

团 体 标 准

T/CFA 0102012 — 2021

耐热低合金铁素体球墨铸铁件

Ferritic ductile iron casting with low alloy for heat resist

(公告稿)

2021 - 03 - 25 发布

2021 - 06 - 25 实施

中国铸造协会发布

目 次

前言.....	II
引言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 牌号及表示方法.....	2
5 基本要求.....	3
6 技术要求.....	3
7 试验方法.....	5
8 检验规则.....	6
9 标志和质量证明书.....	7
10 防锈、包装、贮存和运输.....	7
附录 A(资料性) 耐热低合金铁素体球墨铸铁件的力学性能.....	8
附录 B(资料性) 耐热低合金铁素体球墨铸铁件的物理性能.....	17
附录 C(规范性) 铸造试块的解剖步骤.....	18
附录 D(资料性) 热处理工艺.....	19
图 A.1 三种耐热低合金铁素体球墨铸铁件牌号的拉伸强度随温度变化的值.....	9
图 A.2 QT400-15 和 QTRS140Mo10 在 0℃~800℃ 内的拉伸性能.....	9
图 A.3 铁素体球墨铸铁件的抗拉强度、屈服强度、硬度和伸长率随 Si 含量的变化.....	10
图 A.4 Mo 含量对含有 4% Si 的铁素体球墨铸铁件 1000h 蠕变极限的影响.....	11
图 A.5 QT400-15 在 t= 450℃ 下蠕变曲线以及用 Norton-Bailey 方程对蠕变行为进行的拟合.....	11
图 A.6 QTRS125Mo5 在 t= 450℃ 下的蠕变曲线以及用 Norton-Bailey 方程对蠕变行为进行的拟合.....	12
图 A.7 在 t= 450℃ 下的蠕变曲线以及用 Norton-Bailey 方程对蠕变行为进行的拟合.....	12
图 A.8 Si 含量 4.2% 和 Mo 含量 0.75% 铁素体球墨铸铁件的弹性模量随温度的变化.....	13
图 A.9 低合金铁素体球墨铸铁件在 200℃ 和 650℃ 循环下, Mo 元素含量和热疲劳寿命之间的关系.....	13
图 A.10 Si 含量对球墨铸铁在 800℃ 下空气中退火 96h 后的氧化层厚度的影响.....	14
图 C.1 附铸试块的试样切取示意图.....	17
图 C.2 单铸、并排试块的试样切取示意图.....	17
表 1 化学成分.....	3
表 2 不同牌号耐热低合金铁素体球墨铸铁件的室温力学性能.....	4
表 A.1 铁素体球墨铸铁件的平均热膨胀系数.....	8
表 A.2 Si 和 Mo 元素含量对铁素体球墨铸铁件高温拉伸强度和蠕变强度的影响.....	13

表 A.3 在 700 °C 下 2000h 后的氧化层渗透	14
表 A.4 不同的铸铁材料在空气中退火 2000h 后的氧化层渗透参考值	14
表 B.1 耐热低合金铁素体球墨铸铁件的物理性能	16
表 D.1 热处理工艺	18

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国铸造协会标准工作委员会提出。

本文件由中国铸造协会归口。

本文件起草单位：共享装备股份有限公司、襄阳金耐特机械股份有限公司、宜宾普什联动科技有限公司。

本文件主要起草人：张龙江、薛蕊莉、苏少静、帅德军、周海帆、任良敏、黄鹏、孙升、陈孝先、马立宏。

本文件自 2021 年 03 月 25 日为首次发布。

引 言

普通球墨铸铁材料，在 300 °C 受热较长时间后，会在低于屈服应力条件下发生蠕变；温度超过 400 °C，强度和硬度开始下降，并发生轻微氧化和热生长；在 550 °C 时，出现明显氧化，强度持续下降。耐热球墨铸铁具备抗热腐蚀、抗高温和抗氧化等性能，在涡轮压缩机、排气管等汽车零部件以及燃气轮机部件等领域得到广泛应用。

为了提高球墨铸铁的耐热性，需要加入铝、钼、铬等合金，高合金会导致珠光体含量增加，石墨形态恶化，冲击性能下降，铸造过程中缩松倾向增加，同时生产成本升高。为了解决这个问题，耐热低合金铁素体球墨铸铁的优势凸显，应用越来越广泛，客户订货量在持续增长，但是客户采用的标准是其企业标准或国外的相关标准作为参照，国内还缺少耐热低合金铁素体球墨铸铁的标准。同时，耐热铸铁在冶金机械、化工机械、锅炉构件等方面的应用也有广阔的前景，可以在很大的程度上代替耐热钢、不锈钢作耐热构件，成本仅为上述钢种的 1/10~1/15，大大降低了耐热零部件的成本。

本文件中提供了 6 种不同牌号的耐热低合金铁素体球墨铸铁，可以满足多种用途和性能要求。同时，本文件 6 种牌号耐热低合金铁素体球墨铸铁的 Mo 元素含量相对较低，减少了缩松缺陷，并显著降低了此类材料的成本，为此类材料的大规模推广应用提供了有利条件。另外，铁素体基体使得此类材料还具有较好的塑性和冲击性能，扩大了此类材料的应用领域和使用范围。

