



中华人民共和国国家标准

GB/T 44684—2024

超临界二氧化碳锅炉

Supercritical carbon dioxide boilers

2024-09-29 发布

2025-04-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 锅炉范围界定 2

 4.1 锅炉范围 2

 4.2 锅炉本体 3

 4.3 锅炉范围内管道 3

 4.4 安全附件和仪表 3

5 型号和参数 4

 5.1 型号 4

 5.2 参数 4

6 一般要求 5

7 材料 5

8 设计 5

 8.1 集箱与管道 5

 8.2 气冷壁 6

 8.3 高温受热面 6

 8.4 分流省煤器 6

9 制造和检验 7

10 安全附件及仪表 7

 10.1 安全阀及其排放管路 7

 10.2 温度测量装置 7

 10.3 压力测量装置 8

 10.4 联锁保护 8

 10.5 其他 8

11 产品铭牌、涂装、包装和随机文件 9

 11.1 产品铭牌 9

 11.2 涂装和包装 9

 11.3 随机文件 9

12 安装与运行 9

附录 A（资料性） 超临界二氧化碳物性数据 10

附录 B（资料性） 超临界二氧化碳布雷顿循环发电机组启动前吹管方法 37

 B.1 预吹扫 37

 B.2 闭式稳压吹管 39

B.3 吹管质量标准 40

附录 C（资料性） 超临界二氧化碳锅炉工质采样方法 41

 C.1 方法提要 41

 C.2 采样系统 41

 C.3 采样条件 41

 C.4 采样步骤 42

附录 D（资料性） 二氧化碳品质要求和检测方法 43

 D.1 二氧化碳的品质要求 43

 D.2 二氧化碳品质检测方法 43

参考文献 46



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。

本文件由全国锅炉压力容器标准化技术委员会（SAC/TC 262）提出并归口。

本文件起草单位：中国特种设备检测研究院、哈尔滨锅炉厂有限责任公司、西安热工研究院有限公司、哈尔滨工业大学、华北电力大学、哈尔滨电气科学技术有限公司、上海发电设备成套设计研究院有限责任公司、华中科技大学、东方电气集团东方锅炉股份有限公司、西安交通大学。

本文件主要起草人：李军、刘光奎、钱公、魏国华、高建民、黄莺、向军、李红智、白文刚、杜谦、朱忠亮、谢敏、苏宏亮、陈新中、王硕、董鹤鸣、闫凯、郝维勋、赵广播、张乃强、朱幼君、曾洁、梁志远、赵加星。

超临界二氧化碳锅炉

1 范围

本文件规定了超临界二氧化碳锅炉（以下简称锅炉）的材料、设计、制造和检验、安全附件及仪表、安装与运行等方面的通用技术要求。

本文件适用于采用超临界二氧化碳作为工质，额定出口工质温度大于或等于 500℃、额定出口工作压力大于或等于 14 MPa、单台出力小于或等于 50 MW 的锅炉。

2 规范性引用文件

下列文件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。

- GBZ 1 工业企业设计卫生标准
- GBZ 2.1 工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分：化学有害因素
- GBZ/T 223 工作场所有毒气体检测报警装置设置规范
- GB/T 2900.48 电工名词术语 锅炉
- GB/T 8174 设备及管道绝热效果的测试与评价
- GB 13223 火电厂大气污染物排放标准
- GB 13271 锅炉大气污染物排放标准
- GB/T 16507（所有部分） 水管锅炉
- GB/T 17357 设备及管道绝热层表面热损失现场测定 热流计法和表面温度法
- GB/T 22395 锅炉钢结构设计规范
- GB/T 23938 高纯二氧化碳
- GB/T 34348 电站锅炉技术条件
- DL/T 435 电站锅炉炉膛防爆规程
- NB/T 10939 锅炉用材料入厂验收规则
- NB/T 47043 锅炉钢结构制造技术规范
- NB/T 47049 管式空气预热器制造技术条件
- NB/T 47055 锅炉涂装和包装通用技术条件
- NB/T 47060 回转式空气预热器

3 术语和定义

GB/T 2900.48 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超临界二氧化碳 **supercritical carbon dioxide**

压力大于 7.38 MPa、温度大于 31.1℃ 的二氧化碳。

3.2

布雷顿循环 **brayton cycle**

以气体为工质，先后经过绝热压缩、定压吸热、绝热膨胀及定压冷却四个过程的热力循环。

3.3

超临界二氧化碳锅炉 **supercritical carbon dioxide boiler**

以超临界二氧化碳作为工质的锅炉。

3.4

给气 feed gas

符合一定质量要求而被输入锅炉的二氧化碳气体。

3.5

主气 main gas

给气经锅炉加热后进入高压透平做功的二氧化碳气体。

3.6

再热气 reheat gas

将高压透平排气经锅炉再次加热进入低压透平做功的二氧化碳气体。

3.7

气冷壁 **gas-cooled wall**

敷设在锅炉炉膛四周以二氧化碳气体为冷却工质的辐射受热面。

3.8

分流省煤器 **shunt economizer**

利用从给气中分流出的部分二氧化碳气体吸收炉膛排烟中的热量以降低排烟温度的对流受热面。

4 锅炉范围界定

4.1 锅炉范围

典型超临界二氧化碳布雷顿循环发电系统流程图见图1。锅炉范围包括锅炉本体、锅炉范围内管道、安全附件和仪表等。

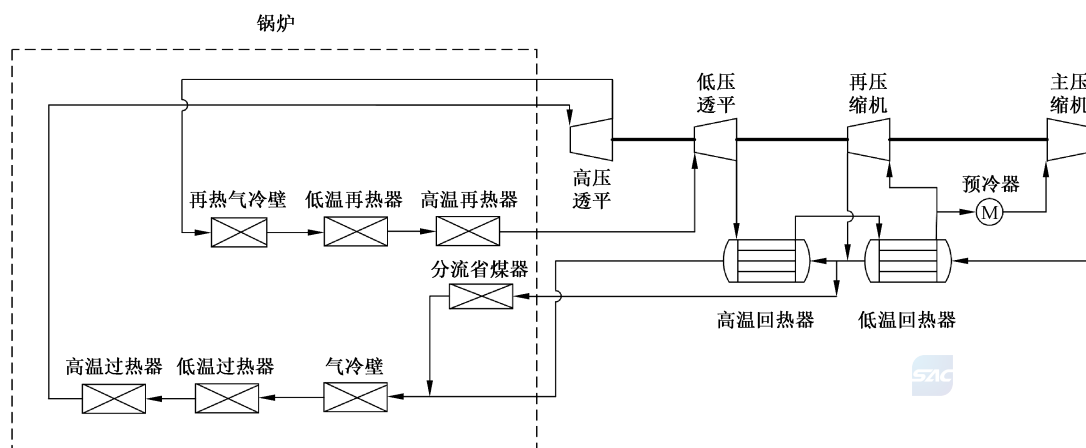


图 1 典型超临界二氧化碳布雷顿循环发电系统流程图

4.2 锅炉本体

锅炉本体是指由受热面、集箱及其连接管道，炉膛、燃烧设备、空气预热器、炉墙、烟（风）道、构架（包括平台和扶梯）等所组成的整体。

4.3 锅炉范围内管道

锅炉范围内管道包括给气管道、主气管道、再热气管道以及一次门以内（不含阀门）的支路管道，见图2。

注：给气管道指主压缩机出口止回阀至气冷壁进口集箱以内的管道；主气管道指末级过热器出口集箱至透平高压主气阀（对于母管制运行的锅炉，至母管前第一个阀门）以内的管道；再热气冷段管道指透平排气止回阀至再热器进口集箱以内的管道；再热气热段管道指再热器出口集箱至透平低压主气阀以内的管道。

