

ISO 17804 等温淬火球墨铸铁标准解读

张寅

(沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 本文介绍了 ISO 17804:2005 标准规定的 6 个牌号的等温淬火球墨铸铁(ADI)材料的力学性能。ADI 材料的基体组织为“奥铁体”, 与贝氏体组织不同。ADI 材料可以通过等温淬火热处理而获得, 不同热处理温度下得到的 ADI 金相组织存在细微差别。热处理工艺对 ADI 的生产十分关键, 远比普通球墨铸铁件的热处理工艺复杂。添加合金元素会促进奥铁体的形成, 避免形成珠光体, 进而影响材料的力学性能。如果合金元素加入量不足, 或热处理工艺控制不当, 都会降低材料的力学性能。对于尺寸公差要求严格的 ADI 铸件, 应在热处理后进行机械加工。对于强度要求较高的零件, ADI 是理想的工程材料, 和传统钢件相比较, 选用 ADI 更加经济, 在很多应用领域, ADI 已经取代了钢。

关键词: 等温淬火; 热处理; ADI; 力学性能

1 综述

等温淬火球墨铸铁又称奥铁体球墨铸铁或 ADI。在 ISO 17804:2005 标准中表 1, 表 2 及附录 A 中的表 A.1、附录 B 中的表 B.1 中都规定了其相关力学性能。

ISO 17804:2005 的表 1, 列出了 6 种牌号的等温淬火球墨铸铁的力学性能。

ISO 17804/JS/800-10RT 等温淬火球墨铸铁的冲击性能见表 2。

表 1 ISO 17804 不同牌号的等温淬火球墨铸铁的力学性能

| 材料牌号 | 铸件主要壁厚 (mm) | 抗拉强度 (≥, MPa) | 屈服强度 (≥, MPa) | 延伸率 (≥, %) | 布氏硬度 | |
|---|-------------|---------------|---------------|------------|---------|-------------|
| ISO17804/JS/800-10 ISO17804/JS800-10RT | t≤30 | 800 | 500 | 10 | 250~310 | |
| | 30<t≤60 | 750 | | 6 | | |
| | 60<t≤100 | 720 | | 5 | | |
| ISO17804/JS/900-8 | t≤30 | 900 | 600 | 8 | 280~340 | |
| | 30<t≤60 | 850 | | 5 | | |
| | 60<t≤100 | 820 | | 4 | | |
| ISO17804/JS/1050-6 | t≤30 | 1050 | 700 | 6 | 320~380 | |
| | 30<t≤60 | 1000 | | 4 | | |
| | 60<t≤100 | 970 | | 3 | | |
| ISO17804/JS/1200-3 | t≤30 | 1200 | 850 | 3 | 340~420 | |
| | 30<t≤60 | 1170 | | 2 | | |
| | 60<t≤100 | 1140 | | 1 | | |
| ISO17804/JS/1400-3 | t≤30 | 1200 | 1100 | 1 | 380~480 | |
| | 30<t≤60 | 1170 | | | | 采购方与供应商协商确定 |
| | 60<t≤100 | 1140 | | | | |

表 2 ISO 17804/JS/800-10RT 等温淬火球墨铸铁的冲击性能

| 材料牌号 | 铸件主要壁厚 (mm) | 室温冲击性能 (23℃±5℃, ≥) | |
|----------------------|-------------|--------------------|--------|
| | | 三次平均值 (J) | 单值 (J) |
| ISO17804/JS/800-10RT | t≤30 | 10 | 9 |
| | 30<t≤60 | 9 | 8 |
| | 60<t≤100 | 8 | 7 |

等温淬火球墨铸铁材料与 ISO 1083:2004 球墨铸铁标准中的材料一样, 都是用相同的工艺方法生产的, 然后经过等温淬火热处理, 使珠光体基体转变为奥铁体, 从而提高材料的机械性能, 尤其是抗

拉强度和疲劳强度, 同时仍保持优越的伸长率。因此, ISO 17804: 2005 是在 ISO 1083: 2004 标准的基础上派生出来的经过特殊热处理的球墨铸铁, 从而获得一系列不同和独立标准的工程材料。

ISO 17804 中规定了耐磨等温淬火球墨铸铁的力学性能，如表 3 所示。

表 3 耐磨等温淬火球墨铸铁的力学性能

| 材料牌号 | 布氏硬度 HBW, ≥ | 其他性能 (仅供参考) | | |
|--------------------|----------------|-------------|-----------|--------|
| | | 抗拉强度, MPa | 屈服强度, MPa | 延伸率, % |
| ISO17804/JS/HBW400 | 400 | 1400 | 1100 | 1 |
| ISO17804/JS/HBW450 | 450 | 1600 | 1300 | - |