耐热低合金铁素体球墨铸铁件

1 范围

本文件规定了耐热低合金铁素体球墨铸铁件的牌号及表示方法、基本要求、技术要求、试验方法、检验规则、标志和质量证明书、防锈、包装、贮存和运输。

本文件适用于砂型铸造或导热性与砂型相仿的铸型中浇注的、硅(Si)含量在 2.3 %~5.2 %、钼(Mo)含量在 0.4 %~1.1 %、服役温度小于 500 ℃的耐热低合金铁素体球墨铸铁件。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 223.3 钢铁及合金化学分析方法 二安替比甲烷磷钼酸重量法测定磷量
- GB/T 223.4 钢铁及合金 锰含量测定 电位滴定或可视滴定法
- GB/T 223.60 钢铁及合金化学分析方法 高氯酸脱水重量法测定硅含量
- GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法
- GB/T 231.1 金属材料 布氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法
- GB/T 231.2 金属材料 布氏硬度试验 第 2 部分: 硬度计的检验与校准
- GB/T 231.3 金属材料 布氏硬度试验 第 3 部分: 标准硬度块的标定
- GB/T 1348 球墨铸铁件
- GB/T 5611 铸造术语
- GB/T 5612 铸铁牌号表示方法
- GB/T 5677 铸件 射线照相检测
- GB/T 6060.1 表面粗糙度比较样块 第 1 部分: 铸造表面
- GB/T 6414 铸件 尺寸公差、几何公差与机械加工余量
- GB/T 9441—2009 球墨铸铁金相检验
- GB/T 9443 铸钢铸铁件 渗透检测
- GB/T 9444 铸钢铸铁件 磁粉检测
- GB/T 11351 铸件重量公差
- GB/T 24234 铸铁 多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法(常规法)
- GB/T 34904 球墨铸铁件 超声检测

3 术语和定义

GB/T 5611 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

耐热低合金铁素体球墨铸铁 ferritic ductile iron casting with low alloy for heat resist
合金元素含量<3.0%、铁素体含量≥85%、耐高温(≤500℃)使用的球墨铸铁。

[来源: GB/T 5611—2017, 3.3.43, 有修改]

3.2

球化处理 graphite spheroidizing treatment; nodularizing treatment

往铁液中加入球化剂,使铁液凝固过程中析出的碳以球状石墨形态为主的工艺过程。

[来源: GB/T 5611—2017, 3.3.72, 有修改]

3.3

试块 cast sample

以一定铸造方式制作的、代表铸件化学成分、金相组织和力学性能样品,包括单铸试块、并排试块和附铸试块。

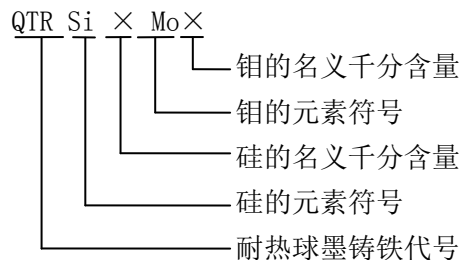
3.4

相关壁厚 relevant wall thickness

代表铸件力学性能的断面厚度,由供需双方共同确定。

4 牌号及表示方法

耐热低合金铁素体球墨铸铁件的牌号应按照 GB/T 5612 的规定表示。



示例: QTRS i 25 Mo 5, QTR 表示耐热球墨铸铁, Si 表示硅的元素符号, 25 表示硅的名义千分含量, Mo 表示钼的元素符号, 5 表示钼的名义千分含量。

5 基本要求

5.1 生产方法

应由供方自行决定耐热低合金铁素体球墨铸铁件的生产方法以及获得特定力学性能和微观组织所需进行的热处理方法,当需方有特殊要求时,供需双方应协商一致。

5.2 订货信息

5.2.1 需方应在订货时规定铸件名称、材质牌号、供货数量和交货状态、供需双方明确的相应要求和检验项目及本文件要求以外的检验项目。

5.2.2 需方应提供供货图样。

5.2.3 需方有特殊要求时,宜由供需双方共同协商。

6 技术要求

6.1 化学成分

6.1.1 耐热低合金铁素体球墨铸铁件的硅和钼含量应符合表 1 要求；其他元素含量参考表 1，不作为铸件验收依据。

6.1.2 如果要求超出表 1 的限制范围，或者要求添加其他合金元素，则化学成分的含量宜由供需双方协商确定。

表1 耐热低合金铁素体球墨铸铁件化学成分

牌号	化学成分（质量分数，%）						
	C	Mn	P	S	Mg	Si	Mo
QTRSi25Mo5	2.7~3.5	≤0.8	≤0.07	≤0.015	≤0.07	2.3~2.7	0.4~0.6
QTRSi30Mo7						2.8~3.2	0.6~0.8
QTRSi35Mo5						3.3~3.7	0.4~0.6
QTRSi40Mo6						3.8~4.2	0.5~0.7
QTRSi45Mo10						4.3~4.7	0.8~1.1
QTRSi50Mo10						4.8~5.2	0.8~1.1

6.2 金相组织

6.2.1 石墨

石墨应以 GB/T 9441—2009 规定的 V 型和 VI 型为主，石墨形态应 > 3 级，石墨大小应 5 级~7 级，球化率应 ≥ 85%，也可由供需双方商定。

6.2.2 基体组织

6.2.2.1 基体组织中铁素体含量应不低于 85%。

6.2.2.2 碳化物含量应不超过 5%。

6.2.2.3 其他的限制条件宜由供需双方协商确定。

6.3 力学性能

6.3.1 单铸、并排或附铸试样的力学性能

6.3.1.1 从砂型或导热性与砂型相当的铸型铸造的单铸试块、并排试块或附铸试块加工的试样上（壁厚 ≤ 30 mm）获得的不同牌号铸铁的室温力学性能应与表 2 一致。