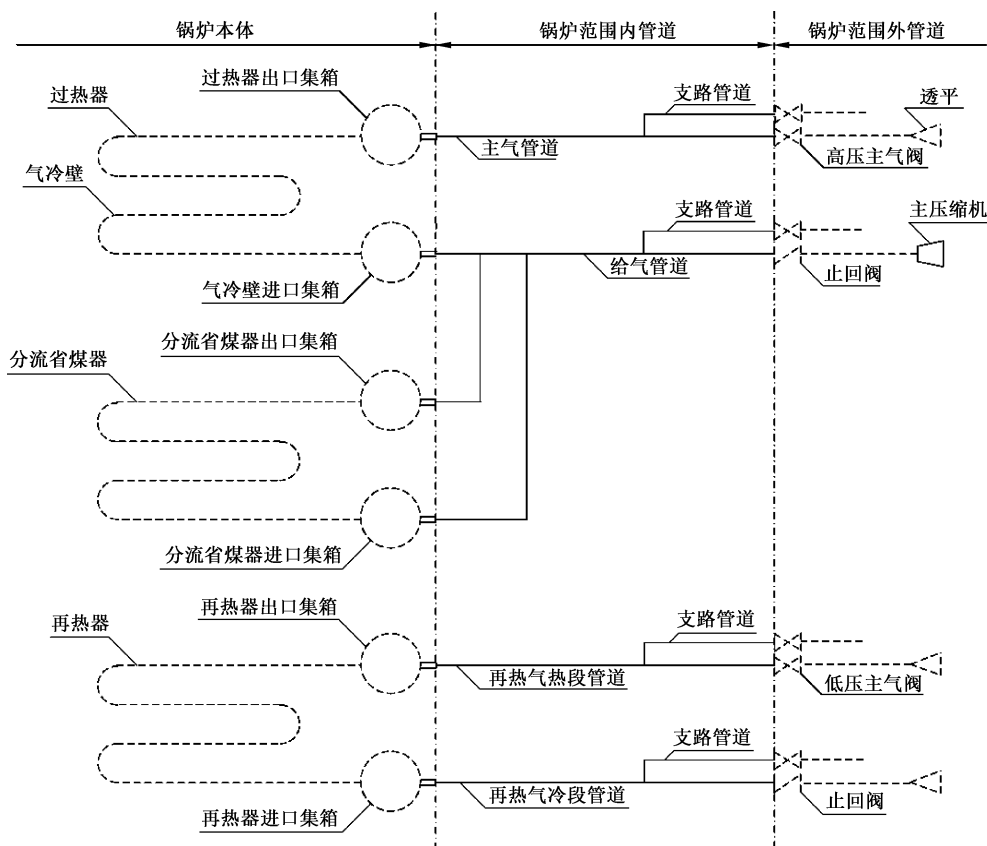


图 2 超临界二氧化碳锅炉的锅炉范围内管道示意图

4.4 安全附件和仪表

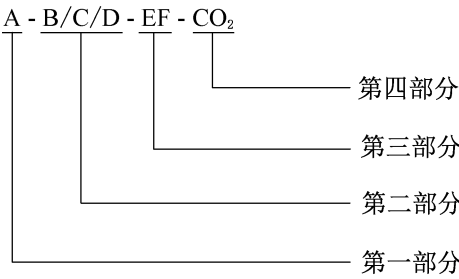
安全附件和仪表，包括安全阀，二氧化碳泄漏报警装置，压力测量、温度测量、二氧化碳浓度测量等装置（仪表），安全保护装置，排污装置等。

5 型号和参数

5.1 型号

5.1.1 编制方法

5.1.1.1 锅炉的产品型号由四个部分组成，各部分之间用短横线相连，表示制造单位、工质名称、额定参数、燃料种类等，形式如下：



5.1.1.2 产品型号第一部分：

A——锅炉制造单位代号，由若干字母表示。

5.1.1.3 产品型号第二部分由 B、C 和 D 三部分组成，中间用斜线（/）分开，其中：

B——锅炉额定主气流量，用阿拉伯数字表示（整数），单位为吨每小时（t/h）；

C——锅炉额定主气压力（表压），用阿拉伯数字表示（保留 1 位小数点），单位为兆帕（MPa）；

D——锅炉额定主气温度，用阿拉伯数字表示，单位为摄氏度（℃），如有再热，其温度值在额定主气温度后用斜线（/）分隔并标出。

5.1.1.4 产品型号第三部分由 E 和 F 两部分组成，其中：

E——锅炉设计燃料代号，用汉语拼音字母表示，按下列规定：

- a) 燃“煤”炉，用“M”表示；
- b) 燃“油”炉，用“Y”表示；
- c) 燃“气”炉，用“Q”表示；
- d) 燃“其他燃料”炉，用“T”表示；
- e) 对于电加热锅炉，用“D”表示。

对于原设计已考虑可燃用两种燃料的锅炉，可用两种燃料代号并列。如：可燃“煤”和“油”锅炉，用“MY”表示；可燃“油”和“气”锅炉，用“YQ”表示。

F——锅炉设计顺序号，一般用阿拉伯数字或字母表示，具体由各单位自行确定。

5.1.1.5 产品型号第四部分为工质名称，用 CO₂ 表示。

5.1.2 编制示例

代号为××的某单位制造的超临界二氧化碳锅炉，其额定主气流量 290 t/h、额定主气压力 20 MPa、额定主气温度 600 ℃、再热气出口温度 600 ℃，设计燃料为天然气，设计顺序号为 001，其型号为：××-290/20/600/600-Q001-CO₂。

5.2 参数

锅炉额定工况主要技术参数如下：

- a) 锅炉主气流量，单位为吨每小时（t/h）；

- b) 工质压力（表压），单位为兆帕（MPa），包括给气压力、额定主气压力、额定再热器进口压力、额定再热器出口压力；
- c) 工质温度，单位为摄氏度（℃），包括给气温度、额定主气温度、额定再热器进口温度、额定再热器出口温度；
- d) 排烟温度，单位为摄氏度（℃）；
- e) 锅炉热效率，%。

6 一般要求

- 6.1 锅炉的材料、设计、制造、检验、安装与运行应符合 GB/T 16507（所有部分）的要求。
- 6.2 锅炉钢结构的设计应符合 GB/T 22395 的要求，钢结构的制造应符合 NB/T 47043 的要求。
- 6.3 锅炉配套回转式预热器材料、设计应符合 NB/T 47060 的要求，管式预热器材料、设计应符合 NB/T 47049 的要求。
- 6.4 锅炉的燃烧、烟风系统的设计与设备的配置应符合 GB/T 34348 的要求。
- 6.5 锅炉内充装的二氧化碳工质质量应符合 GB/T 23938 的要求。
- 6.6 锅炉污染物排放应符合 GB 13223 或 GB 13271 的要求。
- 6.7 锅炉设计时应采取有效措施控制锅炉出口烟气温度。
- 6.8 锅炉受压元件、部件的连接应采用焊接连接。
- 6.9 锅炉应采取有效的工质减温方式，保证锅炉气温可控。
- 6.10 在锅炉启动过程中，锅炉各部件的工作压力不应高于工作温度下的二氧化碳饱和气压力。在正常工况下，应高于二氧化碳临界压力。
- 6.11 锅炉应合理设置排污装置，保证排污通畅。

7 材料

- 7.1 应按照 GB/T 16507.2 的规定选择锅炉用材料（包括焊接材料）。
- 7.2 锅炉设计选材时，应根据锅炉频繁调峰产生的疲劳问题采取有效解决措施。
- 7.3 锅炉受热面管设计选材时，烟气侧管子外壁温度应符合壁温适用范围，并留有裕度。
- 7.4 气冷壁材料宜选用 9%~12%Cr 马氏体耐热钢或奥氏体不锈钢，高温受热面材料宜选用奥氏体不锈钢。不宜对奥氏体不锈钢管的内表面进行内喷丸处理。
- 7.5 锅炉制造、安装单位应按 NB/T 10939 规定的项目对锅炉用材料进行验收，合格后才能使用。

