溶液)<br>/固相化学沉积   | 电镀、刷镀                         | 连接强度较低,工件不变形                                             |
| 物理化学-机械联合作用 | 金 属        | 液相(熔体)<br>/固相反应     | 等离子及火焰喷涂,低温钎焊                 | 连接强度较低,工件基本不变形或变形小                                       |
|             | 非金属+金属或非金属 | 液相(溶液或胶体)/固相反应      | 粘 接                           | 连接强度较低,工件不变形                                             |
| 机械作用        | 金 属        | 固相/固相作用             | 铆接、塞补镶块等                      | 连接强度高 $\rightarrow$ 中 $\rightarrow$ 低,机械连接               |

### (3) 扩散连接法

扩散连接属固相-固相连接,即焊材及基材均为固相的连接法,此法多用于高技术领域及重要件缺陷的修复,也可实现异质金属或金属-陶瓷材料之间的连接,在进行异类金属或金属-陶瓷连接时,常在界面上放置熔点较低的金属片形成液相活化层,促使连接过程加速,称为瞬时液相连接法(TLP),此法常在真空或惰性气体保护下进行。

### (4) 喷涂

喷涂技术用于机械零件、模具等磨损或加工尺寸超差缺陷的修复已有较长的历史,常见的

有氧-乙炔火焰喷涂、电弧喷涂及等离子喷涂等三种,其中以氧-乙炔喷涂最为常见。其工艺实质是将特定的合金粉末(或熔丝)通过火焰(或电弧)加热,熔化并喷射到待修复的缺陷部位,合金粉末熔化成液滴撞击到基体金属表面而凝固,产生机械粘合,结合强度一般较低,大约只有30~40MPa左右,如为等离子喷涂,则由于等离子焰温度较高而促使基材金属与熔滴间的扩散作用增强,可进一步提高其结合强度。不过,从根本上来说,由于喷涂过程热作用时间较短,喷涂层仍属于物理化学-机械结合的范畴。此法常用于轴、孔类零件表面磨损后尺寸的恢复以及其它耐磨损件尺寸的恢复。为了防止涂层剥落及局部损伤,最好是形成连续、封闭的包覆层,如为非均匀受力状态且承受剪切应力时,此法就不太合适,最好采用喷熔。

#### (5)电刷镀

电刷镀是在电镀的基础上发展起来的,其原理与槽镀完全一致,此法在修复机器零件,特别是大型机件局部磨损缺陷上十分有效。例如,各类滑动及滚动摩擦副表面的磨损、电触点磨损、钎焊焊点磨损及腐蚀等表面缺陷部位的修复。与槽镀相比,其特点为:

- 1)镀层沉积速度快,达槽镀的1~20倍。
- 2)可在现场操作,不用拆卸。
- 3)可准确控制镀层尺寸。
- 4)镀层孔隙率低于槽镀及喷涂。
- 5)工件无变形,金相组织无变化。
- 6)无氢脆现象。
- 7)工艺简单、方便,设备投资低。

此法的缺点是工艺过程较慢,对大面积及大批量修复不太合适,且修复缺陷的厚度较小,一般在0.2mm以下,对铸件及模具半精加工,或精加工后出现的尺寸超差,各类浅层缺陷较合适。

#### (6)激光焊补

激光焊是近年发展起来的一门新兴焊接技术,目前已应用于金属件局部缺陷的修复。其原理是利用激光束将焊接区金属熔化而形成焊缝或焊点,与传统的技术相比,其特点是焊缝的深宽比可达到12或更高,这对修复表面缺陷尤显重要,同时,激光焊还具有熔池净化效应,从而使焊区性能相当于或高于基材。目前,激光焊在焊接领域和挽救工程领域的应用正日渐广泛。

激光焊用于挽救工程中,可以是缝焊(裂纹、断裂等修复)及点焊(小型孔洞类缺陷的修复)。缝焊常用CO<sub>2</sub>或YAG连续激光器,而点焊则常用YAG、红宝石、钕玻璃等脉冲型激光器。

