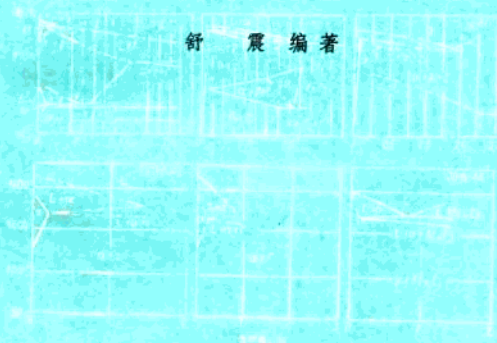


Naire Zhutie

耐热铸铁

舒 震 编 著



湖南大学出版社

TG143

9

3

8477107

耐热铸铁

舒震 编著

HEAT-RESISTANT CAST IRONS

by SHU ZHEN

湖南大学出版社

HUNAN UNIVERSITY PRESS

B 551320



耐 热 铸 铁
舒 震 编 著
责任编辑 张立中

☆

湖南大学出版社出版发行
(长沙岳麓山)

湖南省新华书店经销 湖南大学印刷厂印装

☆

850×1168 32开 14.375印张 346千字

1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷

印数 0001—2000 册

ISBN 7-314-00366-1/FG·3

定价：5.80 元

080

3



前 言

现代工业技术的发展，要求许多零件在高温、高压、高速和急剧变化的外部条件下工作。为满足这一要求，就要开发各种新材料。这些材料不仅要具有高的强度，而且要具有某种特殊性能。对于在高温下工作的零件，要求具有抗氧化起皮性、热强性。这类零件如果用不耐热的材料（普通钢或铸铁）来制造，在工作不长的时间（例如数十小时）后，就可能失效，以至使整个部件或设备发生破坏，造成很大损失。因此，耐热材料的研制问题，对于现代工业技术的发展具有极为重要的意义。

满足工业上对耐热材料日益增长需求的主要途径之一，是研制并推广各种优质的耐热铸铁。耐热铸铁件的制造简便易行、成本低廉，且铸件的性能多种多样，这就为铸铁在各工业部门的应用开辟了广阔前景。

根据零件的工作条件（温度、气体介质的特性、加热冷却的循环性，所承受的负荷等），高温下工作的铸铁应具有良好的抗氧化性、抗生长性及热强性。此外，由于大多数铸件都需进行机械加工，所以，铸铁除了具有良好的铸造性能外，还应具有满意的加工性能。要获得完全满足上述各项性能要求的耐热铸铁，是一项相当困难的任务。

近年来，国外在耐热铸铁生产的理论和实践方面取得了新的进展。对耐热铸铁的失效（如氧化、热疲劳）机理有了进一步认识，并研究出能与镍铬耐热合金钢相竞争的一些新的耐热铸铁。不过，耐热铸铁的理论与应用仍落后于耐热钢，阻碍了耐热铸铁在工业上的广泛应用。为改变这种状况，迫切要求应用现代固体物理和金属学理论，对耐热铸铁进行深入研

究，搞清其高温失效机理、掌握高温使用性能、改进熔炼铸造工艺、并研制出新的耐热铸铁以适应生产发展的需要。

近年来国内耐热铸铁的生产与研究也有较大发展，但与我国社会主义现代化建设的发展形势仍很不相适应。耐热铸铁的品种有限、产量不大且质量不稳定。造成这种状况的原因很多，缺乏各种耐热铸铁的熔炼、铸造工艺与性能资料，不能说不是一原因之一。事实上，至今国内尚未见到全面论述耐热铸铁的专著。

本书综合了国内外有关耐热铸铁的文献资料，对铸铁耐热性的基本理论、耐热性的测定方法以及各种耐热铸铁的化学成分、组织性能及熔铸工艺进行了较全面的阐述。最后，为了合理选择与正确应用耐热铸铁，还对各种铸铁的耐热性进行了比较，说明了选用耐热铸铁时所需考虑的因素及各种耐热铸铁的应用范围。作者希望，本书能引起金属材料，特别是铸造领域的工程技术人员、科学研究工作者对耐热铸铁的研究与扩大应用问题的重视，并将有助于耐热铸铁的合理选用及其熔铸工艺的正确制订。