8 设计

8.1 集箱与管道

- 8.1.1 管道的材料、规格应根据系统流量、压力、温度参数经过技术经济性比较确定。
- 8.1.2 管道系统载荷统计应按照管道和集箱各种工况中可能出现的最大二氧化碳密度进行核算。
- 8.1.3 设计时合理选择管道弯曲半径以减小流动阻力。管道弯头在空间结构条件允许情况下，管道弯曲半径宜采用不小于 3 倍管道外径。
- 8.1.4 超临界二氧化碳放空管道设计时应考虑冷冻效应，防止管道发生脆性破裂。
- 8.1.5 工作温度不同的管道采用三通结构汇合时应有减少温差应力措施，可在支管处采用套筒结构。
- 8.1.6 凡与主气管道、再热气管道、给气管道、分流省煤器进口管道等锅炉管道直接连接的联箱、集箱等，均应能够承受管道热膨胀所给予的推力及力矩。

8.1.7 气冷壁高度最低的集箱应设置防止启动初期二氧化碳液化的放气管路，管路出口应连接到安全地点。

8.1.8 分流省煤器入口管道宜设置调节阀，出口管道的设计温度应能满足分流省煤器在运行中可能出现的最恶劣工况。

8.2 气冷壁

8.2.1 燃煤锅炉炉膛截面大小应根据截面热负荷、传热特性和气冷壁冷却条件等因素进行确定。燃油、燃气锅炉的炉膛截面大小应满足燃烧器火焰扩展所需空间。当采用室燃炉时，应保证任何工况下火焰不冲刷气冷壁壁面及气冷壁内其他受热面部件，且各受热面不超温。

8.2.2 气冷壁工质流向（上升、下降、水平方向）宜根据壁面热负荷分布情况选择，使气冷壁工质低温区与炉膛内高热负荷区合理匹配。

8.2.3 气冷壁应进行全工况二氧化碳热动力计算，相关物性数据见附录 A，热负荷曲线宜参照水管锅炉曲线。任何工况下，管子的金属壁温应低于钢材的最高允许使用温度，管壁外表面温度低于材料抗氧化温度。

8.2.4 强度计算时，计算温度取值应包含热偏差、流量偏差等因素造成的管壁温度偏差，并留有裕度。

8.2.5 气冷壁采用管子加鳍片形式的膜式壁或其他可靠密封形式，管间扁钢材料与管子材料成分应相近。气冷壁的管内可采用传热强化技术，以提升单位面积的吸热量。

8.2.6 气冷壁采用膜式壁时，同一鳍片相连接的两根相邻管子应控制金属温度偏差，避免鳍片撕裂。

8.2.7 气冷壁设计中应根据启动初期受热不均、局部温度较低导致个别管子内产生的二氧化碳液化现象，采取措施使管子能够得到充分冷却。

8.2.8 气冷壁宜采用全疏水结构，放水点装在最低处，应能放空气冷壁管及其集箱内的水或液态二氧化碳。

8.3 高温受热面

8.3.1 锅炉受热面宜选用悬吊结构。锅炉运行时应按照预定方向膨胀，且不应造成膨胀受阻和变形。

8.3.2 高温受热面宜选择水平布置的屏式或管束结构，当采用垂直吊挂结构时，应采取清除水压试验存留的积水。

8.3.3 为增大受热面二氧化碳通流面积，通过减少横向截距增加管子数量时，应不堵灰且不加重磨损。

8.3.4 受结构限制，当单独布置一级受热面会导致二氧化碳流动阻力过大时，可采用分流设计，沿烟气流程将不同位置上受热面并联连接，两个并联受热面阻力、温升应相近。

8.3.5 强度计算时，应根据烟温偏差、流量偏差等因素造成的管壁温度偏差，对不同的管段分别进行壁温核算。

8.3.6 设计中应保证各段受热面在启动、正常运行、停炉、事故等情况下采取有效措施保证金属壁面不超温，按预定方向膨胀且不受阻碍。

8.3.7 各级受热面最高点处应设有排放空气的管路和阀门，低点设置疏水管路和阀门；管路的引出处应采用加厚的管座（管接头），管路应至少设置串联的两个阀门，其中一个阀门应靠近管路引出处的管接头。

8.4 分流省煤器

8.4.1 分流省煤器一般采用逆流布置，应保持其传热端差（进口烟温与出口气温差值）不为负值。

8.4.2 分流省煤器的设计流量宜根据热力系统优化计算确定，任何情况下，受热面应能得到充分冷却。

8.4.3 分流省煤器应与并联的受热面温升和压降匹配，出口工质温度应与汇入管路工质温度相近，出口压力高于汇入点工质压力。

8.4.4 受热面管子和材料的壁温核算应按照可能出现的最低流量、最高进口温度中最恶劣工况校核金属

壁面温度。

9 制造和检验

9.1 当炉膛整体组装出厂时，其组装后应满足以下要求：

- a) 整体炉膛全部密封；
- b) 整体炉膛的宽度和深度尺寸偏差为 ± 15 mm；
- c) 整体炉膛高度（上下集箱中心线）偏差为 ± 10 mm。

9.2 锅炉制造过程中的无损检测应符合 GB/T 16507.6，还应满足以下要求。

- a) 9%~12%Cr马氏体耐热钢和奥氏体不锈钢材质的气冷壁管屏的管子与扁钢的角焊缝，首屏焊制后进行100%渗透检测；其余管屏起弧、停弧、补焊等位置进行100%渗透检测，并抽查总长不低于10%的角焊缝进行渗透检测。
- b) 气冷壁管屏管子与承载附件（耳板、刚性梁附件等）的焊缝进行100%渗透检测。
- c) 对于9%~12%Cr马氏体耐热钢和奥氏体不锈钢材质的气冷壁管屏，成排弯前后对管屏弯曲位置受拉面管子与扁钢角焊缝进行100%渗透检测。

9.3 焊接接头力学性能试验应符合 GB/T 16507.6 要求。

9.4 水压试验应符合 GB/T 16507.6 的要求。

10 安全附件及仪表

10.1 安全阀及其排放管路

10.1.1 每台锅炉过热器和再热器系统均应装设全启式安全阀，宜至少设置1个控制式安全阀（气动式、液动式和电磁式）。在锅炉启动和停炉过程中，二氧化碳工质存在接近三相点的状态，安全阀的设计、选型不应造成因二氧化碳冷冻效应引起的阀门堵塞和失效。

10.1.2 过热器或再热器系统锅炉安全阀全部开启时排量之和应大于锅炉设计循环流量，气冷壁、高温受热面装设的安全阀排量应能保证受热面足够的冷却。

10.1.3 安全阀应可靠密封，安全阀动作时无二氧化碳气体泄漏。阀门密封件应具有耐二氧化碳气体腐蚀的性能。

10.1.4 安全阀排放管路应直通安全地点，并加装消音器。排放管路应通畅且雨水不能进入。

10.2 温度测量装置

10.2.1 宜在管道中选用带套管形式热电偶实时监测系统温度，测点不应装在设备和管道死角处和受冲击的地方，相邻两个热电偶套管间距应不小于所在管道直径的2倍，套管材料应与管道材料一致。测量以下温度：

- a) 锅炉入口给气温度；
- b) 分流省煤器进出口气温；
- c) 气冷壁进出口气温；
- d) 每级受热面进出口气温；
- e) 存在温差汇合管道汇合前后气温。

10.2.2 应监测锅炉金属壁温状况，测量金属壁温应采用与被测表面紧密接触的表面式热电偶，对于高温受热面、气冷壁出口应装设在管子穿出炉墙100 mm以内，对于气冷壁背火面应装设在背火面管壁上并用保温材料包裹。测量以下温度：

- a) 高温受热面炉外金属壁温；

- b) 炉膛气冷壁出口金属壁温；
- c) 炉膛气冷壁燃烧器区背火侧金属壁温。

10.2.3 应对锅炉烟气温度进行测量，包括：

- a) 空气预热器进口烟气温度；
- b) 排烟温度；
- c) 炉膛出口烟气温度；
- d) 再循环烟气（如有）出口温度。

10.3 压力测量装置

10.3.1 锅炉工质系统的就地压力表宜选用弹簧管压力表，其远传压力表宜选用压力变送器，对以下压力进行测量：

- a) 锅炉入口给气压力；
- b) 分流省煤器进出口压力；
- c) 炉膛气冷壁进出口压力；
- d) 每级受热面进出口压力；
- e) 汇合管道汇合前后压力。