激光焊补最重要的是选择激光工艺参数,由于焊补件缺陷的形式、大小、部位均无一定的规律性,因此应针对具体材料及其缺陷情况选择合理的工艺参数。一般情况下,激光器输出功率、扫描速度、激光束斑直径决定了供应焊区的能量,将直接影响熔池的深度,即焊缝或焊点的熔接深度。

激光焊补的一个重要特点是加热速度和冷却速度均十分迅速而易出现硬化相,因此,其在铸铁焊补领域里的应用尚有一定局限性。对白口铸铁(冷硬铸铁、抗磨铸铁)及高合金抗磨铸铁件上小型点状孔洞类缺陷的修复是较有效的,特别是对精加工后出现的微小缺陷进行修复,由于激光焊加热冷却迅速及热输入总量较小,因此工件不易发生变形及开裂。而对于普通灰铁、球铁件来说,激光焊补后,一般均有硬化相出现,导致加工性能恶化。

表 1-2 列出了不同材料激光焊接或焊补时的工艺参数。

表 1-2 不同材料激光焊或焊补时的工艺参数

| 材 料   | 激光功率<br>(kW) | 焊接厚度<br>(mm) | 焊接速度<br>(m/min) |
|-------|--------------|--------------|-----------------|
| 不 锈 钢 | 1.2          | 1.9          | 2               |
|       | 1.0          | 0.6          | 3               |
| 碳 钢   | 1.0          | 1.5          | 1.5             |
|       | 1.0          | 0.1          | 50.8            |
| 铝     | 1.8          | 1.5          | 1.4             |
| 硅青铜   | 1.2          | 1.5          | 1.5             |
| 球 铁   | 1.2          | 1.5          | 1.5             |
|       | 1.2          | 0.3          | 40              |
| 灰 铁   | 1.2          | 1.5          | 2.0             |
|       | 1.2          | 0.3          | 50              |

#### (7) 粘接技术

粘接是用粘合剂将两个零件连接在一起,并使结合处具有足够强度的工艺。此法最早被用于竹木器具的粘合。随着粘合剂的不断更新和发展,现已普遍用于各个工业部门,如汽车、造船以及航空航天设备结构件的连接。

与其它连接方法相比,粘接具有如下特点:

1) 粘接件的应力小、分布均匀,与焊接、铆接等方法相比,其理论应力集中系数的相对值为:粘接 1,铆接 2~3,焊接 6~8;

2) 工艺简单,不用高温加热,工件无变形;

3) 不受被粘材料类型及结构的限制,可对不同材料、不同形状的零件进行粘接。

当然,这一工艺也有其缺点,当使用有机粘合剂时,其耐高温性能较低,不超过 300°C,且随着时间的延长而易老化。无机粘接剂虽然可克服上述缺点,但粘接强度一般较低。

在挽救工程中,粘接工艺常用于断裂部位的粘合、裂缝及各类孔洞的填补,通常是将粘合剂与金属粉末调成胶状物敷于缺陷处并固化,由于其连接强度尚不能达到金属基材的强度以及在硬度、色泽、老化等方面的问题,一般常用于非加工表面及非外露缺陷的修复。

#### 1.3.2 内部缺陷类

内部缺陷主要包括缩孔、缩松、组织疏松、组织不合格及内部气孔等。这些缺陷常导致力学性能不合格、加工报废以及渗漏等弊病。特别是汽车发动机缸体、缸盖以及阀门类铸件常需进行耐压试验,渗漏问题就显得比较突出。

针对上述缺陷,其相应的修复方法主要有以下几种:

