

团 体 标 准

T/CFA XXXX—202X

重型燃气轮机用铸钢件制造技术规范

Technical specification for the manufacture of steel castings for heavy duty gas
turbines

征集意见

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

202X - XX - XX 发布

202X - XX - XX 实施

中国铸造协会 发布

目 次

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 前言 | III |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 1 |
| 3 术语、定义 | 1 |
| 4 人员 | 3 |
| 5 铸造工艺 | 3 |
| 5.1 补缩设计 | 3 |
| 5.2 冷铁 | 3 |
| 5.3 试块 | 3 |
| 5.4 工艺吊钩（把） | 3 |
| 5.5 浇注系统 | 3 |
| 5.6 其他 | 3 |
| 6 造型 | 4 |
| 7 冶炼、浇注 | 4 |
| 7.1 冶炼工艺 | 4 |
| 7.2 浇注工艺 | 5 |
| 8 落砂精整、冒口切割 | 5 |
| 9 热处理 | 6 |
| 9.1 热处理工艺及要求 | 6 |
| 9.2 加热设备 | 8 |
| 9.3 冷却设备 | 9 |
| 9.4 工艺材料 | 10 |
| 9.5 过程控制 | 10 |
| 10 缺陷清除和焊接 | 10 |
| 10.1 类型 | 10 |
| 10.2 焊接程序 | 11 |
| 10.3 焊接 | 12 |
| 10.4 铸件预热 | 12 |
| 10.5 焊接参数选择及控制 | 13 |
| 10.6 层间清理 | 13 |
| 10.7 焊后清理 | 13 |
| 10.8 焊后热处理 | 13 |
| 11 记录 | 13 |
| 参考文献 | 14 |
| 表 1 不同材料牌号铸钢件软化退火或预备热处理工艺制度 | 5 |

T/GFA XXXX—202X

| | | |
|-----|------------------------|----|
| 表 2 | 不同材料牌号铸钢件热处理工艺制度 | 6 |
| 表 3 | 热处理有效加热区温度均匀性要求 | 9 |
| 表 4 | 同材质焊接材料..... | 11 |
| 表 5 | 焊补坡口方案..... | 12 |

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铸钢工作委员会提出。

本文件由中国铸造协会归口。

本文件起草单位：XXX、XXX。

本文件主要起草人：XXX、XXX。

本文件为首次发布。

重型燃气轮机用铸钢件制造技术规范

1 范围

本文件规定了重型燃气轮机用铸钢件生产的人员、铸造工艺、造型、冶炼、浇注、落砂、冒口切割、热处理和焊接要求。

本文件适用于重型燃气轮机铸钢件的砂型铸造生产。

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 3375—1994 焊接术语

GB/T 5611 铸造术语

GB/T 7232—2023 金属热处理 术语

GB/T 8121—2012 热处理工艺材料 术语

GB/T 9452 热处理炉有效加热区测定方法

GB/T 11351 铸件重量公差

GB/T 15135—2018 燃气轮机 词汇

GB/T 15169 钢熔化焊焊工技能评定

GB/T 16923 钢件的正火与退火

GB/T 16924 钢件的淬火与回火

GB/T 18591 焊接 预热温度、道间温度及预热维持温度的测量指南

GB/T 19805 焊接操作工技能评定

GB/T 19866—2005 焊接工艺规程及评定的一般原则

GB/T 30824 燃气热处理炉温度均匀性测试方法

GB/T 32541 热处理质量控制体系

GB/T 40800 铸钢件焊接工艺评定规范

GB/T 42124.3—2025 产品几何技术规范（GPS） 模制件的尺寸和几何公差 第3部分：铸件尺寸公差、几何公差与机械加工余量

JB/T 3223 焊接材料质量管理规程

3 术语、定义

GB/T 5611、GB/T 7232、GB/T 8121、GB/T 9452 和GB/T 15135 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

重型燃气轮机 heavy-duty gas turbine

采用厚壁结构，重量及功率比较大，多用于联合循环发电的燃气轮机。

[来源：GB/T 15135—2018，2.13]

3.2

温度均匀性 temperature uniformity

热处理炉有效加热区内温度的均匀程度，指有效加热区内各测试点温度相对于设定温度的最大偏差。

注：通常表示为“±℃”