10.3.2 烟风系统宜选用具备远传功能的压力变送器或压力开关，对以下压力进行测量：

- a) 炉膛出口压力；
- b) 空气预热器进出烟气压力；
- c) 空气预热器进出风压力；
- d) 再循环烟气（如有）压力。

10.4 联锁保护

10.4.1 锅炉工质系统应至少装设以下保护装置：

- a) 任何情况下，循环流量低于启动流量时的报警装置；
- b) 工质流程气冷壁出口温度超过规定值时的报警装置；
- c) 给气断气超过规定时间时自动切断锅炉的燃料供应装置；
- d) 锅炉出口主气或再热气超压报警装置；
- e) 锅炉出口主气或再热气超温报警装置；
- f) 高温受热面管壁温度报警装置。

10.4.2 锅炉燃烧系统、烟风系统保护设置应符合 GB/T 16507.7 的规定。

10.4.3 室燃锅炉防爆装置的装设应符合 DL/T 435 的规定。

10.5 其他

10.5.1 应在锅炉本体周围环境中建立二氧化碳气体传感器报警系统，环境浓度超过 GBZ 2.1 规定的时间加权平均容许浓度前应能报警，报警装置设置符合 GBZ/T 223 的规定。

10.5.2 在厂房内布置锅炉设备时，应在锅炉房地面及低洼处等布置事故管道，并符合 GBZ 1 的要求。事故通风管道应与二氧化碳检测报警装置设置联锁。

10.5.3 空气预热器前尾部烟道宜对烟气中二氧化碳含量在线检测，以监测炉内二氧化碳受热面泄漏。

10.5.4 锅炉放气阀、安全阀等放气装置打开时应有报警提示。

11 产品铭牌、涂装、包装和随机文件

11.1 产品铭牌

11.1.1 锅炉产品应在明显的位置装设金属铭牌，铭牌上至少包括以下项目：

- a) 制造单位名称；
- b) 锅炉型号；
- c) 设备代码；
- d) 产品编号；
- e) 额定主气流量（t/h）或者额定热功率（MW）；
- f) 额定主气压力（MPa）；
- g) 额定主气温度（℃）；
- h) 额定再热气进口、出口温度（℃）和进口、出口压力（MPa）；
- i) 制造日期（年、月）。

11.1.2 散件出厂的锅炉，应在主要受压部件的封头、端盖或筒体适当位置上标注产品标记。

11.2 涂装和包装

锅炉涂装和包装应满足 NB/T 47055 的规定。

11.3 随机文件

产品出厂时，锅炉制造单位应提供与安全有关的技术资料，至少包括以下内容：

- a) 锅炉图样，包括总图、安装图和主要受压元件图；
- b) 受压元件的强度计算书或者计算结果汇总表；
- c) 安全阀排放量的计算书或者计算结果汇总表；
- d) 热力计算书或者热力计算结果汇总表；
- e) 烟风阻力计算书或者计算结果汇总表；
- f) 锅炉质量证明书，包括产品合格证（含锅炉产品数据表）、金属材料质量证明、焊接质量证明和水（耐）压试验证明等；
- g) 锅炉安装说明书和使用说明书；
- h) 受压元件与设计文件不符的变更资料；
- i) 过热器、再热器壁温计算书或者计算结果汇总表；
- j) 热膨胀系统图；
- k) 各项安全保护装置整定值。

产品合格证上应有检验责任工程师、质量保证工程师签章和产品质量检验专用章（或单位公章）。

12 安装与运行

12.1 锅炉安装完成后，应进行工作压力下的气压试验。

12.2 新建、扩建、改建机组投运前，应进行吹管，吹管方法见附录 B。

12.3 锅炉热效率测试参照 GB/T 10184 执行，锅炉散热损失按 GB/T 8174 和 GB/T 17357 测量。

12.4 新建机组试运行期间和锅炉正式运行后，应对工质进行检测分析。检测的采样方法见附录 C，检测方法和工质品质要求见附录 D。

附 录 A

(资料性)

超临界二氧化碳物性数据

超临界二氧化碳物性数据见表 A.1。

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
14.0	100	301.73	470.08	0.039 6	0.870	1.322 7
14.0	120	256.67	506.10	0.037 1	0.980	1.118 3
14.0	140	227.21	537.15	0.036 4	1.097	1.007 4
14.0	160	205.84	565.49	0.036 5	1.217	0.939 3
14.0	180	189.33	592.19	0.037 0	1.340	0.896 4
14.0	200	176.02	617.86	0.037 9	1.467	0.860 1
14.0	220	164.95	642.83	0.039 0	1.598	0.833 9
14.0	240	155.54	667.34	0.040 2	1.731	0.814 2
14.0	260	147.40	691.54	0.041 5	1.868	0.799 1
14.0	280	140.25	715.54	0.042 8	2.007	0.787 3
14.0	300	133.90	739.41	0.044 1	2.150	0.777 8
14.0	320	128.20	763.21	0.045 4	2.296	0.770 2
14.0	340	123.06	786.98	0.046 8	2.444	0.764 0
14.0	360	118.38	810.74	0.048 1	2.596	0.758 8
14.0	380	114.10	834.54	0.049 5	2.750	0.754 5
14.0	400	110.17	858.37	0.050 9	2.907	0.750 9
14.0	420	106.53	882.26	0.052 3	3.067	0.747 8
14.0	440	103.16	906.22	0.053 6	3.230	0.745 1
14.0	460	100.01	930.26	0.055 0	3.395	0.742 8
14.0	480	97.08	954.37	0.056 4	3.563	0.740 7
14.0	500	94.33	978.57	0.057 8	3.733	0.739 0
14.0	520	91.75	1 002.85	0.059 1	3.906	0.737 4
14.0	540	89.32	1 027.23	0.060 5	4.081	0.736 0
14.0	560	87.03	1 051.69	0.061 8	4.258	0.734 7
14.0	580	84.86	1 076.25	0.063 2	4.438	0.733 5
14.0	600	82.80	1 100.89	0.064 5	4.621	0.732 5
14.5	100	317.22	465.83	0.040 8	0.851	1.358 0

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
14.5	120	268.61	502.78	0.038 0	0.955	1.139 6
14.5	140	237.08	534.42	0.037 0	1.066	1.021 7
14.5	160	214.37	563.17	0.037 0	1.182	0.949 6
14.5	180	196.91	590.19	0.037 4	1.301	0.904 5
14.5	200	182.88	616.10	0.038 3	1.423	0.866 4
14.5	220	171.25	641.27	0.039 4	1.549	0.838 8
14.5	240	161.38	665.94	0.040 5	1.678	0.818 1
14.5	260	152.86	690.27	0.041 7	1.810	0.802 3
14.5	280	145.39	714.39	0.043 0	1.945	0.790 0
14.5	300	138.76	738.35	0.044 3	2.083	0.780 1
14.5	320	132.83	762.24	0.045 6	2.224	0.772 2
14.5	340	127.47	786.09	0.047 0	2.367	0.765 7
14.5	360	122.60	809.92	0.048 3	2.514	0.760 3
14.5	380	118.15	833.78	0.049 7	2.663	0.755 8
14.5	400	114.06	857.67	0.051 1	2.815	0.752 0
14.5	420	110.28	881.62	0.052 4	2.970	0.748 8
14.5	440	106.78	905.62	0.053 8	3.127	0.746 0
14.5	460	103.52	929.70	0.055 2	3.286	0.743 6
14.5	480	100.47	953.85	0.056 5	3.449	0.741 5
14.5	500	97.62	978.09	0.057 9	3.613	0.739 6
14.5	520	94.94	1 002.41	0.059 2	3.780	0.738 0
14.5	540	92.42	1 026.82	0.060 6	3.950	0.736 5
14.5	560	90.05	1 051.31	0.061 9	4.121	0.735 2
14.5	580	87.80	1 075.90	0.063 3	4.295	0.734 0
14.5	600	85.67	1 100.57	0.064 6	4.471	0.732 9
15.0	100	332.85	461.64	0.042 1	0.835	1.392 6
15.0	120	280.66	499.47	0.038 8	0.933	1.160 9
15.0	140	247.03	531.71	0.037 7	1.039	1.036 0
15.0	160	222.95	560.88	0.037 5	1.150	0.960 0
15.0	180	204.52	588.20	0.037 8	1.265	0.912 8
15.0	200	189.76	614.35	0.038 6	1.383	0.872 6
15.0	220	177.56	639.71	0.039 7	1.505	0.843 7
15.0	240	167.23	664.54	0.040 8	1.629	0.822 1