##### (1) 浸渗

按照铸件渗漏的情况可采用局部浸渗及整体浸渗。

局部浸渗法常用于已知特定部位渗漏的工件,只需对该部位进行处理即可修复,工艺较简单,浸渗剂耗量少,尤其是在一些大型装备或不易拆卸的固定设备修复上。

局部浸渗法常用刷涂法、注射法、浸涂法以及局部加压浸渗等方法,使渗漏毛细管封闭,从而达到防漏的目的。

整体浸渗法是将工件整体浸入浸渗液中,在常压、加压、真空、真空加压等情况下对渗漏毛细管进行封闭而达到防漏的目的。

### (2) 内部气孔的修复

内部气孔与外部气孔无严格界线。例如,皮下气孔可以看作外部气孔,在抛丸或粗加工后即已暴露,有些内部气孔在精加工后暴露,有些是精加工后亦未暴露,但用超声波或射线探伤时可发现气孔的存在,若影响其使用性能或力学性能时需加以修复,对暴露的气孔一般较易处理,前面已经谈到,对内部气孔,则必须用工具将其暴露,然后进行修复。

### (3) 组织不合格的挽救

组织不合格主要包括金相组织不合格、石墨组织粗大、偏析及反 $\square$ 口等,此类缺陷主要着重在预防,如果一旦出现,也可通过热处理等方法加以解决。

## 1.3.3 铸件缺陷的成因及预防

内部缺陷包括气孔、缩松、疏松及裂纹等方面。实际上,在铸件中常存在这类缺陷,如果不进行探伤检验或水压试验,则很难发现。对这类缺陷的修复需进行具体分析,一般说来,可以用真空或压力浸渗法加以修复。但对于重要结构件及食品、医疗器械用输送泵等亦不允许进行浸渗修复。

组织不合格也属内在缺陷。它包括白口、反白口、渗碳体含量过高,各类组织的比例不当,可锻铸铁一、二阶段石墨化不完善等。在某些情况下,这类缺陷亦可进行挽救。

### (1) 气孔及针孔

气孔按其形成原因可分为析出性气孔、侵入性气孔及反应性气孔三类。

析出性气孔是金属液在凝固过程中,随着其温度的降低而使各类气体的溶解度降低,然后析出而形成气孔,是属于纯物理过程。这类气孔多以细小圆形或椭圆形存在,亦有以密集形针状存在的。由于氢和氮为还原性或中性气体,气孔表面不易氧化,故气孔表面均光滑而明亮。

侵入性气孔的形成原因是由于型(芯)壁受高温而使水分蒸发,或粘结剂分解等而产生气体。当相互作用层背压升高,排气阻力大时,渗入金属液内部而形成气孔。这类气孔大多分布于皮下,尺寸较大,呈椭圆形,孔壁光滑,表面发暗。

反应性气孔是有金属液内部或金属液与铸型(芯)界面发生化学反应而形成的气孔,实际上也可列入析出性气孔之列。这些气孔大多呈针状弥散分布,与型壁反应而生成的皮下气孔较多见。

综合上述各类气孔形成的原因,可归纳为以下几点:

- 1) 炉料潮湿、锈蚀、油污夹砂严重时,容易使金属液内气体增加。
- 2) 冲天炉熔炼时,送风量过大,造成氧化严重时。
- 3) 铁水化学成分不当,例如含铝及钛量过高时,易生成氢气针孔, Si 量过高时(高硅铸铁),可减少氧含量,但易出现氢气孔。
- 4) 型砂水分过高,透气性差时。