目 录

第 1 章 铸铁耐热性的基本理论

§ 1-1 概论	(1)
一、铸铁在高温下的破坏	(1)
二、耐热铸铁的分类	(2)
§ 1-2 耐热性的试验方法	(3)
一、抗氧化性、抗生长性的试验方法	(4)
二、其它类型的高温试验	(16)
§ 1-3 金属氧化的一般原理	(27)
一、金属氧化反应的热力学	(27)
二、金属氧化的动力学	(37)
三、保护性氧化膜的形成	(44)
§ 1-4 铸铁的抗氧化性	(51)
一、铸铁中石墨氧化的热力学	(51)
二、铸铁氧化的动力学	(54)
三、影响铸铁抗氧化性的内因	(58)
四、影响铸铁抗氧化性的外因	(66)
§ 1-5 铸铁的抗生长性	(71)
一、铸铁生长的机理	(71)
二、影响铸铁抗生长性的内因	(75)
三、影响铸铁抗生长性的外因	(90)
§ 1-6 铸铁的高温机械性能	(94)
一、短时高温机械性能	(94)
二、蠕变与持久强度	(97)
三、热疲劳	(108)

第2章 普通铸铁及低合金铸铁

§ 2-1 灰铸铁	(121)
一、室温机械性能与物理性能	(121)
二、高温机械性能	(130)
三、抗氧化、抗生长性	(142)
§ 2-2 可锻铸铁	(147)
一、室温机械性能与物理性能	(147)
二、高温机械性能	(150)
三、抗氧化、抗生长性	(160)
§ 2-3 球墨铸铁	(161)
一、室温机械性能与物理性能	(161)
二、高温机械性能	(166)
三、抗氧化、抗生长性	(176)
§ 2-4 蠕墨铸铁	(179)
一、室温机械性能与物理性能	(180)
二、高温机械性能	(182)
三、抗氧化、抗生长性	(191)
§ 2-5 普通白口铸铁	(192)
一、机械性能与物理性能	(192)
二、抗氧化、抗生长性	(193)

第3章 中 硅 铸 铁

§ 3-1 硅对铸铁组织的影响	(195)
一、Fe—Si及Fe—C—Si状态图	(195)
二、硅对Fe—C状态图的影响	(199)
三、中硅铸铁的结晶过程和组织特点	(203)
§ 3-2 中硅灰铸铁	(205)
一、化学成分与机械性能、物理性能	(205)
二、高温机械性能	(208)

三 抗氧化、抗生长性·····	(212)
四、中硅灰铸铁的补充合金化·····	(215)
§ 3-3 中硅球墨铸铁 ·····	(217)
一、化学成分与机械性能、物理性能·····	(218)
二、高温机械性能·····	(221)
三、抗氧化、抗生长性·····	(224)
四、硅铝球铁与硅铝铝球铁·····	(229)
§ 3-4 中硅铸铁的熔炼与铸造工艺 ·····	(242)
一、熔炼工艺·····	(242)
二、铸造性能·····	(243)
三、铸造工艺特点·····	(248)
四、铸造工艺举例·····	(250)

第 4 章 铝 铸 铁

§ 4-1 铝对铸铁组织的影响 ·····	(259)
一、Fe—Al状态图·····	(259)
二、Fe—Al—C 状态图 ·····	(261)
三、铝对Fe—C状态图的影响·····	(265)
四、铝对铸铁结晶过程的影响·····	(267)
五、铝铸铁的组织图·····	(269)
§ 4-2 第一石墨带铝铸铁 ·····	(272)
一、化学成分与机械性能、物理性能·····	(272)
二、高温机械性能·····	(279)
三、抗氧化、抗生长性·····	(286)
四、中铝铸铁的合金化·····	(291)
§ 4-3 第二石墨带高铝(18—28%Al) 铸铁·····	(302)
一、高铝灰铸铁·····	(302)
二、高铝球铁·····	(307)
§ 4-4 中间带及碳化物型高铝铸铁 ·····	(311)
一、中间带高铝(8—18%Al) 铸铁 ·····	(311)