6.3.1.2 附录 A 给出了耐热低合金铁素体球墨铸铁件的高温力学性能的测试结果。

6.3.1.3 附录 B 给出了耐热低合金铁素体球墨铸铁件在不同温度下的物理性能。

6.3.1.4 对于壁厚 > 30 mm 的试块，宜由供需双方协商确定并在订货时说明。

6.3.2 铸件本体试样的力学性能

铸件本体力学性能，宜由供需双方协商确定。

6.3.3 硬度

不同牌号耐热低合金铁素体球墨铸铁件的布氏硬度参考范围值见表 2。

表2 不同牌号耐热低合金铁素体球墨铸铁件的力学性能

牌号	试块壁厚 t mm	0.2 % 屈服强度 $R_{p0.2}$ MPa min.	抗拉强度 R_m MPa min.	伸长率 A % min.	布氏硬度 范围 HBW
QTRSi25Mo5	≤30	250	400	12	130~200
QTRSi30Mo7		300	420	10	150~200
QTRSi35Mo5		320	440	8	150~220
QTRSi40Mo6		380	480	8	190~240
QTRSi45Mo10		460	550	5	200~250
QTRSi50Mo10		500	600	3	210~260

6.4 尺寸公差

6.4.1 铸件的尺寸公差应符合 GB/T 6414 的规定。

6.4.2 有特殊要求的宜符合需方图样规定或有关技术要求。

6.5 重量偏差

6.5.1 铸件的重量偏差应符合 GB/T 11351 的要求。

6.5.2 有特殊要求的宜符合需方图样规定或有关技术要求。

6.6 铸件表面质量

6.6.1 铸件应清理干净，修整多余部分。

6.6.2 浇冒口残余、粘砂、氧化皮及内腔残余物等去除要求应符合技术规范或供需双方订货协定。

6.6.3 采用等离子方法切割铸件后，应加工掉热影响区。

6.6.4 铸件表面粗糙度应符合 GB/T 6060.1 的规定。

6.6.5 有特殊要求的宜符合需方图样或产品技术要求执行。

6.6.6 铸件交付时应符合需方的防锈要求。

6.7 铸件的缺陷及修补

6.7.1 不应存在有影响铸件使用性能的铸造缺陷（如裂纹、冷隔、缩孔、夹渣等）。

6.7.2 铸件可存在能加工去除的表面缺陷。

6.7.3 铸件非加工面及铸件内部允许的缺陷种类、数量、范围，应符合需方图样、技术规范的要求或者供需双方订货协议的规定。

6.7.4 不影响铸件使用性能的缺陷可以修补（焊补或其它方法），修补技术要求宜由供需双方商定。

6.8 无损检测

需方对磁粉检测、超声波检测和射线检测等有要求时，供方应按需方的技术要求进行检验；由供需双方商定检验的频次和数量。

7 试验方法

7.1 试块和试样

试块和试样的制备应按 GB/T 1348 的规定执行，附录 C 给出了不同试块的取样位置。

7.2 化学成分分析

7.2.1 当需方对铸件化学成分有要求时，应按需方技术要求的规定执行；如需方技术要求中无规定时，化学成分应由供方自行确定。

7.2.2 光谱化学分析应按 GB/T 24234 的规定执行。

7.2.3 铸件常规化学分析方法应按 GB/T 223.3、GB/T 223.4 和 GB/T 223.60 的规定执行。

7.3 金相检验

金相检验应按 GB/T 9441 的规定执行。铸件金相组织的检验部位和频次由供需双方商定。

7.4 拉伸试验

拉伸试验应按 GB/T 228.1 的规定执行。

7.5 硬度试验

7.5.1 布氏硬度试验应按 GB/T 231.1、GB/T 231.2 和 GB/T 231.3 的规定执行。

7.5.2 铸件硬度试验的部位、频次和数量应由供需双方商定。

7.6 尺寸检验

7.6.1 铸件的尺寸公差应按 6.4 的要求进行检验。

7.6.2 首批铸件和重要铸件，应按图样规定逐件检验尺寸和几何形状。一般铸件及采用能保证尺寸稳定性方法生产出来的铸件可以抽检，抽检频次和数量宜由供需双方商定。

7.6.3 批量生产的铸件，检验频次和数量宜由供需双方商定。

7.7 表面质量检验

铸件表面质量检验应采用目视检测方法逐件进行检验。

7.8 缺陷检验

7.8.1 铸件表面缺陷，可采用目视方式进行检查。当需方有特殊要求时可采用磁粉探伤或渗透探伤方式检查。

7.8.2 铸件的内部缺陷，可用 X 射线、超声波等方式检查。

7.9 无损检验

- 7.9.1 渗透检测应按 GB/T 9443 的规定执行
- 7.9.2 磁粉探伤检测应按 GB/T 9444 的规定执行。
- 7.9.3 超声波检测应按 GB/T 34904 的规定执行。
- 7.9.4 射线检测应按 GB/T 5677 的规定执行。

8 检验规则

8.1 取样批次

取样批次的构成及检测批次的数量按照 GB/T 1348 的规定执行。

8.2 复检

8.2.1 复验的条件

如果首次测试的结果不能满足材料的力学性能要求，应进行重复试验。

8.2.2 试验的有效性

如果不是铸件本身的质量问题，而是因下列原因之一造成试验结果不符合要求时，则试验无效：

- a) 试样在试验机上的装卡不当或试验机操作不当；
- b) 试样表面有铸造缺陷或试样切削加工不当（如试样尺寸、过渡圆角、粗糙度不符合要求等）；
- c) 拉伸试样在标距外断裂；
- d) 拉伸试样断口上存在明显的铸造缺陷。