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
15.0	260	158.32	689.01	0.042 0	1.757	0.805 6
15.0	280	150.53	713.24	0.043 2	1.887	0.792 7
15.0	300	143.62	737.31	0.044 5	2.021	0.782 5
15.0	320	137.44	761.28	0.045 8	2.157	0.774 2
15.0	340	131.87	785.20	0.047 2	2.296	0.767 4
15.0	360	126.82	809.11	0.048 5	2.438	0.761 8
15.0	380	122.19	833.03	0.049 9	2.582	0.757 1
15.0	400	117.94	856.98	0.051 2	2.729	0.753 2
15.0	420	114.02	880.97	0.052 6	2.879	0.749 8
15.0	440	110.39	905.03	0.053 9	3.031	0.746 9
15.0	460	107.01	929.15	0.055 3	3.185	0.744 4
15.0	480	103.86	953.34	0.056 7	3.342	0.742 2
15.0	500	100.90	977.61	0.058 0	3.502	0.740 3
15.0	520	98.13	1 001.97	0.059 4	3.663	0.738 6
15.0	540	95.52	1 026.41	0.060 7	3.827	0.737 1
15.0	560	93.06	1 050.93	0.062 1	3.993	0.735 7
15.0	580	90.74	1 075.55	0.063 4	4.162	0.734 5
15.0	600	88.53	1 100.25	0.064 7	4.332	0.733 3
15.5	100	348.56	457.51	0.043 4	0.822	1.425 8
15.5	120	292.81	496.20	0.039 7	0.913	1.182 2
15.5	140	257.05	529.01	0.038 4	1.014	1.050 4
15.5	160	231.57	558.59	0.038 1	1.121	0.970 5
15.5	180	212.15	586.22	0.038 2	1.232	0.921 0
15.5	200	196.66	612.61	0.039 0	1.346	0.879 0
15.5	220	183.88	638.16	0.040 0	1.463	0.848 7
15.5	240	173.08	663.15	0.041 1	1.584	0.826 2
15.5	260	163.79	687.75	0.042 3	1.707	0.808 9
15.5	280	155.67	712.10	0.043 5	1.834	0.795 5
15.5	300	148.48	736.27	0.044 8	1.963	0.784 8
15.5	320	142.06	760.33	0.046 1	2.095	0.776 2
15.5	340	136.27	784.33	0.047 4	2.229	0.769 1
15.5	360	131.02	808.30	0.048 7	2.367	0.763 3
15.5	380	126.23	832.28	0.050 0	2.507	0.758 5

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
15.5	400	121.82	856.29	0.051 4	2.649	0.754 4
15.5	420	117.76	880.34	0.052 7	2.794	0.750 9
15.5	440	114.00	904.44	0.054 1	2.941	0.747 9
15.5	460	110.50	928.60	0.055 4	3.091	0.745 3
15.5	480	107.23	952.83	0.056 8	3.243	0.743 0
15.5	500	104.18	977.14	0.058 2	3.397	0.741 0
15.5	520	101.31	1 001.53	0.059 5	3.554	0.739 2
15.5	540	98.61	1 026.00	0.060 8	3.713	0.737 6
15.5	560	96.07	1 050.56	0.062 2	3.874	0.736 2
15.5	580	93.67	1 075.20	0.063 5	4.037	0.734 9
15.5	600	91.39	1 099.93	0.064 8	4.202	0.733 8
16.0	100	364.26	453.46	0.044 7	0.810	1.457 1
16.0	120	305.03	492.95	0.040 7	0.896	1.203 2
16.0	140	267.12	526.34	0.039 0	0.992	1.064 8
16.0	160	240.23	556.32	0.038 6	1.094	0.981 0
16.0	180	219.81	584.26	0.038 6	1.201	0.929 4
16.0	200	203.57	610.88	0.039 4	1.311	0.885 4
16.0	220	190.21	636.62	0.040 3	1.425	0.853 7
16.0	240	178.94	661.77	0.041 4	1.541	0.830 2
16.0	260	169.26	686.51	0.042 5	1.661	0.812 3
16.0	280	160.80	710.96	0.043 7	1.784	0.798 3
16.0	300	153.34	735.23	0.045 0	1.909	0.787 2
16.0	320	146.67	759.38	0.046 3	2.037	0.778 2
16.0	340	140.67	783.46	0.047 6	2.167	0.770 9
16.0	360	135.22	807.50	0.048 9	2.300	0.764 9
16.0	380	130.25	831.54	0.050 2	2.436	0.759 8
16.0	400	125.69	855.61	0.051 6	2.574	0.755 5
16.0	420	121.49	879.70	0.052 9	2.715	0.751 9
16.0	440	117.60	903.85	0.054 2	2.858	0.748 8
16.0	460	113.98	928.06	0.055 6	3.003	0.746 1
16.0	480	110.60	952.33	0.056 9	3.150	0.743 7
16.0	500	107.44	976.68	0.058 3	3.300	0.741 7
16.0	520	104.48	1 001.10	0.059 6	3.452	0.739 8

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
16.0	540	101.70	1 025.60	0.061 0	3.606	0.738 2
16.0	560	99.07	1 050.19	0.062 3	3.762	0.736 7
16.0	580	96.59	1 074.86	0.063 6	3.920	0.735 4
16.0	600	94.24	1 099.61	0.064 9	4.081	0.734 2
16.5	100	379.88	449.52	0.045 9	0.801	1.485 9
16.5	120	317.28	489.75	0.041 6	0.880	1.223 8
16.5	140	277.23	523.69	0.039 7	0.972	1.079 1
16.5	160	248.92	554.07	0.039 1	1.070	0.991 5
16.5	180	227.49	582.31	0.039 0	1.173	0.937 8
16.5	200	210.49	609.16	0.039 8	1.279	0.891 8
16.5	220	196.54	635.10	0.040 7	1.389	0.858 8
16.5	240	184.80	660.40	0.041 7	1.502	0.834 3
16.5	260	174.72	685.27	0.042 8	1.618	0.815 6
16.5	280	165.94	709.84	0.044 0	1.737	0.801 1
16.5	300	158.19	734.21	0.045 2	1.858	0.789 6
16.5	320	151.27	758.44	0.046 5	1.982	0.780 3
16.5	340	145.05	782.59	0.047 8	2.109	0.772 7
16.5	360	139.42	806.71	0.049 1	2.238	0.766 4
16.5	380	134.28	830.81	0.050 4	2.370	0.761 2
16.5	400	129.56	854.93	0.051 7	2.504	0.756 7
16.5	420	125.21	879.08	0.053 1	2.641	0.753 0
16.5	440	121.19	903.27	0.054 4	2.779	0.749 8
16.5	460	117.45	927.52	0.055 7	2.920	0.747 0
16.5	480	113.96	951.83	0.057 1	3.063	0.744 5
16.5	500	110.70	976.22	0.058 4	3.209	0.742 4
16.5	520	107.65	1 000.67	0.059 8	3.356	0.740 5
16.5	540	104.77	1 025.21	0.061 1	3.506	0.738 8
16.5	560	102.06	1 049.82	0.062 4	3.657	0.737 3
16.5	580	99.50	1 074.52	0.063 7	3.811	0.735 9
16.5	600	97.08	1 099.30	0.065 0	3.966	0.734 6
17.0	100	395.34	445.70	0.047 2	0.793	1.512 0
17.0	120	329.54	486.60	0.042 5	0.866	1.243 9
17.0	140	287.36	521.06	0.040 5	 0.953	1.093 3