二、碳化物型高铝铸铁 (Pyroferal)	(312)
§ 4-5 铝铸铁的熔炼与铸造工艺	(315)
一、熔炼工艺	(315)
二、铸造性能	(320)
三、球化处理	(324)
四、铸造工艺特点	(329)
五、铸造工艺举例	(330)

第5章 铬 铸 铁

§ 5-1 铬对铸铁组织的影响	(338)
一、Fe—Cr 状态图	(338)
二、Fe—Cr—C状态图	(339)
三、铬铸铁的组织	(344)
§ 5-2 低铬铸铁	(346)
一、化学成分与机械性能、物理性能	(346)
二、高温机械性能	(350)
三、抗氧化、抗生长性	(353)
四、熔炼与铸造工艺	(355)
§ 5-3 高铬铸铁	(357)
一、化学成分与机械性能、物理性能	(357)
二、高温机械性能	(363)
三、抗氧化、抗生长性	(369)
四、高铬铸铁的补充合金化	(371)
五、熔炼与铸造工艺	(375)

第6章 奥 氏 体 铸 铁

§ 6-1 镍对铸铁组织的影响	(379)
一、Fe—Ni 与 Ni—C 状态图	(379)
二、镍对 Fe—C 状态图的影响	(381)

三、镍铸铁的组织.....	(383)
§ 6-2 奥氏体灰铸铁	(384)
一、纯高镍铸铁.....	(384)
二、高镍耐蚀铸铁 (Ni—Resist)	(385)
三、镍硅铬铸铁.....	(391)
§ 6-3 奥氏体球铁	(394)
一、纯高镍球铁.....	(395)
二、高镍耐蚀球铁.....	(397)
三、镍硅铬球铁.....	(406)
§ 6-4 奥氏体铸铁的熔炼与铸造工艺	(413)
一、熔炼工艺.....	(413)
二、铸造性能与铸造工艺特点.....	(416)

第 7 章 铸铁耐热性的比较与耐热铸铁的选用

参考文献	(431)
附 录 国外耐热铸铁标准	(438)

第1章 铸铁耐热性的基本理论

§1-1 概 论

一、铸铁在高温下的破坏

在现代机器设备中，许多零部件都是在高温及腐蚀性介质的作用下工作的。在这类条件下工作的铸件，如炉栅、渗碳罐、熔化用坩埚、加热炉底板、金属型、钢锭模、热交换器、轧辊及玻璃模具等，常因形成氧化皮、发生生长及形成裂纹而破坏。

高温下金属氧化是常见现象。金属在腐蚀性介质中发生高温腐蚀，一部分金属转变为氧化皮。氧化严重时将引起零件的失效。

在高温下工作时，铸铁件还会发生特有的一种不可逆体积增大过程，并同时发生翘曲、龟裂，甚至完全破坏。这种体积膨胀称为生长，其值通常可达5—12%，有时甚至达到30—50%。铸铁发生生长时还伴随着机械性能的急剧降低，因此，对于在高温下工作的铸铁件，抗生长性与抗氧化性同样重要。

对于高温下承受载荷的零件，还应具有较高的高温机械性能。低于400—450℃时，铸铁的强度随温度变化不大。温度更高时，不仅铸铁短时强度急剧下降，而且还会发生蠕变现象，使得铸铁在长时间内承受载荷时的破坏应力（持久强度）比短时强度要低得多，例如，540℃短时抗拉强度为160MPa的铸铁，在持久试验中，当应力值为30MPa时即发生破断。