出现上述情况，应在同一试块上重新取样或者从同一批次浇注的试块上重新取样再试验，复试的结果代替无效试验的结果。

8.3 试验结果的评定与复验

8.3.1 检验力学性能时，先用一根拉伸试样进行试验，如果符合要求，则该批铸件在材质上即为合格；若试验结果达不到要求，且不是因 8.2.2 条所列原因引起的，则可从同一批的试样中另取二根进行复验。复验结果都达到要求，则该批铸件的材质仍为合格。

8.3.2 若复验结果中仍有一根达不到要求，则该批铸件初步判为材质不合格。可从该批铸件中任取一件，在供需双方商定的部位切取本体试样再进行力学性能检测。若检测结果达到要求，则仍可判定该批铸件材质合格；若本体试样检测结果仍然达不到要求，则最终判定该批铸件材质为不合格。

8.4 试块和铸件的热处理

8.4.1 除有特殊要求外，如果铸件以铸态供货，其力学性能不符合本文件时，经需方同意后，供方可将该批铸件和代表其性能的试块一起进行热处理，然后再重新试验。

8.4.2 铸件经过热处理且力学性能不合格的情况下，生产方可以将铸件及代表铸件性能的试块一起进行再次热处理。并再次提交验收。如果从热处理后的试块上加工的试样性能合格，则认为重复热处理的该批铸件性能合格。具体的热处理要求可参照附录 D。

8.4.3 为复验而进行的重复热处理次数不应超过两次。

9 标志和质量证明书

9.1 铸件应有供方标志。标志的位置、尺寸（字号、字高、凸凹）和方法由供需双方商定。

9.2 铸件出厂应附有供方检验部门签章的质量证明书，证明书应包括下列内容：

- a) 供方名称或标识；
- b) 零件号或订货合同号；
- c) 材质牌号；
- d) 各项检验结果；
- e) 执行标准号。

10 防锈、包装、贮存和运输

10.1 铸件经检验合格后，其防锈、包装和贮存方式应由供需双方商定。

10.2 对于长途运输的铸件，由供需双方商定包装方式与运输工具。



附录 A

(资料性)

硅和钼对耐热低合金铁素体球墨铸铁件的高温力学性能的影响

A.1 物理和力学性能测试

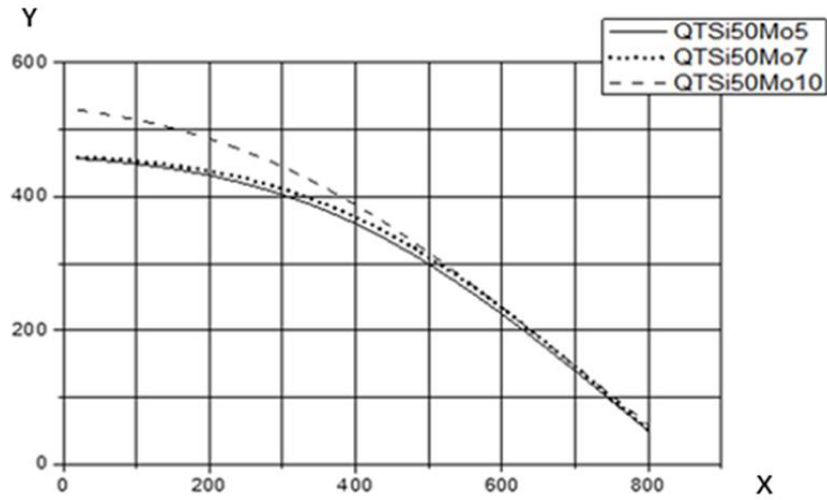
A.1.1 表 A.1 给出了铁素体球墨铸铁的热膨胀系数(CTE)随温度的变化。Si 含量和 Mo 含量对 CTE 影响不显著, 约为 $13.5 \times 10^{-6}/K$ 。

表A.1 铁素体球墨铸铁件的平均热膨胀系数

成分 (质量分数) %				平均热膨胀系数: $10^{-6}/K$ 起始温度为 20 °C					
C	Si	Mn	Mo	100 °C	200 °C	300 °C	540 °C	760 °C	815 °C
3.78	2.16	0.5	—	—	—	—	13.0	13.9	—
3.78	2.28	0.49	0.95	—	—	—	12.1	13.3	—
3.39	3.59	0.38	—	9.98	11.83	12.41	—	—	12.96
3.79	4.00	0.37	—	9.89	11.83	12.81	—	—	14.16
3.34	4.02	0.36	1.97 ^a	—	—	—	12.2	—	13.9
3.45	4.03	0.39	—	8.33	11.68	12.87	—	—	13.30
3.36	4.06	0.36	1.98	—	—	—	12.9	—	14.3
3.79	4.12	0.38	—	10.67	12.66	13.42	—	—	13.55
3.07	4.15	0.34	—	—	—	—	12.2	—	13.9
3.05	4.16	0.35	0.98	—	—	—	12.1	—	13.3
3.06	4.21	0.34	4.09	—	—	—	11.9	—	13.3
3.05	4.23	0.34	2.04	—	—	—	12.1	—	13.3