[来源：GB/T 9452—2023，3.2]

3.3

有效加热区 qualified work zone

在加热炉中，经温度检测而确定的满足热处理工艺规定温度及温度均匀性的工作空间。

[来源：GB/T 9452—2023，3.3]

3.4

热处理工艺材料 technological materials for heat treatment

为了保证对金属材料或工件进行加热、保温、冷却等工艺过程的实施，使其获得预期的化学成分、组织结构与性能所需要的各类物质。

[来源：GB/T 8121—2012，2.1]

3.5

淬火 quench hardening

铸件加热奥氏体化后以适当方式冷却获得马氏体或（和）贝氏体组织的热处理工艺。

[来源：GB/T 7232—2023，4.3.1，有修改]

3.6

正火 normalizing

铸件加热奥氏体化后在空气中或其他介质中冷却获得以珠光体组织为主的热处理工艺。

[来源：GB/T 7232—2023，4.2.1，有修改]

3.7

回火 tempering

将淬火后的铸件加热（或冷却）到 A_{C1} 以下某一温度，保温一定时间，然后冷却到室温的热处理工艺。

[来源：GB/T 7232—2023，4.4.1，有修改]

3.8

焊接工艺规范（程） welding procedure specification, WPS

指导焊接的技术细则文件。包括对焊接接头、母材、焊接材料、焊接位置、预热、电特性、操作技术等内容进行详细的规定，以保证焊接质量的再现性。

[来源：GB/T 3375—1994，2.5，有修改]

3.9

焊接工艺评定报告 welding procedure qualification record, WPQR

记录评定焊接工艺过程中，有关试验数据及结果的文件。

[来源：GB/T 19866—2005，3.3]

4 人员

- 4.1 从事重型燃气轮机铸钢件（以下简称铸钢件）生产相关作业人员（如冒口切割、气刨、热处理、焊接等）应经过培训、考核，取证上岗。
- 4.2 焊工应按照 GB/T 15169、GB/T 19805 及其他等同标准参加焊工技术考核，并取得相应资质证书。

5 铸造工艺设计

5.1 补缩设计

铸钢件结合面以及内腔法兰部位，质量等级要求高，凝固补缩设计时，应保证此部位无缩孔、疏松等缺陷，并且满足UT、RT等检测等级要求。

5.2 冷铁

- 5.2.1 明、暗冒口之间应利用冷铁进行分区。
- 5.2.2 法兰 R 角部位在不影响补缩梯度的情况下可设置随形冷铁。
- 5.2.3 不允许使用内冷铁。

5.3 试块

- 5.3.1 铸件重量小于 500kg 或最大壁厚小于 50mm，推荐使用单铸试块。
- 5.3.2 试块不应放在加工面上或补贴面上。
- 5.3.3 环形结构铸件，试块不应放在内腔。
- 5.3.4 试块与试块间距不应小于 200mm。

5.4 工艺吊钩（把）

- 5.4.1 工艺吊钩（把）应设计在非加工面上。
- 5.4.2 铸件高度大于 1500mm，应分层设计工艺吊钩（把）。
- 5.4.3 工艺吊钩（把）尾端与铸件间距不应小于 100mm。
- 5.4.4 工艺吊钩（把）不应大于铸件壁厚，避免形成热节。当工艺吊钩（把）无法避免大于铸件壁厚时，应采取措施（如加补贴等形式）。

5.5 浇注系统

- 5.5.1 浇注系统设计推荐采用底注式设计系统，避免铸件钢液在型腔内产生紊流现象。
- 5.5.2 内浇口进流速度应控制在 0.35m/s~0.5m/s 之间，铸件壁厚在 120mm 以上时，进流速度允许最高不超过 0.6m/s。