自 20 世纪 40 年代以来，等温淬火球墨铸铁材料才引起了人们的关注，20 世纪 70 年代美国成功将这种材料应用在齿轮件后，等温淬火球墨铸铁的应用进入了较快的发展阶段。以前把球墨铸铁等温淬火处理后得到的基体组织称为贝氏体，这种名称至今仍被偶尔使用。在热处理术语中，贝氏体是马氏体完全回火后得到的组织，是由极细的针状铁素体和碳化物呈交替排列的共析组织，而等温淬火球墨铸铁中的基体组织是由针状铁素体和高碳奥氏体组成的，没有碳化物，因此现在普遍叫做“奥铁体”。

在球墨铸铁材料中可以通过添加合金元素直接获得具有奥铁体基体的球墨铸铁材料，而不是通过热处理方式，用这种方法获得的球墨铸铁不属于 ISO 17804 规定的等温淬火球墨铸铁。



图 1 等温淬火球墨铸铁件金相结构 (×150)

图 1 是典型的等温淬火球墨铸铁在金相显微镜下的显微组织，可以看出其金相组织主要由奥铁体基体以及包围在其中的石墨球组成。在不同温度下等温淬火处理得到的球墨铸铁金相组织中，可以观察到其奥铁体存在细微的差别。

ISO 17804 中规定了 5 个等温淬火球墨铸铁牌号，其抗拉强度范围从 720 MPa 到 1400 MPa 以上，伸长率在 10% 至 1% 之间。从 ISO 17804:2005 中的表 1 可以看到，除了最高牌号的等温淬火球墨铸铁以外，其它牌号的性能均与铸件的主要壁厚及试块尺寸有关，ISO 17804: 2005 中的表 3 作了详细规定。此外，ISO 17804:2005 中的附录 A 中对硬

度有效范围有进一步要求的两种等温淬火球墨铸铁牌号作了规定。

2 热处理工艺

等温淬火热处理工艺对奥铁体球墨铸铁的生产十分关键，其等温淬火工艺远比 ISO 1083 中的球墨铸铁件的热处理工艺复杂的多，它实质上是一种淬火加回火工艺，通过这种热处理工艺可以使球墨铸铁获得比普通正火或淬火加回火处理条件下更高的力学性能。图 2 中给出了 ISO 1083 中的珠光体球墨铸铁材料在铸态条件下以及通过正火处理，然后再淬火加回火热处理状态下能达到的抗拉强度范围，同时给出了等温淬火处理后球墨铸铁抗拉强度范围，通过比较可以看出等温淬火球墨铸铁具有明显的力学性能优势。

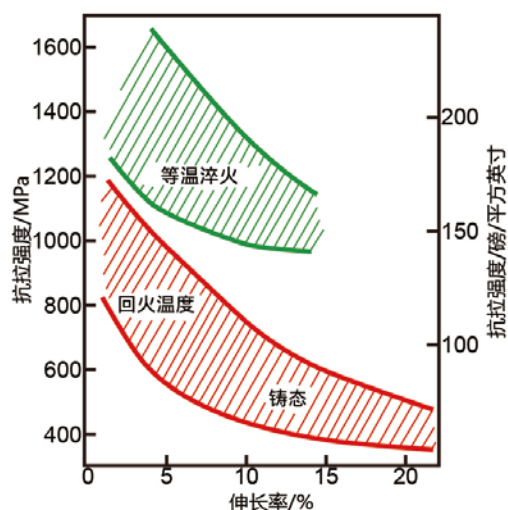


图 2 等温淬火球墨铸铁和其他球墨铸铁拉伸性能比较图

当对珠光体球墨铸铁和钢进行淬火加回火处理时，先加热至 900℃，使其基体组织转变为奥氏体，然后快速淬火冷却至 200℃ 以下，这个温度称为马氏体相变开始温度 (M_s)，在 M_s 点，基体组织开始转变为较硬的马氏体，随后在 250~450℃ 间进行回火处理，具体的回火处理温度则要根据要求的性能来确定。图 3 中是一个简化的淬火加回火热处理工艺的时间-温度-相变 (TTT) 曲线，其中 X 轴代表时间，Y 轴代表温度。黑色线称为珠光