^a 加上 1.05 % Al。

A.1.2 图 A.1 给出了三种耐热低合金铁素体球墨铸铁件牌号的拉伸强度随温度变化的值。



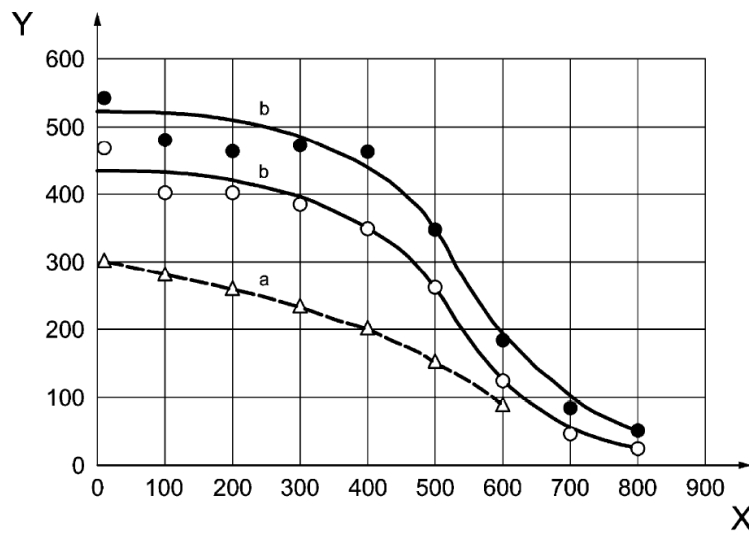
说明:

X——温度 (°C) ;

Y——抗拉强度 R_m (MPa)。

图A.1 三种牌号耐热低合金铁素体球墨铸铁件的拉伸强度随温度变化的值

A.1.3 图 A.2 给出了添加 5% Si和 1% Mo的球墨铸铁的抗拉强度和屈服强度随温度的变化趋势(温度范围 0 °C~800 °C)。



说明:

X——温度 (°C) ;

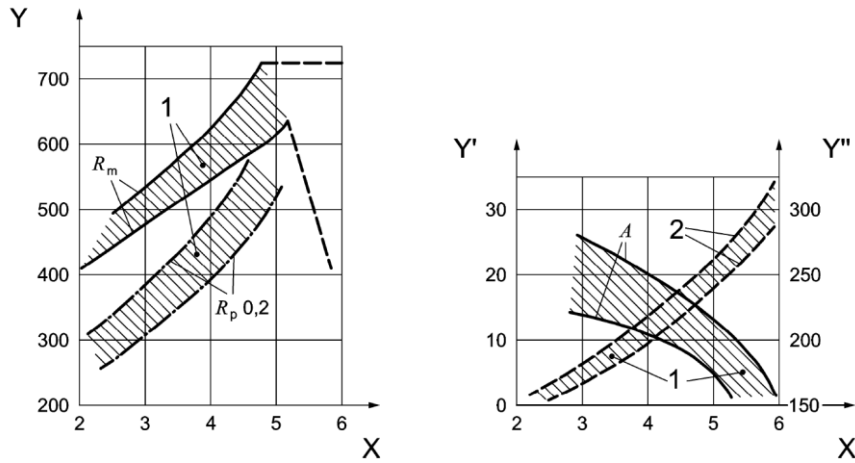
Y——抗拉强度 R_m (MPa) 和屈服强度 $R_{p0.2}$ (MPa);

a——QT400-15: $R_{p0.2}$;

b——QTRS i40Mo10: 黑点 R_m , 白点 $R_{p0.2}$ 。

图A.2 QT400-15 和 QTRS i40Mo10 在0 °C~800 °C内的拉伸性能

A.1.4 图 A.3 给出了球墨铸铁随 Si 含量的升高各种力学性能的变化曲线，其中抗拉强度、屈服强度和硬度升高，伸长率降低。

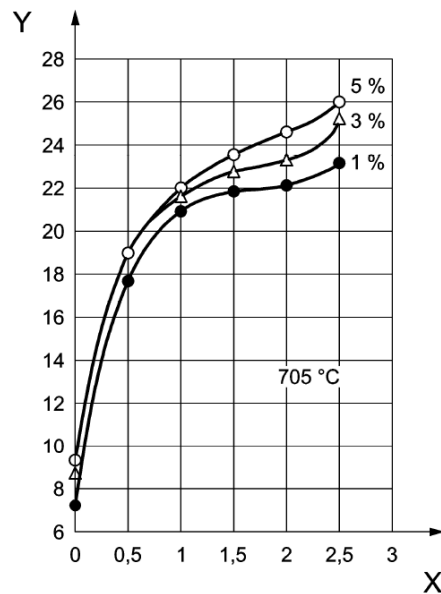


说明:

- 1 ——Mo 在 0%~2% 的区域;
- 2 ——布氏硬度值;
- X ——Si 含量 (质量分数, %);
- Y ——抗拉强度 R_m 和屈服强度 $R_{p0.2}$ (MPa);
- Y' ——伸长率 A(%);
- Y'' ——布氏硬度 HBW。

图A.3 铁素体球墨铸铁件的抗拉强度、屈服强度、硬度和伸长率随 Si 含量的变化

A.1.5 图 A.4 为不同 Mo 含量对蠕变性能的影响。



说明:

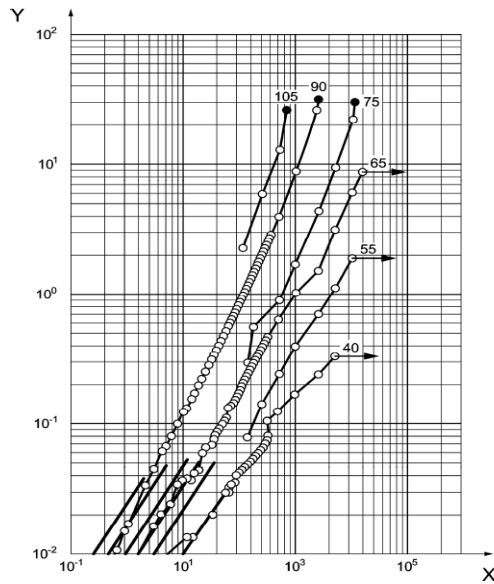
- X ——Mo 含量 (质量分数, %);