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
17.0	160	257.62	551.84	0.039 7	1.047	1.002 1
17.0	180	235.18	580.37	0.039 5	1.147	0.946 2
17.0	200	217.42	607.46	0.040 1	1.250	0.898 2
17.0	220	202.87	633.59	0.041 0	1.356	0.863 9
17.0	240	190.66	659.05	0.042 0	1.466	0.838 4
17.0	260	180.19	684.05	0.043 1	1.578	0.819 0
17.0	280	171.07	708.73	0.044 2	1.693	0.803 9
17.0	300	163.03	733.19	0.045 5	1.811	0.792 0
17.0	320	155.87	757.51	0.046 7	1.932	0.782 3
17.0	340	149.44	781.74	0.048 0	2.055	0.774 4
17.0	360	143.61	805.92	0.049 3	2.180	0.767 9
17.0	380	138.29	830.09	0.050 6	2.308	0.762 5
17.0	400	133.42	854.26	0.051 9	2.438	0.757 9
17.0	420	128.93	878.46	0.053 2	2.571	0.754 1
17.0	440	124.77	902.70	0.054 6	2.706	0.750 7
17.0	460	120.92	926.99	0.055 9	2.843	0.747 8
17.0	480	117.32	951.34	0.057 2	2.982	0.745 3
17.0	500	113.96	975.76	0.058 6	3.123	0.743 1
17.0	520	110.80	1 000.25	0.059 9	3.266	0.741 1
17.0	540	107.84	1 024.82	0.061 2	3.411	0.739 4
17.0	560	105.05	1 049.46	0.062 5	3.559	0.737 8
17.0	580	102.41	1 074.18	0.063 8	3.708	0.736 4
17.0	600	99.91	1 098.99	0.065 2	3.859	0.735 1
17.5	100	410.56	442.02	0.048 5	0.787	1.534 9
17.5	120	341.78	483.50	0.043 5	0.854	1.263 2
17.5	140	297.51	518.47	0.041 2	0.936	1.107 4
17.5	160	266.34	549.63	0.040 3	1.027	1.012 5
17.5	180	242.88	578.46	0.039 9	1.122	0.954 6
17.5	200	224.35	605.78	0.040 5	1.222	0.904 7
17.5	220	209.21	632.08	0.041 3	1.325	0.869 0
17.5	240	196.51	657.70	0.042 3	1.431	0.842 6
17.5	260	185.65	682.83	0.043 4	1.541	0.822 4
17.5	280	176.20	707.62	0.044 5	1.652	0.806 8

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
17.5	300	167.88	732.18	0.045 7	1.767	0.794 4
17.5	320	160.47	756.59	0.046 9	1.884	0.784 4
17.5	340	153.81	780.89	0.048 2	2.004	0.776 2
17.5	360	147.79	805.14	0.049 5	2.126	0.769 5
17.5	380	142.30	829.36	0.050 8	2.250	0.763 9
17.5	400	137.27	853.59	0.052 1	2.377	0.759 2
17.5	420	132.63	877.84	0.053 4	2.505	0.755 1
17.5	440	128.35	902.13	0.054 7	2.636	0.751 7
17.5	460	124.37	926.46	0.056 0	2.770	0.748 7
17.5	480	120.67	950.85	0.057 4	2.905	0.746 1
17.5	500	117.20	975.31	0.058 7	3.042	0.743 8
17.5	520	113.95	999.83	0.060 0	3.181	0.741 8
17.5	540	110.90	1 024.43	0.061 3	3.323	0.740 0
17.5	560	108.02	1 049.10	0.062 7	3.466	0.738 3
17.5	580	105.31	1 073.85	0.064 0	3.611	0.736 9
17.5	600	102.74	1 098.68	0.065 3	3.758	0.735 6
18.0	100	425.48	438.47	0.049 7	0.782	1.554 5
18.0	120	353.97	480.47	0.044 4	0.843	1.281 7
18.0	140	307.65	515.91	0.041 9	0.921	1.121 2
18.0	160	275.06	547.45	0.040 8	1.008	1.022 9
18.0	180	250.58	576.56	0.040 4	1.100	0.963 0
18.0	200	231.29	604.10	0.040 9	1.196	0.911 2
18.0	220	215.55	630.60	0.041 7	1.296	0.874 1
18.0	240	202.37	656.36	0.042 6	1.399	0.846 7
18.0	260	191.10	681.62	0.043 6	1.505	0.825 9
18.0	280	181.32	706.52	0.044 8	1.614	0.809 7
18.0	300	172.71	731.18	0.045 9	1.726	0.796 8
18.0	320	165.05	755.67	0.047 1	1.839	0.786 5
18.0	340	158.18	780.05	0.048 4	1.956	0.778 0
18.0	360	151.96	804.36	0.049 7	2.074	0.771 1
18.0	380	146.29	828.65	0.050 9	2.195	0.765 3
18.0	400	141.11	852.93	0.052 2	2.318	0.760 4
18.0	420	136.33	877.23	0.053 6	2.444	0.756 2

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
18.0	440	131.92	901.56	0.054 9	2.571	0.752 7
18.0	460	127.82	925.94	0.056 2	2.701	0.749 6
18.0	480	124.01	950.37	0.057 5	2.832	0.746 9
18.0	500	120.44	974.86	0.058 8	2.966	0.744 5
18.0	520	117.10	999.42	0.060 2	3.102	0.742 4
18.0	540	113.95	1 024.04	0.061 5	3.239	0.740 6
18.0	560	110.99	1 048.75	0.062 8	3.378	0.738 9
18.0	580	108.20	1 073.53	0.064 1	3.520	0.737 4
18.0	600	105.56	1 098.38	0.065 4	3.663	0.736 0
18.5	100	440.06	435.08	0.051 0	0.779	1.570 8
18.5	120	366.08	477.50	0.045 4	0.834	1.299 2
18.5	140	317.78	513.40	0.042 7	0.908	1.134 7
18.5	160	283.78	545.28	0.041 4	0.991	1.033 2
18.5	180	258.28	574.68	0.040 9	1.079	0.971 3
18.5	200	238.22	602.45	0.041 3	1.173	0.917 7
18.5	220	221.88	629.12	0.042 0	1.270	0.879 3
18.5	240	208.22	655.04	0.042 9	1.370	0.850 9
18.5	260	196.55	680.43	0.043 9	1.473	0.829 3
18.5	280	186.43	705.44	0.045 0	1.578	0.812 5
18.5	300	177.54	730.19	0.046 2	1.687	0.799 3
18.5	320	169.63	754.76	0.047 4	1.797	0.788 6
18.5	340	162.54	779.21	0.048 6	1.911	0.779 9
18.5	360	156.12	803.60	0.049 9	2.026	0.772 7
18.5	380	150.28	827.94	0.051 1	2.144	0.766 7
18.5	400	144.94	852.28	0.052 4	2.264	0.761 6
18.5	420	140.02	876.63	0.053 7	2.386	0.757 3
18.5	440	135.48	901.00	0.055 0	2.510	0.753 6
18.5	460	131.26	925.42	0.056 3	2.636	0.750 5
18.5	480	127.34	949.89	0.057 7	2.764	0.747 7
18.5	500	123.67	974.41	0.059 0	2.894	0.745 2
18.5	520	120.23	999.00	0.060 3	3.026	0.743 1
18.5	540	117.00	1 023.66	0.061 6	3.160	0.741 2
18.5	560	113.96	1 048.40	0.062 9	3.296	0.739 4