体 C 曲线，淬火速度需要足够快以免冷却曲线与 C 曲线鼻子处相交，以确保形成马氏体和避免形成珠

光体。因此，正常的淬火加回火工艺中蓝色线的水平部分应低于 200℃ 的 Ms 线。

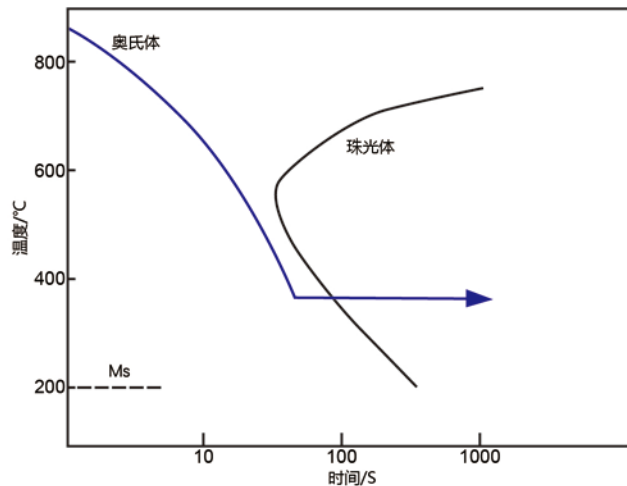


图 3 等温淬火处理的时间-温度-相变 (TTT) 曲线图

淬火处理一般使用盐浴工艺。在淬入盐浴过程中，材料在等温淬火温度保温，使基体等温转变为奥铁体。一般盐浴的温度范围为 250~425℃，具体的温度则要根据等温淬火球墨铸铁的性能来选择。在 250~325℃ 的盐浴淬火时，可以得到具有强度较高而塑性相对较低的高牌号等温淬火球墨铸铁；而在 325℃ 以上的高温盐浴淬火时，可得到塑性较好而强度相对较低的低牌号等温淬火球墨铸铁。

表 4 中给出了在不同等温淬火温度下得到的典型的力学性能，其是在淬火池具有足够的容量且淬火处理得到较好控制的情况下得到的。通常情况下，盐浴具有一个再循环系统，以避免产生过热，但如果系统发生故障，或淬火池太小，铸件自身的热量将提高盐浴的温度，有可能对铸件的性能产生不利影响。

表 4 典型的等温淬火球墨铸铁性能

| Property | Austempering Temperature °C | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| | 250 | 275 | 300 | 325 | 350 | 375 | 400 | 425 | 450 |
| UTS N/mm ² | 1100 | 1390 | 1405 | 1385 | 1210 | 1115 | 1040 | 920 | 890 |
| Elongation% | 1.2 | 1.5 | 1.8 | 3.3 | 7.5 | 9.4 | 8.2 | 4.8 | 4.4 |
| Hardness HBW | 480 | 455 | 410 | 368 | 325 | 305 | 300 | 285 | 277 |

3 化学成分对材料性能的影响

ISO 17804 中没有规定材料的化学成分，虽然化学成分也需要加以控制，包括下面将要提到的合金元素。材料的主要元素，碳、硅和锰含量增加，会导致抗拉强度和屈服强度降低，硅和锰倾向于降低伸长率，而碳不能降低伸长率。因此，合理的化学成分应为 C3.4%~3.6%，Si2.3%~2.6%，应降低磷含量，且碳当量 (CEL) 应控制在一个较窄的范围内，这个范围的化学成分可以满足标准规定的力学性能要求及材料的等温淬火温度。诸如以上提到的非合金材料，当铸件主要壁厚超过 15~18 mm 时，铸件不可能得到完全的奥铁体基体组织。淬火

不充分，增加了基体中珠光体的数量。通过添加合金元素增加淬透性可以解决这个问题。

4 合金元素的影响

薄壁铸件通过等温淬火易于获得奥铁体的基体组织，随着铸件壁厚的增加，非合金球墨铸铁材料中形成珠光体的倾向加大。在铸件局部壁厚较大的部位（如铸件的交叉位置）易于形成珠光体。

铸件断面心部存在少量的珠光体不会对其使用性能产生不利影响，但还是应尽量避免。一般通过添加合金元素来促进奥铁体的形成，避免形成珠光体。通常添加的合金元素有铜，锰，钼和镍。

在ISO 17804中没有规定添加的合金元素，企业一般有自己的合金元素添加规范，但并不是合金

元素越多越好。例如，钼对确保在厚大断面处形成奥铁体有重大影响，但是钼过量会引起偏析，随后产生脆化和增加缩松的倾向。图4给出了厚截面处的合金化要求，这些数据和试块的凝固速度有关，圆形试棒的凝固速度不同于平板类铸件，如直径为30mm、40mm和50mm的圆棒的凝固速度和壁厚为