对于循环加热冷却或温度急剧变化的零件，由于高温下的氧化生长与组织转变过程会使铸铁的强度急剧降低，在循环热应力的作用下将在铸件中产生疲劳裂纹。因此，这类零件不应

具有较高的热疲劳或热冲击抗力。

二、耐热铸铁的分类

耐热铸铁按其抗氧化性和抗生长性的高低，可分为五级（表1）。通常对铸铁耐热性的要求是：在试验温度（工作温度）下加热150小时后试样的生长率小于0.2%，氧化增重的平均速度小于0.5克/(米²·小时)。

表1-1 耐热铸铁的耐热性分级

耐热性等级	耐热性特点	150小时加热试验结果	
		平均氧化增重速度(克/米 ² ·小时)	生长率(%)
1	高耐热性	<0.1	<0.05
2	较高耐热性	0.1—1.0	0.05—0.15
3	中等耐热性	1.0—3.0	0.15—0.50
4	较低耐热性	3.0—10.0	0.50—1.50
5	低耐热性	>10.0	>1.50

耐热铸铁按其化学成分可分为以下六类：

1. 非合金铸铁。
2. 低合金铸铁。
3. 硅铸铁（4—7%Si）。
4. 铝铸铁（4—7%Al，20—30%Al）。
5. 高铬铸铁（15—35%Cr）。
6. 奥氏体铸铁（20—30%Ni、6%Cr、≤6%Si）。

非合金及低合金铸铁，由于耐热性不高，仅适用于工作温度不高（450—700℃）的场合。作为耐热材料，广泛应用着各种中、高合金铸铁。

中硅耐热铸铁分为中硅灰铸铁及中硅球铁。中硅灰铸铁一般应用于不受冲击和工作温度低于800—900℃的加热炉零

件。中硅球铁由于石墨的球化，机械性能及耐热性均明显提高，使用温度可达到900—950℃。

铝铸铁又可分为中铝铸铁（4—7%Al）及高铝铸铁（20—30%Al）。中铝铸铁的最高使用温度为900℃。高铝铸铁的使用温度达到1000—1200℃。高铝铸铁可进行球化处理以改善其机械性能和耐热性。

高铬铸铁具有白口组织，根据含铬量的不同，其基体组织可以是马氏体（12—18%Cr）或铁素体（30—34%Cr）。高铬铸铁的抗氧化性和耐磨性很好，但塑性、韧性较差。高铬铸铁的使用温度与含铬量有关，含Cr 15—25%时为900—1000℃，含Cr 29—35%时为1050—1150℃。

奥氏体铸铁既有良好的室温性能，又有优良的高温性能，属于热强材料。广泛应用的一种奥氏体灰铸铁是含Si 4.5—5.0%的高镍铸铁（Nicrosilal）。这种铸铁不仅具有良好的耐热性，同时又有一定的韧性，其最高使用温度为950—1000℃。经球化处理的奥氏体铸铁具有更好的机械性能和耐热性。

§1-2 耐热性的试验方法

铸铁的耐热性并不是一种绝对性能指标，而与铸铁的工作条件（工作温度、介质特性、加热与冷却速度等）有密切关系。例如，某些合金在一定条件下是充分耐热的，而在另外的条件下则可能损坏严重。通常进行耐热性试验的目的，实际上都是要确定铸铁在一定工作条件下的使用寿命，因此，耐热性试验方法的选择与铸件的工作条件及失效形式有关。由于铸件的工作条件及其失效形式的多样性，就决定了耐热性的测定方法及所采用的试验研究手段的多样性。为了评定铸铁的耐热性，可以进行以下两类试验：

1. 实验室试验, 其试验条件应尽可能接近于铸件的使用条件。

2. 实际使用试验, 将试件装在生产设备上进行试验。

在实际使用条件下, 由于工作制度很难严格控制、试件的检测也较复杂, 故所获得的数据往往不很精确, 有时试验结果甚至完全丧失可靠性。最合理的办法是首先通过实验室试验来选择材料, 确定出有关铸铁在使用条件下的耐热性, 在实验室研究的基础上进而再对试验铸件进行现场装机试验。