5)型砂粘结剂(树脂等)分解产生气体较多,且发气时间及峰值在金属液结壳之前。

6)涂料中含有较多发气物质。

7)型芯未烘干或存放时间过长而回潮。

8)浇注系统不合理,气体不易排出,或造成紊流而卷入气体。

9)浇注温度不当,过高则使界面发气速度增大,且金属液本身含气量增大,易形成气孔;过低则使气泡不易上浮至液面而形成气孔,故浇注温度要适当。

预防气孔的方法是针对原因采取相应措施。据许多学者的研究,气孔的形成是许多因素综合作用的结果,它贯穿于整个工艺过程。因此,需要对熔炼与工艺等各个环节加以控制,而不能忽视某一方面。例如,当冲天炉熔炼时,铁水含N量一般为70ppm,含O量一般为30ppm,则铸型中水分(指砂铸)达到1200ppm时,即出现气孔的临界值;而用感应炉熔炼时,铁水中含N量一般为100ppm左右,含O量为10ppm,则铸型水分含量达到900ppm时,即为出现气孔的临界值。而树脂砂则又将因树脂的含氮量、发气速度及时间等因素的不同而影响气孔的形成。目前,对气孔的预防已有许多专门的研究,例如对易形成侵入性气孔的树脂砂型,可采用一种在发气量达高峰时能形成玻璃体的涂料,以使发出的气体不能进入金属液的表层,从而避免形成气孔。

## (2)缩孔及缩松

缩孔及缩松统称收缩缺陷,是由于液体金属在凝固及冷却过程中的收缩而引起的。

缩孔的特征为形状不规则的封闭或敞开的孔洞,孔壁粗糙并呈现树枝晶,常出现于最后凝固的热节部位。

缩松是在铸件断面上出现的分散性细小缩孔。在放大镜下可观察到,有时在研磨后出现色泽不均的小黑点(俗称苍蝇脚)。此外,还有一种更小的缩松称为显微缩松,它存在于枝晶间,需用显微镜才能发现。

收缩缺陷的形成原因主要有:

1)合金液在凝固过程中的收缩较大,这取决于合金本身的液态收缩及凝固收缩量以及浇注温度。浇注温度过高,则收缩总量较大,易形成缩孔,但若过低,则又易形成缩松。

2)铸件模数大,凝固时间长,易形成收缩缺陷,壁厚不均易于在热节处形成缩孔及缩松。

3)浇注系统的配置不当,如为顺序凝固,则易于将缩孔移至冒口,如为同时凝固,则易于形成分散性缩松。当然,有些铸件不要求进行探伤检验或水压试验,则只需将缩孔及缩松控制在远离加工面的部位。

4)铸铁中磷含量偏高时,形成低熔点磷共晶的偏聚,且在最后凝固部位得不到补缩,易形成缩松。

5)铸型导热能力差时(干模),易形成收缩缺陷。

6)铸型刚度差时,铸铁在石墨化膨胀阶段导致铸型胀大,易形成收缩缺陷。

7)合金过度变质,导致糊状凝固倾向增大,容易形成显微缩松或疏松。

8)溶解于金属液中的气体过多,容易在凝固时析出而形成气缩。

收缩缺陷不但取决于工艺因素,而且取决于材质的成分、过热度及变质情况等因素。例如近共晶成分的铸铁易于进行层状凝固,从而倾向于形成集中缩孔,而亚共晶成分铸铁,按亚稳系凝固的白口铁、合金铸铁等,则易于进行糊状凝固,倾向于形成缩松。

与气孔一样,解决收缩缺陷的途径亦应首先找到出现缺陷的主要原因,然后采取相应措施。

### (3)冷隔及裂纹

冷隔多出现于金属液充填的交汇处,未能很好熔合而形成交汇处连接不严密的痕迹。其主要原因是:

- 1)金属液浇注温度偏低。
- 2)金属液化学成分不当,导致流动性差。
- 3)浇注速度太慢。
- 4)浇注系统尺寸及配置不当,液流不畅顺。
- 5)铸件结构不合理。
- 6)铸型排气不良造成气阻。
- 7)冷铁、芯撑等尺寸和位置不当,导致金属液激冷而后过早凝固。

裂纹缺陷有冷裂、热裂及热处理裂纹等三种类型。

冷裂是铸件冷却到弹性状态时,铸件某部位的收缩受到铸型或其它部位的阻碍而形成拉应力,当此拉应力超过该温度下材质的强度极限时而发生断裂。这类断裂常为穿晶断裂,断口有光泽,呈浅褐色。导致冷裂的原因主要有:

- 1)金属液成分不当,例如,铸铁中含磷量高,低熔点磷共晶在铸件进入弹性状态时强度较差,导致断裂。
- 2)铸件结构设计不当,壁厚悬殊,在冷却过程中产生较大的结构应力。
- 3)浇注系统设计不当,造成铸件各部分温差悬殊。
- 4)铸件中有夹渣、气孔、缩孔等缺陷,造成应力集中。
- 5)铸件本身有较大残余应力,在清理或运输过程中受到冲击而突然开裂。
- 6)铸件型芯退让性差。

其中最重要的是铸件的结构设计要合理,尽量减少各部位冷速的差异,同时,在冷却过程中进行控制,如厚大部位提前出砂等措施。

热裂是在铸件凝固的后期(大部分基体金属已凝固,少数低熔点夹杂物未凝固)或凝固后不久的弹塑性状态时收缩受到阻碍而使铸件开裂的现象,常见于铸件内部,一般在最后凝固部位产生,由于其温度较高,断口常氧化成黑色,多为沿晶断裂。热裂的主要原因可归结为:

- 1)铁水中含硫、磷等杂质元素过高。
- 2)铸件结构设计不当,壁厚悬殊,结构应力较大。
- 3)浇注系统设计不当,影响收缩。
- 4)铸型及型芯退让性差。
- 5)合金收缩量大。
- 6)工艺筋、冷铁等安排位置不当。

热裂与冷裂的原理相似,主要差别是铁水中含硫高易产生热裂,含磷高则更易产生冷裂。其它工艺的影响基本相同。

热处理裂纹是铸件在热处理过程中产生的裂纹,这些裂纹可能原先已存在于铸件中,在加热时进一步长大而显露出来,有些是由于热处理本身工艺制度不合理而造成的,其原因可归结为以下几点:

- 1)热处理时加热速度过快,尤其是高合金铸铁,当加热速度过快时,相变应力、热应力等综合作用叠加值超过该温度下的强度时即开裂。

2) 淬火温度过高或冷却速度过快时, 或经淬火而未及时回火等均易导致裂纹。

3) 由于铸件本身结构及工艺等原因而形成较大的残余应力时也易出现裂纹, 有时在受到振动或搬运时即开裂。

4) 铸件中存在宏观缺陷, 如气孔、缩孔、缩松夹杂物等, 当缺陷形状不规则时, 亦造成应力集中而形成预裂纹。

5) 铸件中存在微观缺陷如显微缩松、晶粒粗大及元素偏析等情况而引起。

6) 热处理铸件位置放置不当时。

在大多数情况下, 裂纹的出现是以上诸因素联合作用的结果。防止的办法是控制金属液的成分、合理的铸件结构设计及工艺设计, 选择合理的热处理规范、减少铸造缺陷等。

(4) 组织及性能不合格的种类及预防

组织及性能不合格是由于金属液的化学成分、金属液熔炼、处理工艺以及造型凝固工艺等综合作用的结果。其中以化学成分的控制为最主要因素。铸件常见的组织及性能不合格类型有以下几种:

1) 可锻铸铁退火后组织及性能达不到要求。这类缺陷可通过调整化学成分、铁水后续处理工艺等的控制来避免。如果含铬量或某些激冷倾向元素偏高, 则可通过调整热处理工艺制度进行挽救。当然, 这些元素的含量亦应有一定的限度。

2) 灰铁、球铁、可锻铸铁的反白口组织, 其特征是出现局部白口, 或外部灰口内部白口的反常组织, 其原因有:

a. 在球铁中, 常由于稀土残留量偏高, 碲、砷、锑、铬等含量偏高等情况, 由于成分局部偏析而导致局部白口组织。

b. 在可锻铸铁中则常由于锰硫比不合适而引起。  $Mn < 1.7S + 0.3$  时易引起。

c. 在灰铁中则常易产生表层灰口内部白口形式的反白口组织, 其主要原因是铁水激冷倾向过大, 抑制其成核, 而型壁起外来成核的作用, 故形成表面灰口层, 内部则因来不及成核而生成白口。其激冷倾向过大来自两个方面: 一是铁水化学成分不当, 激冷元素及氢等含量偏高; 二是铁水在感应炉中熔炼时长期保温, 导致核心数量急剧减少, 故感应炉铁水易出现反白口。对此类缺陷的预防可通过对成分及熔炼工艺的控制加以解决。如已经出现, 在某些情况下, 可通过热处理的方法加以挽救。