5.6 其他

- 5.6.1 燃气轮机机组铸件的重量应按照 GB/T 11351 的规定执行，重量按照 MT11~14 级控制。

5.6.2 燃气轮机铸件的非加工面公差应按照 GB/T 42124.3-2025 的规定执行，公差按照 DCTG13 ~DCTG14 级控制。

5.6.3 铸造工艺所使用的冒口以及明冒口覆盖剂，应避免使用易产生碳、铝或其他不良元素的材料。

6 造型

6.1 模型与砂箱之间的吃砂量应大于 200mm，防止跑火。

6.2 冒口颈 R 角、内浇口周围、厚大法兰部位、排气孔等部位铬矿砂厚度应大于 100mm。

6.3 砂型表面宜刷涂锆英粉涂料，涂料层厚度宜控制在 0.8mm-1.0mm。

7 冶炼、浇注

7.1 冶炼工艺

7.1.1 冶炼与精炼工艺选择

7.1.1.1 推荐采用电炉+炉外精炼冶炼工艺。合金元素多的材质应增加一道真空精炼方式，也可采用需方同意的其它冶炼方法冶炼

7.1.1.2 炉衬材料应采用中性或碱性材料，也可以采用需方同意的其它等效炉衬材料。

7.1.1.3 应根据燃机铸件订货材料规范和技术协议要求选择金属炉料，入炉的金属材料应干燥无油无易爆物，有成分分析复验，必要时应进行放射性元素分析。

7.1.2 原材料选择与质量控制

7.1.2.1 生铁推荐采用 Si 含量较低的 L04；生铁表面应无严重锈蚀、水汽；生铁中不得夹杂砂块、炉渣等杂物。

7.1.2.2 废钢表面应干燥、无油、无密封及易燃易爆品，5mm 以下轻薄料占比应低于 10%，废钢中不应含有放射性元素。

7.1.2.3 返回料表面氧化渣、砂子、保温砖、磁管等杂质应清理干净。

7.1.2.4 合金表面应干燥、无油、无密封及易燃易爆品，粒度应介于 10mm~100mm。

7.1.3 电弧炉（EAF）冶炼

7.1.3.1 EAF 冶炼进脱碳量应 $\geq 0.3\%$ ，确保钢中非金属夹杂物及有害气体充分去除。

7.1.3.2 吹氧脱碳过程中应流掉多余氧化渣并造新渣脱 P，P 含量应 $\leq 0.01\%$ 后扒掉高磷渣重新造渣。

7.1.3.3 EAF 吹氧结束后进行还原脱氧，脱氧剂推荐使用 Al、Si、Mn 等，控制游离氧含量应 $\leq 10\text{ppm}$ 。

7.1.3.4 出钢前应对钢包进行预热，预热温度应 $\geq 400^\circ\text{C}$ 。

7.1.3.5 出钢不得散流，快速出钢。

7.1.4 碳钢及低合金钢 LF 冶炼

7.1.4.1 LF 冶炼应先进行脱氧、脱硫。

7.1.4.2 脱氧剂推荐采用 Al、CaSi；控制游离 O $\leq 5\text{ppm}$ 、S $\leq 0.008\%$ 。

7.1.4.3 推荐合金加入顺序为 Mo、W、Ni、Cr、Mn、Si、V、Nb 等。

7.1.4.4 应控制 LF 精炼过程的氩气搅拌强度与时间。在合金加入后取样前应采用较大功率吹氩 > 15min，确保成分均匀；全部冶炼过程结束前应采用弱搅拌，时间 > 5min，进一步去除夹杂物，出钢前全氧 ≤ 50ppm。