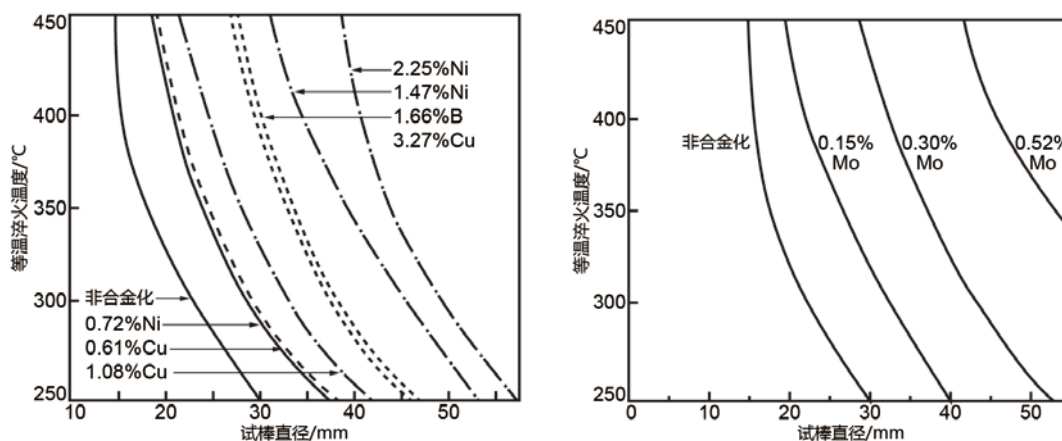


图 4 基于试棒直径的奥铁体材料的合金元素加入量示意图

5 石墨形态和尺寸

由于等温淬火球墨铸铁和普通球墨铸铁的凝固机理完全相同，因此等温淬火球墨铸铁的石墨形态和尺寸与普通球墨铸铁没有区别，关于等温淬火球墨铸铁石墨形状和尺寸见ISO 1083的第3章节。

6 基体组织和性能

所有球墨铸铁的基体组织决定其性能，等温淬火球墨铸铁也不例外。典型的等温淬火球墨铸件的基体组织主要是奥铁体，也含有少量的其他相，如马氏体和先共析铁素体。马氏体只有在较低温度下进行等温淬火处理时才有可能形成。热处理工艺决定了等温淬火球墨铸铁基体组织的相变及其细化程度，从而决定了材料的性能。经验丰富的人可以在显微镜下识别基体组织的差异，尽管有一定难度。一般只需要对等温淬火球墨铸铁的性能及主要的基体组织做出相应的规定即可，没有必要详细的规定其他基体组织，因为很难对基体组织中除奥铁体以外的其他组织达成一致意见。

7 断面敏感性

等温淬火球墨铸铁的断面敏感性类似于 ISO 1083:2004 中的第 3 章的描述。不同截面处的性

15mm、20mm和25mm的单个铸件的凝固速度相当。铸件生产商在确定合金元素的加入量时，应以铸件的主要壁厚和模数为依据，在ISO 17804:2005标准的3.4条已给出定义。因此，铸件的主要壁厚有可能是铸件的最厚截面，除非顾客另有规定。

能与热处理工艺及加入的以保证奥铁体组织均匀的合金元素有很大关系。如果合金元素加入量不足，或热处理工艺控制不当，都会导致铸件厚壁的心部出现珠光体，从而降低材料的力学性能。

8 耐冲击的等温淬火球墨铸铁

ISO 17804:2005 中表 2 规定了一种具有耐冲击性能的等温淬火球墨铸铁材料，其牌号为 JS/800-10RT，ISO 17804:2005 的附录 E 给出了该材料的详细信息。本标准的表 15 中给出了该牌号的耐冲击性能值。耐冲击性能与铸件的壁厚有关，由于材料的断面敏感性，当壁厚增加时，材料的冲击吸收能量值降低。表 1 中 JS/800-10RT 的抗拉强度与 JS/800-10 相同，是因为这两种牌号其实是完全相同的材料，“RT”表示该材料可以满足冲击性能要求。JS/800-RT 材料一般应用于对冲击性能有一定要求的铸件上。

9 耐磨等温淬火球墨铸铁

ISO 17804:2005 中的附录 A 中规定了两种耐磨等温淬火球墨铸铁牌号。这两种牌号的材料具有良好的耐磨性能，在 ISO 21988 耐磨铸铁标准中不包含这两种耐磨等温淬火球墨铸铁。这主要是由于 ISO 21988 标准中的耐磨铸铁都是通过添加特定合金元素而获得的，合金元素对标准中的