Y——应力 (MPa) ;

1 %, 3 %, 5 % ——永久应变(ϵ_{per});

图A.4 Mo含量对含有4% Si的铁素体球墨铸铁件1000 h蠕变极限的影响

A.1.6 图 A.5, A.6 和 A.7 对比了三种牌号球墨铸铁在450 °C给定强度下变形随时间的变化。



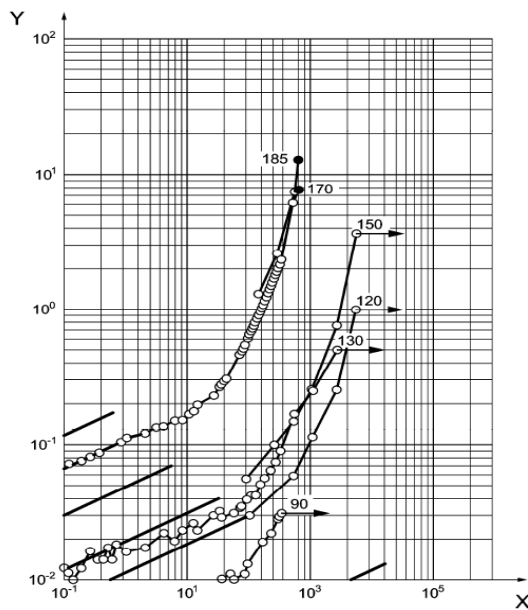
说明1:

X——时间 (h) ;

Y——永久应变 ϵ_{per} (%) ;

说明2: 这个牌号的球墨铸铁化学成分为 3.5 % C, 2.6 % Si, ≤ 0.2 % Mn, < 0.1 % Mo。

图A.5 QT400-15 在 $t = 450$ °C 下蠕变曲线以及用Norton-Bailey方程对蠕变行为进行的拟合



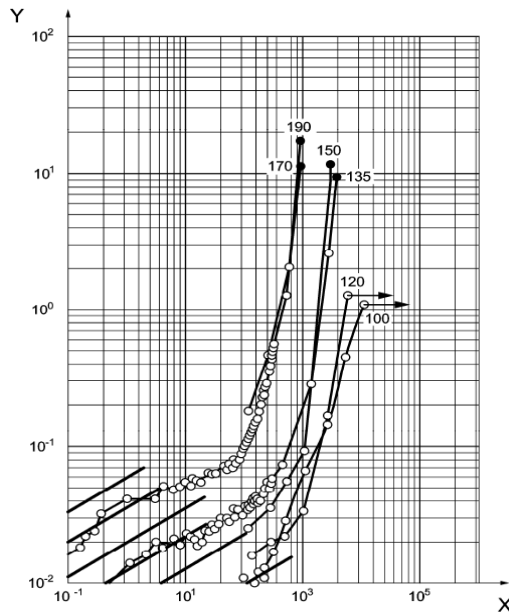
说明1:

X——时间 (h) ;

Y——永久应变 ϵ_{per} (%) ;

说明2: 这个牌号的球墨铸铁化学成分为 3.6 % C, 2.5 % Si, ≤ 0.2 % Mn, 0.5 % Mo。

图A.6 QTRSi25Mo5 在 $t = 450^\circ\text{C}$ 下的蠕变曲线以及用Norton-Bailey方程对蠕变行为进行的拟合



说明1:

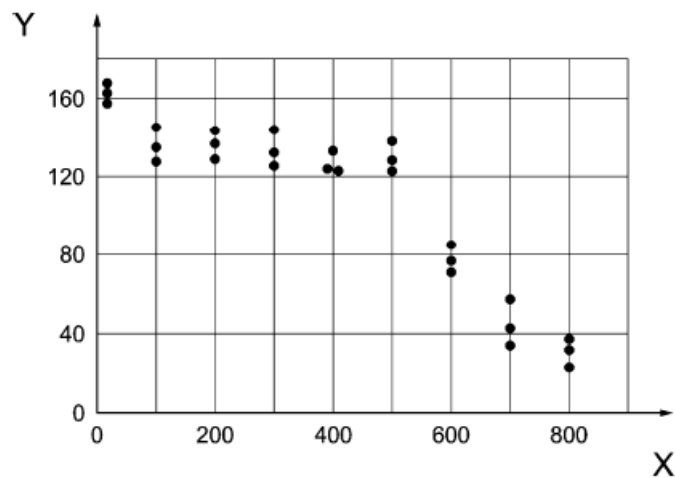
X——时间 (h) ;

Y——永久应变 ϵ_{per} (%) ;

说明2: 这个牌号的球墨铸铁化学成分为 3.4 % C, 3.1 % Si, ≤ 0.2 % Mn, 0.5 % Mo。

图A.7 在 $t = 450^\circ\text{C}$ 下的蠕变曲线以及用Norton-Bailey方程对蠕变行为进行的拟合

A.1.7 图 A.8 给出了 QTRSi40Mo10 的弹性模量E随温度的变化值 (超过 500°C 后急剧下降)。



说明:

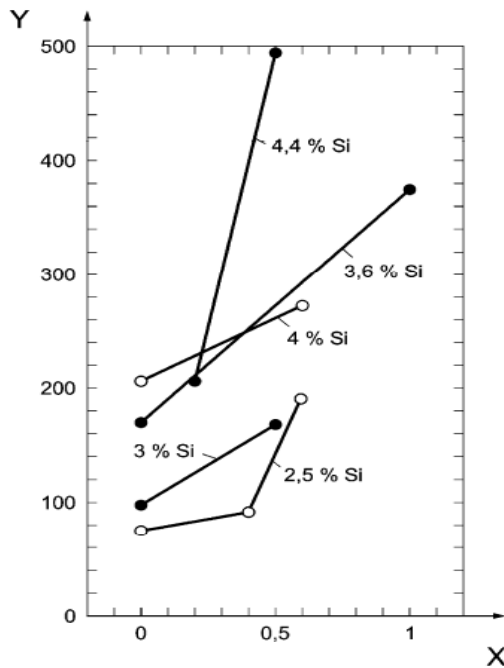
X——温度 ($^\circ\text{C}$) ;

Y——弹性模量 (GPa) 。

图A.8 Si含量 4.2%和 Mo含量 0.75%铁素体球墨铸铁件的弹性模量随温度的变化

A.2 热疲劳行为

图 A.9 显示 Si 和 Mo 元素改善了耐热低合金铁素体球墨铸铁件在200 °C和650 °C下的抗热疲劳性能（断裂前加热和冷却的循环次数）。



说明:

X——Mo 含量（重量分数，%）；

Y——断裂的热循环数量。

图A.9 低合金铁素体球墨铸铁件在 200 °C和650 °C循环下，Mo 元素含量和热疲劳寿命之间的关系

A.3 蠕变断裂行为

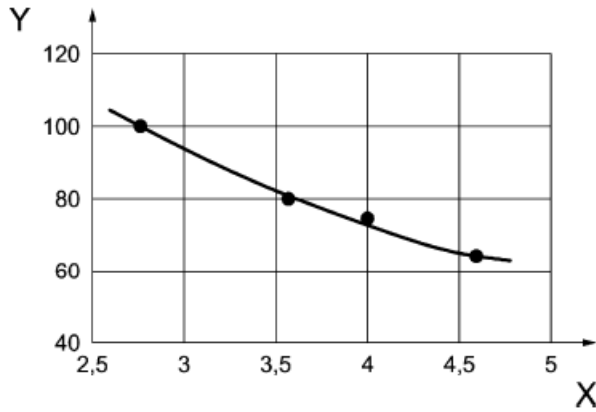
表 A.2 给出了化学成分对铸件在 540 °C下 1000 h后断裂应力的影响。

表A.2 Si 和 Mo 元素含量对铁素体球墨铸铁件高温拉伸强度和蠕变强度的影响

材料	拉伸强度 MPa			蠕变强度 MPa
	427 °C	538 °C	649 °C	538 °C下 1000 h
非合金灰铁	255	173	83	41
QT400-15	276	173	90	57
QTRS ₄	386	248	90	69
QTRS ₄ Mo ₁	421	304	131	97
QTRS ₄ Mo ₂	449	317	138	117

A.4 氧化行为

A.4.1 图 A.10 显示了 Si 含量对含有 0.9% Mo合金球墨铸铁在 800 °C空气中表面层的影响。



说明:

X——Si含量 (重量百分比, %);

Y——氧化层 (um)。

图A.10 Si含量对球墨铸铁在800 °C下空气中退火 96 h后的氧化层厚度的影响

A.4.2 表 A.3 对比了球墨铸铁在 700 °C下 2000 h后的表面层尺寸。

表A.3 在 700 °C下 2000 h后的氧化层渗透

材料	氧化渗透深度 mm
非合金灰铁	0.61
QT400-15	0.23
QTRSi4	0.05
QTRSi4Mo1	0.02
QTRSi4Mo2	0.02

A.4.3 表 A.4 给出了不同的铸铁材料在空气中退火后的氧化物渗透值。

表A.4 不同的铸铁材料在空气中退火 2000 h后的氧化层渗透参考值

材料	2000h平均氧化渗透厚度 mm			
	退火温度 700 °C	退火温度 800 °C~815 °C	退火温度 870 °C	退火温度 925 °C
1.7%Si	0.63	—	—	—
2.0%Si	—	1.79	—	—
2.5%Si	0.86	—	—	—
可锻铸铁	0.55	—	—	—

表 A.4 不同的铸铁材料在空气中退火 2000 h 后的氧化层渗透参考值(续)

材料	2000h平均氧化渗透厚度 mm			
球墨铸铁	—	—	—	—
2.2%Si ^a	0.24	—	—	—
2.4%Si,2%Mo ^a	0.19	—	—	—
2.5%Si ^a	0.19	—	—	—
2.8%Si ^a	—	0.9	—	—
3.3%Si ^a	—	0.26	—	—
4.0%Si, 0%-4%Mo ^b	0.04	0.17~0.21	0.18 ^c	—
4.0%Si, 1%Al, 1%-2%Mo ^b	—	0.15~0.20	—	—
5.0%Si, 1%Mo ^b	—	—	0.01 ^c	—
5.5%Si ^b	0.025	—	0.01 ^c	0.05 ^c
5.9%Si, 1%Mo ^b	—	—	—	—
奥氏体铸铁	—	—	—	—
HTNi20Cr2	0.95~1.36	2.2~3.1	—	—
QTRNi20Cr2	0.19~0.24	0.49~1.88	—	—
QTRNi20Cr3	0.24	0.40	—	—
QTRNi22	0.33	1.32	—	—
QTRNi20Si4Cr2	0.24	0.33	—	—
QTRNi30Cr3	0.24	0.38	—	—
QTRNi30Si5Cr5	0.025	0.15 ^d	—	—
钢	—	—	—	—
非合金轧钢	1.12	—	—	—
12 % Cr-钢	0	—	—	—
^a 正火 ^b 铁素体化 ^c 50 次退火后, 每20 h一次 ^d 接近500 h的退火				