7.1.5 高合金钢、不锈钢的 LF+VOD 精炼

7.1.5.1 LF 冶炼应先进行脱氧、脱硫。

7.1.5.2 脱氧剂推荐使用 Al、CaSi，控制游离 O ≤ 5ppm、S ≤ 0.008%。

7.1.5.3 进 VOD 前应先加入 Cr、Mo、W、Ni、Co 等不易氧化合金，C 含量建议控制在 0.3%~0.4%。

7.1.5.4 VOD 钢包自由空间应控制在 900mm~1200mm。

7.1.5.5 根据入炉钢水碳含量合理调整真空度和调整氧气流量。

7.1.5.6 吹氧结束后，高真空度进行碳脱氧，时间应 ≥ 15min。

7.1.5.7 碳脱氧结束后加入还原剂及造渣剂，推荐加入 Al 进行脱氧，活性石灰进行造渣。

7.1.5.8 根据化学成分检测结果，按需加入 Si、Mn、V、Nb 等易氧化合金，成分及温度合格后方可出钢浇注。

7.2 浇注工艺

7.2.1 浇注前应用热风机提前对砂型进行预热，驱赶潮气，根据铸件大小规定预热时间和温度。

7.2.2 不同材质、吨位铸件采用 magma 模拟工艺浇注温度与浇注时间，浇注温度偏差 ≤ ±5℃，浇注时间 ≤ ±10s。

7.2.3 铸钢件材料浇注过程中推荐采用惰性气体保护钢液。

8 落砂精整、冒口切割

8.1 铸件温度冷却至 300℃ 以下进行落砂。

8.2 在去除冒口以及多余的金属之前，应对铸件进行软化退火或消应力热处理。各材质的软化退火及消应力热处理应按表 1 的要求执行。

8.3 可以通过气割或电弧气刨方式去除铸件冒口、浇道、拉筋等多余金属。切割过程中的温度控制按表 1 的要求执行。

表1 不同材料牌号铸钢件软化退火或预备热处理工艺制度

| 序号 | 材料牌号 | 切割温度 | 工序名称 | 热处理工艺 | | | |
|----|--|-------|-------|-------------|-----------|---------------------------|------------------|
| | | | | 升温速率 ℃/h | 保温温度 ℃ | 保温时间 h | 冷却方式及速率 ℃/h |
| 1 | ZG230-450 | ≥100℃ | 预备热处理 | ≤110 | 200~350 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min3h | 炉内缓慢冷却， 速率≤50 |
| 2 | ZG15Cr1Mo ZG17Cr1Mo ZG15Cr2Mo1 ZG17Cr2Mo1 | ≥150℃ | 预备热处理 | ≤110 | 250~450 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min3h | 炉内缓慢冷却， 速率≤50 |

表 1 (续)

| 序号 | 材料牌号 | 切割温度 | 工序名称 | 热处理工艺 | | | |
|----|--|--------|-------|--------------|------------|---------------------------|------------------|
| | | | | 升温速率 °C/h | 保温温度 °C | 保温时间 h | 冷却方式及速率 °C/h |
| 3 | ZG15Cr1Mo1V ZG17Cr1Mo1V | ≥250°C | 预备热处理 | ≤110 | 250~450 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min3h | 炉内缓慢冷却, 速率≤50 |
| 4 | ZG13Cr9Mo1VNbN ZG23Cr12MoV ZG15Cr13 ZG15Cr13Ni1Mo | ≥250°C | 退火 | ≤50 | 760~1050 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min3h | 炉内缓慢冷却, 速率≤50 |

8.4 附铸试块应切割出豁口,方便热处理后将附铸试块从铸件本体上进行分离,并在分离的试样上敲上铸件编号,用照片或视频的方式予以留档,以便后续试样同铸件随炉再进行热处理用。

9 热处理

9.1 热处理工艺及要求

9.1.1 不同材料牌号的铸钢件热处理工艺制度应按表 2 的要求执行。

表2 不同材料牌号铸钢件热处理工艺制度

| 序号 | 材料牌号 | 工序名称 | 热处理工艺 | | | |
|----|-------------------------|------------------|----------|---------|--------------------------------|---|
| | | | 升温速率°C/h | 保温温度°C | 保温时间 h | 冷却方式及冷却速率°C/h |
| 1 | ZG230-450 | 正火 | ≤110 | 880~910 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min3h | 强制空气冷却至最高 200°C |
| | | 回火 | ≤110 | 600~650 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min8h | 空冷至室温 |
| | | 去应力 ^a | ≤75 | 580~650 | 按缺陷最大深度 mm*2min/mm+1h,min3h | 炉内缓慢冷却,速率≤70 |
| 2 | ZG15Cr1Mo/Z G17Cr1Mo | 正火/淬火 | ≤110 | 920~960 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min3h | 液体冷却或强制空气冷 却,1h内至少冷到650°C, 然后继续风冷到最高 200°C |
| | | 回火 | ≤110 | 675~730 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min8h | 炉内缓慢冷却,速率≤75 |
| | | 去应力 ^a | ≤75 | 660~700 | 按缺陷最大深度 mm*2min/mm+1h,min3h | 炉内缓慢冷却,速率≤70 |