一、抗氧化性、抗生长性的试验方法

1. 抗氧化性的测定方法

测定材料抗氧化性的方法有两类: 定量法与定性法。采用定量法研究氧化过程, 是要确定铸铁的氧化速度与温度、时间及介质的氧化特性之间的关系。借助这种试验方法通常可以迅速解决耐热铸件的实际选材问题。用定性法研究氧化过程, 则要揭示金属在气体腐蚀作用下的破坏机理。显然, 为了清楚认识铸铁的抗氧化性, 上述两类方法是缺一不可的。

(1) 定量法

最方便的定量评定金属抗氧化性的方法是称重法。这种方法所需的基本仪器设备是加热炉和感量 0.1mg 的分析天秤。称重法又有定期称重与连续称重之分。定期称重法是将试样称量后放入加热炉内试验, 经过规定时间后取出冷却, 再进行称量。单位时间内试样单位表面积的重量变化 ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) 即可作为抗氧化性的定量指标^[1]。

$$W = \frac{G_2 - G_1}{\tau \cdot S}$$

式中 W ——单位时间、单位表面积的重量变化 ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$);
 G_1 、 G_2 ——分别为试验前后试样的重量 (g);
 τ ——规定的试验时间 (h);

S ——试样表面积(m^2)。

称重法又有两种不同的做法：按试样的重量增加值或重量减小值来评定金属的抗氧化性。按照试样的氧化增重来评定抗氧化性没有什么困难。试样从炉内取出，冷至 100°C 后放入干燥器内，待试样完全冷却后在分析天平上称重。这种方法特别适用于在非封闭式大气气氛加热炉内测定金属的抗氧化性。不过，采用这种方法时必须采取措施防止氧化皮的损失。由于金属与氧化皮的膨胀系数大多不同，故冷却时氧化皮发生龟裂，甚至部分脱落。对于高合金镍铬铸铁，这种现象尤其严重。为了保存氧化皮，试验时应将试样放在瓷舟或瓷坩埚内（试验前瓷坩埚或瓷舟要烘烤至恒重）。铸铁的脱碳过程对试样重量的变化可能有很大影响，试样的增重因脱碳而显著减小。脱碳现象无论用金相法，还是用化学分析法都能观察到。要考虑脱碳过程对试样总重量变化的影响是极为复杂的。如果在试验过程中对铸铁及气相进行化学分析，则有可能通过相应的计算而对试样重量加以修正。试验条件允许时，则可通过控制炉内气氛来抑制脱碳过程。尽管用增重法来评定铸铁的抗氧化性存在着一些缺点，但由于这种方法简便易行，故仍然应用最广。

根据试样的重量损失来评定铸铁的抗氧化性；看起来似乎更合理些，因为试样的重量损失直接反映了所进行的氧化烧损过程，例如，由于脱碳而引起的试样重量的减小过程。此法的试验操作要简单得多，不必采取措施来保存氧化皮。试验的任务正是要去除试验时所形成的氧化皮，但是，氧化皮的去除应极完全而又要不损坏下层金属。氧化皮可用机械方法去除：先用小锤敲打，然后用钢丝刷清理。用浸蚀法或阴极处理法可以最完全地去除氧化皮。浸蚀液的成分及电化学处理规范可以根据铸铁的类型来选择。例如，用阴极处理法去除合金铸铁的氧化皮时，熔融混合料可由60%焙烧苏打与40%苛性钠所组成，