3) 石墨及晶粒组织粗大, 其主要原因是铁水碳含量过高、熔炼温度过低、冷速缓慢等原因造成, 可针对上述问题进行控制。此类缺陷一经出现就无法挽救。

4) 偏析。偏析有宏观和微观两种情况。导致局部地区组织不均匀, 在非铁金属中如锌铝合金、锡青铜等中较常见。一种类型是溶质元素与溶剂元素比重差较大, 易导致层状比重偏析; 另一种类型是在非无限固溶情况下, 元素的溶解度随温度变化而改变, 使其在先结晶相中含量较高, 后结晶相中含量较低, 造成局部微区偏析, 可针对其形成原因加以控制。一旦出现, 则比重偏析已不能挽救。微区成分偏析有时可通过均匀化退火挽救。

5) 铸态球铁中渗碳体含量过高或基体组织含量不适, 可通过调整铁水化学成分、处理工艺等解决。一旦出现, 可用热处理方法进行挽救。

此外, 球墨铸铁中还常有球化不良、球化衰退、石墨飘浮等缺陷。这类缺陷一旦出现, 则无法挽救, 只有通过调整铁水化学成分及严格的工艺控制加以解决。

## 第2章 金属学基本知识

### 2.1 金属的结构

金属的性能取决于金属的内部结构,具有不同内部结构的金属材料,其物理及力学性能有显著差别。

#### 2.1.1 金属的晶体结构

固态下的金属,其内部的原子呈规则的周期性排列,且每种金属都有自己的排列形式。金属晶体具有固定的熔点,如铁(Fe)的熔点为  $1538^{\circ}\text{C}$ ;铜(Cu)的熔点为  $1084^{\circ}\text{C}$ ;铝(Al)的熔点为  $660.4^{\circ}\text{C}$ 。在同一晶体内部的不同方向上,其性能是不同的,即金属晶体具有各向异性的特点。

金属晶体的原子结合形式是属于金属键结合,当大量金属原子聚合在一起时,绝大部分金属原子都将失去其最外层的价电子而成为正离子,并按照一定的几何形状呈规则排列,在固定的位置作高频热振动。而所有价电子则以自由电子的形式,在各正离子间自由运动,并为整个金属共有,形成所谓“电子云”。金属这种依靠各正离子与公有自由电子间的相互作用(吸引与排斥)而结合在一起的方式,就称为“金属键”。

绝大多数金属的晶体结构属于常见的体心立方、面心立方和密排六方三种类型,如图 2-1 所示。

实际金属通常都是多晶体,即由大量具有相同晶体结构,但方向各异的晶粒组成。晶粒的结构、性质、尺寸大小就决定了金属的性能,由于各个晶粒取向的任意性,因此,多晶体金属具有各向同性的特点。