表 2 (续)

| 序号 | 材料牌号 | 工序名称 | 热处理工艺 | | | |
|----|---------------------------------|--------------------|---------|-----------|--------------------------------|---------------------------------------|
| | | | 升温速率℃/h | 保温温度℃ | 保温时间 h | 冷却方式及冷却速率℃/h |
| 3 | ZG15Cr2Mo1 /ZG17Cr2Mo1 | 正火/淬火 | ≤110 | 920~960 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min3h | 液体冷却或强制空气冷却,1h内至少冷到650℃,然后继续风冷到最高200℃ |
| | | 回火 | ≤110 | 690~730 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min8h | 炉内缓慢冷却,速率≤75 |
| | | 去应力 ^a | ≤75 | 660~700 | 按缺陷最大深度 mm*2min/mm+1h,min3h | 炉内缓慢冷却,速率≤70 |
| 4 | ZG15Cr1Mo1V /ZG17Cr1Mo1 V | 正火/淬火 ^b | ≤110 | 920~960 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min3h | 液体冷却或强制空气冷却,1h内至少冷到650℃,然后继续风冷到最高200℃ |
| | | 回火 | ≤110 | 700~740 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min8h | 炉内缓慢冷却,速率≤75 |
| | | 去应力 ^a | ≤75 | 680~720 | 按缺陷最大深度 mm*2min/mm+1h,min3h | 炉内缓慢冷却,速率≤70 |
| 5 | ZG13Cr9Mo1V NbN | 正火 | ≤50 | 1040~1070 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min3h | 强制空气冷却,1h内至少冷到650℃,然后继续风冷到最高200℃ |
| | | 回火 | ≤50 | 730~750 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min8h | 炉内缓慢冷却,速率≤40 |
| | | 去应力 | ≤50 | 730~750 | 按缺陷最大深度 mm*2min/mm+1h,min3h | 炉内缓慢冷却,速率≤40 |
| 6 | ZG23Cr12MoV | 正火 | ≤50 | 1030~1080 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min3h | 强制空气冷却,1h内至少冷到650℃,然后继续风冷到最高200℃ |
| | | 回火 | ≤50 | 700~750 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min8h | 炉内缓慢冷却,速率≤40 |
| | | 去应力 ^a | ≤50 | 680~730 | 按缺陷最大深度 mm*2min/mm+1h,min3h | 炉内缓慢冷却,速率≤40 |

表 2 (续)

| 序号 | 材料牌号 | 工序名称 | 热处理工艺 | | | |
|---|-------------------|------------------|-----------|----------|--------------------------------|------------------------------------|
| | | | 升温速率 °C/h | 保温温度 °C | 保温时间 h | 冷却方式及冷却速率 °C/h |
| 7 | ZG15Cr13 | 正火 | ≤50 | ≥950 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min3h | 强制空气冷却,1h内至少冷到650°C,然后继续风冷到最高200°C |
| | | 回火 | ≤50 | 680-740 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min8h | 炉内缓慢冷却,速率≤40 |
| | | 去应力 ^a | ≤50 | ≥650 | 按缺陷最大深度 mm*2min/mm+1h,min3h | 炉内缓慢冷却,速率≤40 |
| 8 | ZG15Cr13Ni1 Mo | 正火 | ≤50 | 960~1000 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min3h | 强制空气冷却,1h内至少冷到650°C,然后继续风冷到最高200°C |
| | | 回火 | ≤50 | 685-715 | 按最大壁厚 mm*2min/mm,Min8h | 炉内缓慢冷却,速率≤40 |
| | | 去应力 ^a | ≤50 | 685-715 | 按缺陷最大深度 mm*2min/mm+1h,min3h | 炉内缓慢冷却,速率≤40 |
| ^a 去应力热处理温度应低于材料的回火温度。 ^b ZG15Cr1Mo1V 材料铸钢件为了得到更好的力学性能,宜采用淬火+回火热处理工艺制度。 注 1: “/” 为或者关系。 注 2: 以上温度和时间均以炉偶连接的仪表显示为准。 | | | | | | |

9.1.2 铸件的正火/淬火+回火热处理,应在铸件冒口去除之后进行。

9.1.3 铸件粗加工后或焊接后应进行应力消除。如果粗加工后进行了正火/淬火+回火热处理,则粗加工后的去应力热处理可以省略。

9.1.4 铸钢件的去应力重复热处理次数不应超过 3 次,试块应与铸件一同进行所有热处理过程,留存铸件与试样装炉照片或视频,以便后续的检查与分析。

9.1.5 试块切取应做好试块标记并妥善保存备用试块。

9.2 加热设备

9.2.1 一般要求

采用国家鼓励的热处理设备,包括真空炉、可控气氛炉、全纤维炉衬电加热炉、晶体管感应加热装置、等离子热处理炉等。重型燃气轮机铸钢件推荐使用可控气氛炉中的燃气式热处理炉或全纤维炉衬电加热炉。