附录 B

(资料性)

不同温度下耐热低合金铁素体球墨铸铁件的物理性能

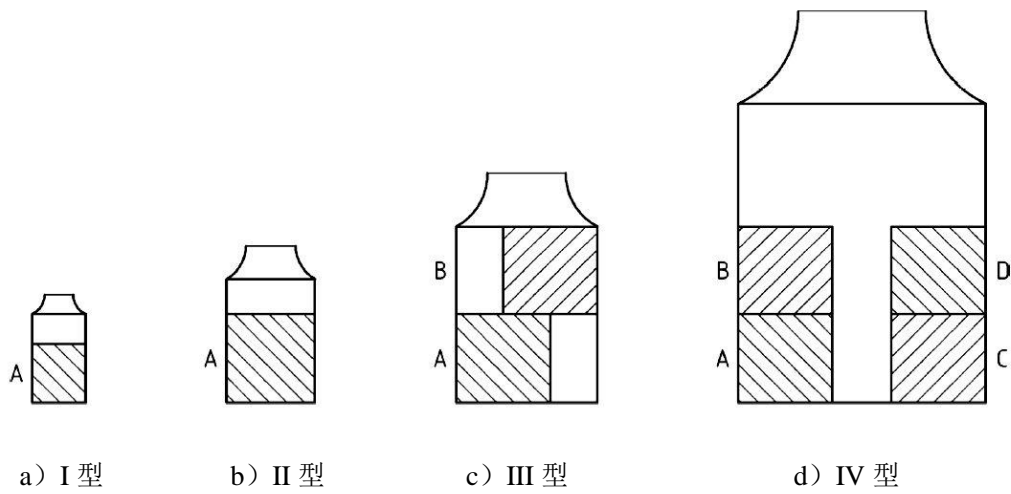
表 B.1 给出了不同温度下耐热低合金铁素体球墨铸铁件的物理性能，主要包括密度、线膨胀系数、热导率、比热容、泊松比等。

表B.1 不同温度下耐热低合金铁素体球墨铸铁件的物理性能

物理性质	标志	单位	数值
密度	ρ	g / cm^3	6.8~7.1
20℃到200℃线膨胀系数	α	$\mu\text{m} / (\text{m} \cdot \text{K})$	11~13
热导率100℃	λ	$\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$	22~26
热导率400℃			25~30
比热容20℃到100℃	c	$\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$	500~720
弹性模量20℃	E	GPa	160~180
泊松比	γ	—	0.28~0.35

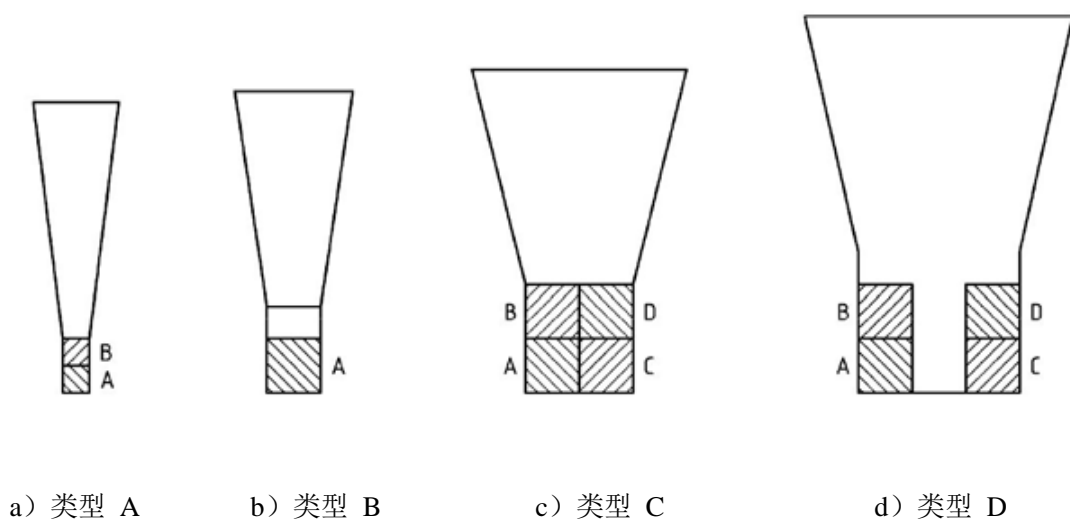
附录 C
(规范性)
铸造试块的解剖步骤

C.1 图 C.1 给出了不同类型附铸试块的试样切取位置。



图C.1 附铸试块的试样切取示意图

C.2 图 C.2 给出了单铸、并排试块的试样切取位置。



图C.2 单铸、并排试块的试样切取示意图

附录 D

(资料性)

耐热低合金铁素体球墨铸铁件热处理工艺

铸件应进行铁素体化热处理，推荐的热处理工艺参数如表 D.1 所示。

表D.1 耐热低合金铁素体球墨铸铁件热处理工艺

热处理工艺							
升温速率 (°C/h)	保温温度 (°C)	保温时间 (h)	降温速率 (°C/h)	保温温度 (°C)	保温时间 (h)	降温速率 (°C/h)	出炉温度 (°C)
≤50	900~940	≥2	≤50	680~720	≥2	≤50	200