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
18.5	580	111.09	1 073.20	0.064 2	3.433	0.737 9
18.5	600	108.37	1 098.08	0.065 5	3.573	0.736 5
19.0	100	454.23	431.85	0.052 2	0.776	1.583 7
19.0	120	378.08	474.61	0.046 4	0.826	1.315 6
19.0	140	327.88	510.92	0.043 4	0.895	1.147 8
19.0	160	292.49	543.15	0.042 0	0.975	1.043 4
19.0	180	265.97	572.82	0.041 3	1.060	0.979 7
19.0	200	245.15	600.81	0.041 7	1.151	0.924 1
19.0	220	228.21	627.66	0.042 4	1.244	0.884 4
19.0	240	214.06	653.73	0.043 3	1.342	0.855 1
19.0	260	202.00	679.24	0.044 2	1.442	0.832 8
19.0	280	191.54	704.36	0.045 3	1.545	0.815 4
19.0	300	182.36	729.21	0.046 4	1.650	0.801 7
19.0	320	174.20	753.86	0.047 6	1.758	0.790 7
19.0	340	166.89	778.39	0.048 8	1.868	0.781 7
19.0	360	160.28	802.84	0.050 1	1.980	0.774 3
19.0	380	154.27	827.24	0.051 3	2.095	0.768 1
19.0	400	148.77	851.63	0.052 6	2.212	0.762 9
19.0	420	143.71	876.03	0.053 9	2.331	0.758 4
19.0	440	139.03	900.45	0.055 2	2.452	0.754 6
19.0	460	134.70	924.91	0.056 5	2.575	0.751 4
19.0	480	130.66	949.41	0.057 8	2.700	0.748 5
19.0	500	126.89	973.97	0.059 1	2.826	0.746 0
19.0	520	123.36	998.60	0.060 4	2.955	0.743 8
19.0	540	120.04	1 023.29	0.061 7	3.086	0.741 8
19.0	560	116.91	1 048.05	0.063 0	3.218	0.740 0
19.0	580	113.96	1 072.88	0.064 3	3.352	0.738 4
19.0	600	111.17	1 097.79	0.065 6	3.488	0.737 0
19.5	100	467.97	428.77	0.053 4	0.775	1.593 6
19.5	120	389.94	471.79	0.047 3	0.819	1.330 8
19.5	140	337.92	508.48	0.044 2	0.884	1.160 5
19.5	160	301.18	541.05	0.042 6	0.960	1.053 4
19.5	180	273.66	570.98	0.041 8	1.043	0.987 9



表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
19.5	200	252.06	599.19	0.042 2	1.130	0.930 6
19.5	220	234.52	626.21	0.042 8	1.221	0.889 6
19.5	240	219.89	652.43	0.043 6	1.315	0.859 3
19.5	260	207.43	678.07	0.044 5	1.413	0.836 2
19.5	280	196.64	703.29	0.045 6	1.513	0.818 4
19.5	300	187.17	728.23	0.046 7	1.615	0.804 2
19.5	320	178.76	752.97	0.047 8	1.720	0.792 8
19.5	340	171.23	777.57	0.049 0	1.828	0.783 5
19.5	360	164.42	802.08	0.050 3	1.937	0.775 9
19.5	380	158.24	826.55	0.051 5	2.049	0.769 5
19.5	400	152.58	850.99	0.052 8	2.163	0.764 1
19.5	420	147.38	875.43	0.054 1	2.279	0.759 6
19.5	440	142.58	899.90	0.055 4	2.397	0.755 7
19.5	460	138.12	924.40	0.056 7	2.517	0.752 3
19.5	480	133.97	948.94	0.058 0	2.639	0.749 3
19.5	500	130.10	973.54	0.059 3	2.762	0.746 7
19.5	520	126.47	998.19	0.060 6	2.888	0.744 4
19.5	540	123.07	1 022.92	0.061 9	3.015	0.742 4
19.5	560	119.86	1 047.70	0.063 2	3.144	0.740 6
19.5	580	116.83	1 072.56	0.064 4	3.275	0.738 9
19.5	600	113.97	1 097.49	0.065 7	3.407	0.737 4
20.0	100	481.25	425.84	0.054 5	0.774	1.600 5
20.0	120	401.64	469.06	0.048 3	0.813	1.344 7
20.0	140	347.91	506.09	0.044 9	0.874	1.172 8
20.0	160	309.84	538.97	0.043 2	0.947	1.063 2
20.0	180	281.32	569.17	0.042 3	1.026	0.996 1
20.0	200	258.97	597.58	0.042 6	1.111	0.937 0
20.0	220	240.83	624.78	0.043 1	1.199	0.894 7
20.0	240	225.72	651.14	0.043 9	1.291	0.863 5
20.0	260	212.86	676.90	0.044 8	1.385	0.839 7
20.0	280	201.73	702.24	0.045 8	1.483	0.821 3
20.0	300	191.97	727.27	0.046 9	1.583	0.806 7
20.0	320	183.31	752.09	0.048 1	1.685	0.795 0

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
20.0	340	175.56	776.76	0.049 2	1.790	0.785 4
20.0	360	168.56	801.33	0.050 5	1.897	0.777 5
20.0	380	162.20	825.86	0.051 7	2.006	0.770 9
20.0	400	156.39	850.35	0.053 0	2.117	0.765 4
20.0	420	151.04	874.85	0.054 2	2.230	0.760 7
20.0	440	146.11	899.36	0.055 5	2.345	0.756 7
20.0	460	141.54	923.89	0.056 8	2.462	0.753 2
20.0	480	137.28	948.48	0.058 1	2.581	0.750 1
20.0	500	133.30	973.11	0.059 4	2.701	0.747 5
20.0	520	129.58	997.80	0.060 7	2.824	0.745 1
20.0	540	126.09	1 022.55	0.062 0	2.948	0.743 0
20.0	560	122.80	1 047.36	0.063 3	3.074	0.741 1
20.0	580	119.70	1 072.25	0.064 6	3.201	0.739 5
20.0	600	116.76	1 097.21	0.065 9	3.331	0.737 9
20.5	100	494.06	423.07	0.055 7	0.774	1.604 9
20.5	120	413.15	466.41	0.049 3	0.808	1.357 3
20.5	140	357.82	503.76	0.045 7	0.865	1.184 6
20.5	160	318.47	536.93	0.043 9	0.934	1.072 9
20.5	180	288.97	567.38	0.042 8	1.011	1.004 1
20.5	200	265.86	595.99	0.043 0	1.093	0.943 4
20.5	220	247.12	623.37	0.043 5	1.179	0.899 9
20.5	240	231.53	649.87	0.044 2	1.268	0.867 7
20.5	260	218.27	675.75	0.045 1	1.360	0.843 2
20.5	280	206.80	701.19	0.046 1	1.455	0.824 2
20.5	300	196.76	726.31	0.047 2	1.552	0.809 2
20.5	320	187.85	751.21	0.048 3	1.652	0.797 1
20.5	340	179.88	775.95	0.049 5	1.754	0.787 3
20.5	360	172.69	800.59	0.050 7	1.858	0.779 1
20.5	380	166.15	825.17	0.051 9	1.965	0.772 4
20.5	400	160.18	849.72	0.053 1	2.073	0.766 7
20.5	420	154.70	874.26	0.054 4	2.183	0.761 8
20.5	440	149.64	898.82	0.055 7	2.296	0.757 7
20.5	460	144.94	923.40	0.057 0	2.410	0.754 1