9.2.2 温度均匀性

9.2.2.1 热处理有效加热区的温度均匀性不应低于表 3 中的 V 级要求。

表3 热处理有效加热区温度均匀性要求

| 热处理炉类型 | 有效加热区温度均匀性 °C | 控温仪表准确度级别 级 | 记录仪表准确度级别 级 |
|--------|------------------|----------------|----------------|
| I | ±3 | 0.1 | 0.2 |
| II | ±5 | 0.2 | 0.3 |
| III | ±8 | 0.5 | 0.5 |
| IV | ±10 | 0.5 | 0.5 |
| V | ±15 | 0.5 | 0.5 |
| VI | ±20 | 0.5 | 0.5 |
| VII | ±25 | 1.0 | 1.0 |

9.2.2.2 热处理炉应至少每隔6个月校验一次有效加热区的温度均匀性。

9.2.2.3 热处理炉出现下列情况时，均应进行温度均匀性校验：

- a) 首次应用于生产的热处理炉；
- b) 经过大修或技术改造的热处理炉；
- c) 需要改变保温精度时；
- d) 控温或记录热电偶位置变更时；
- e) 当出现其他异常情况时。

9.2.2.4 热处理炉有效加热区的测定应按GB/T 9452的规定执行。

9.2.2.5 热处理炉炉温均匀性的校验方法按照GB/T 30824的规定执行。

9.2.2.6 供方应保留炉温均匀性检测报告，检测报告包含以下内容：

- a) 热处理炉的类别及其温度偏差；
- b) 有效工作区的尺寸；
- c) 核准的温度范围；
- d) 本次检测日期；
- e) 下次检测日期。

9.2.3 炉温精度

9.2.3.1 炉温精度不应低于设定温度的0.3%或±1.1°C（以高的为准）。

9.2.3.2 热处理控温仪表应至少每6个月校验一次。

9.2.3.3 校验时测量热电偶与仪表热电偶距离应小于80mm，校验应在加热炉处于热稳定的状态下进行。

9.2.3.4 测量热电偶应符合GB/T 30824的规定。

9.2.3.5 热处理过程所使用的其他仪表（如流量计、炉压仪表等）应在检定的有效期内。

9.3 冷却设备

9.3.1 淬火槽

9.3.1.1 淬火槽的位置宜靠近热处理炉。

9.3.1.2 淬火槽的容积应满足热处理工艺的要求。

9.3.1.3 淬火槽一般应有循环搅拌和冷却装置，可选用循环泵、机械搅拌或喷射对流装置等。

9.3.1.4 淬火槽应配备槽盖，停用时加盖防护，并应及时清除淬火槽中的悬浮物及沉淀物。

9.3.1.5 淬火槽应装有分辨率不大于 3°C 的测温仪表。

9.3.1.6 淬火过程中，淬火介质的温度应满足热处理工艺要求。

9.3.2 风机

9.3.2.1 热处理风机的功率应满足热处理工艺中对铸钢件冷却速率的规定。

9.3.2.2 风机应定期保养和检修。

9.4 工艺材料

9.4.1 应选择合格的工艺材料。

9.4.2 加热介质和冷却介质不应影响铸件化学成分。

9.4.3 淬火介质及折光仪应按照 GB/T 32541 的规定进行定期检查，若冷却特性相对于初始冷却特性的变化大于 10% 时，应及时调整或更换淬火介质。

9.5 过程控制

9.5.1 装炉

9.5.1.1 铸件应在冷态下进行装炉，并对铸件装炉状态进行拍照或视频留存。

9.5.1.2 铸件应平稳放置在炉子的有效加热区内。

9.5.1.3 同炉铸件之间的间距不小于 500mm。

9.5.1.4 炉内工装放置位置应能保证铸件均匀加热或冷却。

9.5.1.5 装炉不应过载，保证达到最小的正火/淬火冷却速度要求。

9.5.2 升温及保温

9.5.2.1 铸件热处理的升温及保温参照 GB/T 16923、GB/T 16924 的规定执行。

9.5.2.2 对于尺寸较大、壁厚比差别较大的铸件，淬火/正火时推荐采用分段升温的方式。

9.5.3 冷却

9.5.3.1 若无特殊规定，淬火前的淬火液温度应控制在 10°C~40°C。