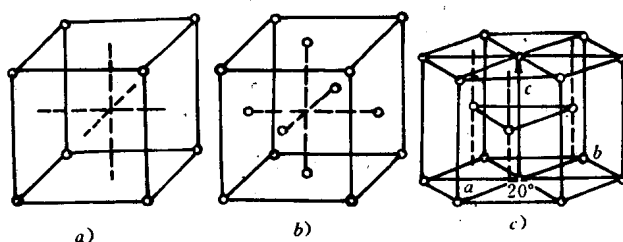


图 2-1 常见的金属点阵形式

#### 2.1.2 同素异构转变

a)体心立方点阵 b)面心立方点阵 c)密排六方点阵

大多数金属由液态转变为固态后,在继续冷却过程中,晶体结构不发生变化。但某些金属在固态条件下,随温度的变化,其晶体结构将发生变化。固态金属随温度的改变由一种晶体结构转变为另一种晶体结构的变化,称为同素异构转变。以铁为例,纯铁在  $1538^{\circ}\text{C}$  时凝固成体心立方晶格的  $\delta\text{-Fe}$ ,继续冷却到  $1394^{\circ}\text{C}$  时,体心立方晶格的  $\delta\text{-Fe}$  转变为面心立方的  $\gamma\text{-Fe}$ ,再继续冷却到  $912^{\circ}\text{C}$  时,面心立方的  $\gamma\text{-Fe}$  又转变为体心立方的  $\alpha\text{-Fe}$ ,随后继续冷却,晶体结构不再变化。

同素异构转变时,由于晶体结构的变化将引起体积的变化。例如,从 $\gamma$ -Fe 转变到 $\alpha$ -Fe 时,体积膨胀约 1%。由于同素异构转变在较低温度的固态下发生,少量的体积变化往往产生较大的内应力,可能造成金属零件的变形甚至开裂。

应当指出,正是由于铁中含有大量的碳,才有可能对钢铁进行热处理,获得具有不同性能的组织。

### 2.1.3 晶体缺陷

实际金属的晶体结构是不完整的,内部存在着各种各样的晶体缺陷(包括点缺陷、线缺陷和面缺陷)。

点缺陷是指晶体中原子的排列出现空位或间隙现象。缺陷周围的晶格将发生畸变,产生一定的应力。

线缺陷是指晶体中原子出现成排的错位,即位错。位错周围的晶体,原子排列紊乱,晶格发生畸变。由于受应力作用,位错处原子能量较高。

面缺陷是指多晶体中的晶界和亚晶界,即不同取向晶粒的界面。晶界处的原子排列要适应两晶粒间不同晶格取向的过渡,总是不规则的。因此,晶界的原子处于畸变状态,具有较高的能量。

### 2.1.4 合金的相结构

合金是由两种或两种以上的金属元素或金属元素与非金属元素熔合在一起的晶体材料。由于组成合金的各元素的相互作用,会形成各种相,而构成合金的组织。

合金中的相是指合金中具有相同化学成分、相同结构和原子聚集状态的均匀部分。合金中各组成相的数量、大小、形状及其性能就决定了合金的性能。

#### 1. 固溶体

固溶体是指溶质原子溶入溶剂晶格中并保持溶剂晶格类型的一种金属晶体。如钢和铸铁中的铁素体就是碳在 $\alpha$ -Fe 中的固溶体。

根据溶质原子在溶剂晶格中所占据的位置,可将固溶体区分为置换固溶体和间隙固溶体两类,如图 2-2 所示。

置换固溶体的结构特点是:溶质原子占据了溶剂金属晶格中原来属于溶剂原子的位置,并保持溶剂金属的晶格类型,但晶格常数有所变化,若溶质原子的直径较大,则固溶体晶格常数变大;反之,则变小。

若溶质原子在溶剂金属晶格中呈任意的、无规律的分布,则形成无序固溶体;若溶质原子和溶剂原子各占据溶剂晶格的一定位置,即原子呈有序分布,则形成有序固溶体。

通常溶质原子在溶剂金属晶格中的溶解度有一定的限度,所形成的固溶体称为有限固溶体。但某些二元合金如 Fe-Cr、Fe-V、W-Mo、Cu-Ni 等,各组元能以任意比例互相溶解,即溶质原子与溶剂原子之间能无限互溶,这种固溶体则称为无限固溶体。

当溶质原子的直径很小,与溶剂原子直径的相对差别很大,则溶质原子不能置换溶剂金属晶格中的原子,而是分布到溶剂金属晶格的某些空隙位置,这样形成的固溶体就是间隙固溶体。

由于溶剂金属晶体结构中的空隙有一定的限度,而且随着间隙原子的溶入,晶格将发生畸