温度为 450—500℃，电流密度为 2500—5000A/M²。将试样多次浸入 400℃ 的硝酸钾熔盐中也可去除氧化皮。去除氧化皮后称量试样重量并确定出试样的氧化损失量。按重量损失来评定抗氧化性存在着严重缺点。首先，用此法不可能确定氧化皮形成过程的动力学规律。氧化层的破坏对铸铁（包括耐热铸铁）的氧化会产生不良影响。许多合金的氧化抗力主要决定于其氧化物的良好保护性能。氧化膜破坏后，势必加速氧化的进行，故去除氧化皮后的试样不能继续用来试验。其次，由于用机械法未将氧化皮完全去除，或者进行化学或电化学处理时引起了金属损耗，将不可避免地给试验结果带来误差。对于普通灰铸铁，由于氧化沿石墨深入铸铁内部，故要充分去除氧化皮是完全不可能的。若欲对去除后的氧化皮进行深入研究，则采用此法来评定铸铁的抗氧化性也许是可取的。

连续称重法是将试样悬挂在称量装置上，在整个试验过程中定期观察在氧化作用下试样重量的增加情况。这种装置常常称为热天平。所研究的试样用不氧化的金属丝（例如铂丝）悬挂，并置于立式马弗炉的加热段（图 1-1）^[2]。金属丝系在分析天平的横梁上，代替一个天平盘。为了避免热空气对流及加热炉辐射对天平盘的影响而引起称量误差，应通过遮热板、炉盖或者吹风将天平与加热炉充分隔开，而穿金属丝的孔应尽可能小。

为了减小称量时偶然冲撞的影响，在第二个天平盘上宜装上阻尼器。此阻尼器是将铝质圆柱体浸入容器中的变压器油内而制成。本法同样具有前述用增重法评定抗氧化性的一些缺点。此外，由于天平位于加热炉上方，若不能保证热天平的整个活动部分不受上升气流的影响，则天平称量精度是值得怀疑的。连续称重装置的结构特点使之很难用来研究在其它气氛（除空气外）中的抗氧化性。

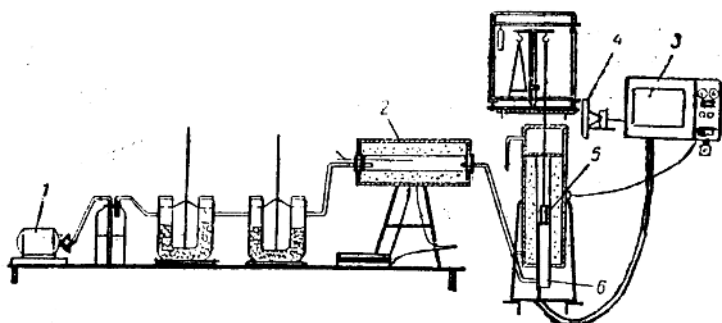


图1-1 连续称重法测定抗氧化性的装置示意图

- 1—送风机 2—空气预热炉 3—温度控制器 4—风扇
5—试样 6—热电偶

除了上述称重法以外，定量评定铸铁的抗氧化性还可采用其它一些方法，如压力计法、光电法、电阻法等。所谓压力计法是测定在规定条件下试样所吸收的气体的体积并用来表示氧化特征。试验时，将放有试样的反应管置于电炉内，并通过三通活栓与水银压力计及大气相通。通过三通活栓不时送入空气。试样所吸收的氧（还可能有氮）量可用压力计来测定。如果事先测定了仪器的容积，就可知道所吸收的气体的绝对量。此法只能用来研究在纯净气体内的氧化过程，并且必须根据反应空间与压力计四周空间的温度差，对压力的测定值进行校正。此外，对铸铁试样，在反应管内还会发生次生气体反应，例如脱碳反应，必须考虑此反应对试验结果的影响。

光电测量法及电阻测量法在铸铁的抗氧化性试验中亦得到了应用。这些方法大多用来测定金属氧化膜的厚度，因而有时也可用来测定氧化开始阶段氧化速度随时间的变化情况。

氧化皮的厚度可以根据金相磨片近似地加以测量。此法虽不特别精确，但在某些情况下是完全令人满意的。