9.5.3.2 采用液体冷却或者风冷的铸件，应冷至 200°C 以下时才允许出槽或停止风冷。

9.5.3.3 铸件液冷或风冷结束后 3 小时内应及时进炉回火。

9.5.4 记录

若无特殊规定，热处理过程的记录及资料保存按照 GB/T 32541 的规定执行。

10 缺陷清除和焊接

10.1 类型

10.1.1 工艺焊接

在设计图纸上定义为铸件，铸造工艺需要设计为工艺孔，热处理前需要补全而进行的焊接。

10.1.2 缺陷返修

供应商为修复缺陷使之满足规定的铸件质量而需要执行的焊修。

10.2 焊接程序

10.2.1 焊接工艺评定

10.2.1.1 “焊接工艺规范（WPS）、焊接工艺评定报告（WPQR）应满足 GB/T 40800 或其他等效工艺规程的要求，铸件焊评试板的尺寸及厚度依据铸件的壁厚等效测算而定，报需方批准认可。

10.2.1.2 在任何情况下，都应采用下列规定：

- a) WPS、WPQR需与买方达成一致意见；
- b) 供方应在WPS、WPQR焊工资质认证等文件得到需方批准后进行焊接作业；
- c) 焊接工艺评定报告应至少包含如下内容：
 - 焊材；
 - 焊接工艺；
 - 实际焊接参数的记录；
 - 焊后热处理工艺及记录；
 - 力学性能检测报告；
 - 无损检测报告。

10.2.2 焊工资质

10.2.2.1 参加焊接的焊工，应按照国家相关标准和行业相关规定进行考试，考试合格后在有效期内担任焊接工作。

10.2.2.2 满足产品焊接要求。

10.2.3 焊接材料

10.2.3.1 要求

填充材料应满足铸钢件交货技术要求、订单或图纸要求。焊条使用前应按说明书进行烘干，焊丝使用前应进行清理，焊接材料的保存参考 JB/T 3223 执行。

10.2.3.2 选择

焊接材料应根据铸钢件的化学成分、力学性能、使用工况等条件选用。铸件本体焊接及同种材质结构焊缝用焊接材料参见表 4。

表4 同材质焊接材料

| 类别 | 母材 | 手工电弧焊焊条 | 气体保护焊焊丝 | 氩弧焊丝 |
|----|------------|---------------------------|---------|---------|
| 1 | ZG230-450 | E7015(E5015) | ER70S-6 | ER70S-6 |
| 2 | ZG17Cr1Mo | E5515-1CM/E5515-B2 (R307) | ER55-B2 | ER55-B2 |
| 3 | ZG17Cr2Mo1 | E62XX-2C1M/E6015-B3(R407) | ER62-B3 | ER62-B3 |

表 4 (续)

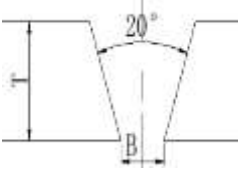
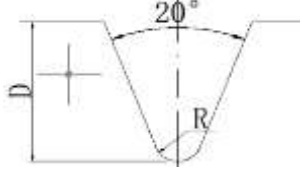
| 类别 | 母材 | 手工电弧焊焊条 | 气体保护焊焊丝 | 氩弧焊丝 |
|----|----------------|--|-------------|-------------|
| 4 | ZG17Cr1Mo1V | E5515-1CMV/E5515-B2-VNb (R337)/E5515-1CMWV (R327) | ER55-B2-MnV | ER55-B2-MnV |
| 5 | ZG13Cr9Mo1VNbN | E9015-B9 | ER90S-G | ER90S-G |
| 6 | ZG23Cr12MoV | EN ISO 3580-A - E CrMoWV12 B | -- | -- |
| 7 | ZG15Cr1Mo | E5515-1CM/E5515-B2 (R307) | ER55-B2 | ER55-B2 |
| 8 | ZG15Cr1MoV | E5515-1CMV/E5515-B2-VNb (R337)/E5515-1CMWV (R327) | ER55-B2-MnV | ER55-B2-MnV |
| 9 | ZG15Cr13 | E410-15 | -- | -- |