绝大多数牌号具有重要影响，ISO 17804:2005 附录 A 中的两种耐磨等温淬火球墨铸铁的耐磨性能主要是通过热处理获得的而不是通过加入合金元素获得的。

ISO 17804:2005 中只规定了这两种牌号的布氏硬度要求。这两种材料是在接近 M_s 点的较低温度下进行等温淬火处理得到的。通过这种热处理工艺，材料可以获得较高的抗拉强度和屈服强度，但是几乎没有塑性。同时，与 ISO 21988 中规定的耐磨铸铁材料相比，这两种材料的马氏体含量较低，因此具有更好的耐冲击性能，由于没有合金碳化物，所以其耐磨性没有 ISO 21988 标准中的材料好。与其它耐磨铸铁材料一样，经济性和适用性是选用这两种材料的主要依据。

10 机械加工性能

等温淬火球墨铸铁件应该在热处理前还是热处理后进行机械加工，一直存在很大的争议，因为经过等温淬火处理之后，球墨铸铁的机械加工性能会大大降低而硬度提高了。铸件在等温淬火过程中因发生相变使铸件体积膨胀，进而使铸件尺寸发生变化，一旦尺寸变化超出铸件的公差范围，就有造成铸件报废的风险。如果热处理后机械加工，可以避免尺寸变化引起的超差现象。但是，由于热处理后材料的硬度高，机械加工的难度和成本会大大提高。关键要看尺寸变化是否在公差范围内，对于几何结构复杂的铸件，各部位之间的变化量不均匀，其变化范围从轻微的收缩至体积膨胀0.4%，体积膨胀导致尺寸的变化很难预测。在选择等温淬火球墨铸铁材料牌号时，特别是在生产一些尺寸公差要求较高的铸件时，应特别考虑上述问题。ISO 17804: 2005 的附录H中列出了等温淬火球墨铸铁的机械加工性能信息。

11 牌号选择

等温淬火球墨铸铁材料最初主要应用于齿轮技术，目前这种材料的应用领域变得更加广泛。它优越性在于具有比普通球墨铸铁更加优异的综合力学性能。例如，ISO 17804 等温淬火球墨铸铁中的最低牌号为 JS/800-10，相比之下，ISO

1083:2004 普通球墨铸铁中的最高牌号仅为 JS/900-2。等温淬火球墨铸铁的抗拉强度可达 1000MPa 以上，并且还保持较高的伸长率。

对于强度要求很高的零件，等温淬火球墨铸铁件是理想的材料，因为其具有高强度的特点。相比传统钢件较高的制作和加工成本，等温淬火球墨铸铁更加经济，如材质较轻、噪音小（有相对较高的阻尼系数），因此在很多应用领域，等温淬火球墨铸铁已经取代了钢。常用的等温淬火球墨铸铁件包括齿轮、传动轮、曲轴、差速器十字轴、主轴箱、弹簧元件等。具体的牌号应根据设计零件的强度要求进行选取。对于壁厚小于30mm的铸件，选用等温淬火球墨铸铁可满足强度从800MPa到1400MPa的需求。

两种抗磨等温淬火球墨铸铁牌号都具有较高的硬度（硬度值很接近，其中硬度稍低的牌号，其耐冲击性能优于硬度较高的牌号）。与普通耐磨铸铁一样，耐磨等温淬火球墨铸铁的选用需要根据零件的实际使用环境选择合适的牌号。目前，耐磨等温淬火球墨铸铁常用于挖掘机、破碎机的斗齿和履带，比铸钢材料更经济。

12 结束语

通过等温淬火热处理工艺获得的奥铁体球墨铸铁，除具有强度高、韧性好、疲劳性能高、减震性好等优良的性能外，同时还具有优异的耐磨性。ADI 要比同样硬度钢的耐磨性高。上个世纪 90 年代，美国开发了含碳化物的奥铁体球墨铸铁(简称 CADI)。在成分选择时加入 0.5%~1.5%Cr，使基体组织中存在 10%~30%的碳化物，这种含碳化物的 ADI 更耐磨，且具有较高的韧性。与镍硬铸铁的耐磨性相当，在成本方面，比含镍硬铸铁便宜，也能够与某些高合金耐磨铸铁相抗衡。CADI 作为 ADI 的一种派生材料，其具有优良的强韧性和耐磨性，近些年来，在耐磨材料行业，CADI 材料已引起了人们关注。

CADI 在耐磨件中的应用潜力还相当大，研究 CADI 的磨损性能对于进一步开发其作为磨损件的应用潜力，指导实际生产都具有重要的现实意义。为了使这种新型的抗磨材料健康地发展，尚需进行许多的研究工作。