10.3 焊接

10.3.1 焊前准备包括铸件缺陷清理，坡口准备，边缘部分应圆滑过渡。焊接区域不得存有氧化皮、涂漆、油脂、污垢等。

10.3.2 挖缺后的缺陷坑表面平整光滑，焊补坡口方案可参照表 5 执行。

表5 焊补坡口方案

| 贯穿性坡口形状 | | | 非贯穿性坡口形状 | | |
|---------|---------|---|----------|---------|---|
| 壁厚T | 底部宽度B | 简图 | 坡口深度D | 底部圆角R | 简图 |
| <25 mm | ≥6.5 mm |  | <25 mm | ≥4 mm |  |
| ≥25 mm | ≥13 mm | | ≥25 mm | ≥6.5 mm | |

10.3.3 清除焊接区及周围不小于 20mm 范围内的所有异物，如油污、氧化皮等杂物。

10.3.4 缺陷清理部位应采用磁粉或者着色探伤的方式进行检测确认，确认合格后方能达到焊接状态。

10.3.5 施焊前铸件应进行预热，预热温度、加热方法、加热范围等可参考 GB/T 18591 的规定执行。

10.3.6 施焊过程应严格按照焊接工艺规范（程）参数执行。

10.3.7 生产现场应有有效措施控制焊条焊丝的使用，不应用错焊条或焊丝。

10.4 铸件预热

10.4.1 铸件热处理的升温及焊后热处理参照 GB/T 16923、GB/T 16924 的规定执行。

10.4.2 对于尺寸较大、壁厚比差别较大的重型燃气轮机铸件，预热温度控制采用分段升温的方式。

10.4.3 重型燃气轮机铸钢件焊接前可采用天然气等可燃性气体或在热处理炉进行加热处理。

10.4.4 焊前预热及焊接停滞过程中，铸件焊补区温度应保持最低预热温度以上。

10.5 焊接参数选择及控制

10.5.1 焊接过程中的参数应符合焊接工艺规程及相关工艺文件要求，开始焊接之前，焊接参数应进行调试，不得在坡口以外的任何母材部位引弧或燃弧。

10.5.2 应留有完整的缺陷性质、位置、尺寸大小等内容的详细记录，重大缺陷需提前报告需方，应按相应材质的补焊工艺规程操作，详细记录整个挖补施焊过程的焊接工艺参数。

10.5.3 施焊过程中的层间温度需满足焊接工艺规范要求。

10.6 层间清理

10.6.1 采用机械工具在焊缝道间或层间进行清理打磨，消除应力，并及时排出夹渣、气孔等缺陷。

10.6.2 可采用机械切削或打磨方式对焊瘤、余高等影响焊接质量的缺陷做修整。

10.7 焊后清理

10.7.1 采用机械工具对整条焊缝的焊渣和残留焊剂进行清理，避免焊件在使用中焊渣和金属飞溅物脱落而造成不良的后果。另外焊件不应覆有飞溅物、焊剂、氧化皮、熔渣或其他外来物。

10.7.2 焊后清理打磨操作不应使焊缝尺寸或母材厚度低于图样要求。

10.8 焊后热处理

10.8.1 焊接结束后，铸件应及时保温除氢或进行焊后热处理。

10.8.2 最终焊后热处理后，如有少量缺陷需焊接，焊后应局部去应力热处理并做记录。

11 记录

应按质量体系控制要求妥善保管所有铸钢件对应的生产记录，记录内容应包括但不限于：

- a) 造型记录
- b) 冶炼记录；
- c) 浇注记录；
- d) 热处理记录；
- e) 铸造补焊记录；
- f) 其他记录。

参 考 文 献

- [1] GB/T 3375—1994 焊接术语
 - [2] GB/T 7232—2023 金属热处理工艺 术语
 - [3] GB/T 8121—2012 热处理工艺材料 术语
 - [4] GB/T 15135—2018 燃气轮机 词汇
 - [5] GB/T 19866—2005 焊接工艺规程及评定的一般原则
-