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
20.5	480	140.58	948.01	0.058 3	2.526	0.751 0
20.5	500	136.50	972.68	0.059 5	2.644	0.748 2
20.5	520	132.68	997.40	0.060 8	2.763	0.745 8
20.5	540	129.10	1 022.18	0.062 1	2.884	0.743 6
20.5	560	125.73	1 047.03	0.063 4	3.007	0.741 7
20.5	580	122.55	1 071.94	0.064 7	3.132	0.740 0
20.5	600	119.54	1 096.92	0.066 0	3.258	0.738 4
21.0	100	506.40	420.45	0.056 8	0.774	1.607 0
21.0	120	424.45	463.85	0.050 2	0.804	1.368 6
21.0	140	367.64	501.47	0.046 5	0.857	1.195 8
21.0	160	327.05	534.93	0.044 5	0.923	1.082 2
21.0	180	296.58	565.61	0.043 3	0.997	1.012 1
21.0	200	272.73	594.43	0.043 4	1.076	0.949 7
21.0	220	253.40	621.97	0.043 9	1.159	0.905 0
21.0	240	237.33	648.61	0.044 6	1.246	0.871 8
21.0	260	223.67	674.61	0.045 4	1.336	0.846 7
21.0	280	211.87	700.15	0.046 4	1.428	0.827 1
21.0	300	201.53	725.36	0.047 4	1.523	0.811 7
21.0	320	192.38	750.34	0.048 5	1.620	0.799 3
21.0	340	184.19	775.16	0.049 7	1.720	0.789 1
21.0	360	176.80	799.86	0.050 9	1.822	0.780 8
21.0	380	170.10	824.50	0.052 1	1.926	0.773 8
21.0	400	163.97	849.10	0.053 3	2.031	0.768 0
21.0	420	158.34	873.69	0.054 6	2.139	0.763 0
21.0	440	153.15	898.28	0.055 9	2.249	0.758 7
21.0	460	148.34	922.90	0.057 1	2.360	0.755 0
21.0	480	143.86	947.56	0.058 4	2.474	0.751 8
21.0	500	139.69	972.26	0.059 7	2.589	0.749 0
21.0	520	135.78	997.01	0.061 0	2.705	0.746 5
21.0	540	132.11	1 021.82	0.062 3	2.824	0.744 3
21.0	560	128.66	1 046.69	0.063 5	2.944	0.742 3
21.0	580	125.40	1 071.63	0.064 8	3.066	0.740 5
21.0	600	122.32	1 096.64	0.066 1	3.189	0.738 9

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
21.5	100	518.27	417.98	0.057 8	0.775	1.607 1
21.5	120	435.53	461.37	0.051 2	0.801	1.378 6
21.5	140	377.37	499.23	0.047 2	0.850	1.206 4
21.5	160	335.57	532.95	0.045 1	0.913	1.091 4
21.5	180	304.17	563.87	0.043 8	0.984	1.019 9
21.5	200	279.57	592.88	0.043 9	1.060	0.956 0
21.5	220	259.66	620.58	0.044 3	1.141	0.910 0
21.5	240	243.11	647.36	0.044 9	1.226	0.876 0
21.5	260	229.05	673.48	0.045 7	1.313	0.850 2
21.5	280	216.92	699.13	0.046 7	1.403	0.830 1
21.5	300	206.30	724.43	0.047 7	1.496	0.814 2
21.5	320	196.90	749.48	0.048 8	1.591	0.801 4
21.5	340	188.49	774.37	0.049 9	1.688	0.791 0
21.5	360	180.91	799.14	0.051 1	1.787	0.782 4
21.5	380	174.03	823.83	0.052 3	1.889	0.775 3
21.5	400	167.75	848.48	0.053 5	1.992	0.769 3
21.5	420	161.98	873.12	0.054 8	2.097	0.764 1
21.5	440	156.66	897.76	0.056 0	2.204	0.759 7
21.5	460	151.73	922.41	0.057 3	2.313	0.756 0
21.5	480	147.14	947.11	0.058 6	2.424	0.752 7
21.5	500	142.87	971.84	0.059 8	2.537	0.749 8
21.5	520	138.86	996.62	0.061 1	2.651	0.747 2
21.5	540	135.11	1 021.46	0.062 4	2.766	0.744 9
21.5	560	131.57	1 046.36	0.063 7	2.884	0.742 9
21.5	580	128.24	1 071.33	0.064 9	3.003	0.741 1
21.5	600	125.09	1 096.36	0.066 2	3.123	0.739 4
22.0	100	529.67	415.63	0.058 9	0.776	1.605 7
22.0	120	446.38	458.99	0.052 1	0.798	1.387 4
22.0	140	386.98	497.05	0.048 0	0.844	1.216 4
22.0	160	344.04	531.02	0.045 7	0.904	1.100 2
22.0	180	311.72	562.15	0.044 3	0.972	1.027 6
22.0	200	286.40	591.35	0.044 3	1.046	0.962 2
22.0	220	265.90	619.22	0.044 6	1.124	0.915 1

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
22.0	240	248.87	646.13	0.045 3	1.206	0.880 2
22.0	260	234.42	672.37	0.046 0	1.291	0.853 6
22.0	280	221.96	698.11	0.046 9	1.379	0.833 0
22.0	300	211.05	723.50	0.047 9	1.470	0.816 7
22.0	320	201.40	748.63	0.049 0	1.562	0.803 6
22.0	340	192.78	773.59	0.050 1	1.657	0.792 9
22.0	360	185.00	798.42	0.051 3	1.754	0.784 1
22.0	380	177.95	823.17	0.052 5	1.854	0.776 7
22.0	400	171.51	847.87	0.053 7	1.955	0.770 6
22.0	420	165.60	872.55	0.054 9	2.057	0.765 3
22.0	440	160.15	897.23	0.056 2	2.162	0.760 8
22.0	460	155.11	921.93	0.057 4	2.269	0.756 9
22.0	480	150.41	946.66	0.058 7	2.377	0.753 5
22.0	500	146.04	971.43	0.060 0	2.487	0.750 5
22.0	520	141.94	996.24	0.061 3	2.598	0.747 9
22.0	540	138.09	1 021.11	0.062 5	2.712	0.745 6
22.0	560	134.48	1 046.04	0.063 8	2.826	0.743 5
22.0	580	131.07	1 071.03	0.065 1	2.943	0.741 6
22.0	600	127.85	1 096.08	0.066 3	3.061	0.739 9
22.5	100	540.62	413.42	0.059 9	0.777	1.602 9
22.5	120	456.99	456.69	0.053 0	0.796	1.394 8
22.5	140	396.47	494.92	0.048 8	0.838	1.225 9
22.5	160	352.45	529.12	0.046 4	0.895	1.108 8
22.5	180	319.22	560.46	0.044 8	0.961	1.035 1
22.5	200	293.19	589.85	0.044 7	1.032	0.968 3
22.5	220	272.12	617.87	0.045 0	1.108	0.920 1
22.5	240	254.62	644.91	0.045 6	1.188	0.884 3
22.5	260	239.78	671.26	0.046 4	1.271	0.857 1
22.5	280	226.98	697.11	0.047 2	1.357	0.836 0
22.5	300	215.79	722.58	0.048 2	1.445	0.819 2
22.5	320	205.89	747.79	0.049 3	1.536	0.805 8
22.5	340	197.05	772.82	0.050 4	1.628	0.794 8
22.5	360	189.09	797.71	0.051 5	1.723	0.785 8

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
22.5	380	181.86	822.51	0.052 7	1.820	0.778 2
22.5	400	175.27	847.26	0.053 9	1.919	0.771 9
22.5	420	169.22	871.99	0.055 1	2.020	0.766 5
22.5	440	163.64	896.72	0.056 4	2.122	0.761 8
22.5	460	158.48	921.45	0.057 6	2.226	0.757 8
22.5	480	153.67	946.22	0.058 9	2.332	0.754 4
22.5	500	149.20	971.02	0.060 1	2.440	0.751 3
22.5	520	145.01	995.87	0.061 4	2.549	0.748 6
22.5	540	141.08	1 020.76	0.062 7	2.659	0.746 2
22.5	560	137.38	1 045.72	0.063 9	2.772	0.744 1
22.5	580	133.89	1 070.73	0.065 2	2.886	0.742 2
22.5	600	130.60	1 095.81	0.066 5	3.001	0.740 4
23.0	100	551.12	411.34	0.061 0	0.779	1.599 1
23.0	120	467.33	454.48	0.053 9	0.794	1.401 1
23.0	140	405.83	492.86	0.049 6	0.833	1.234 6
23.0	160	360.78	527.25	0.047 0	0.887	1.117 0
23.0	180	326.69	558.80	0.045 3	0.950	1.042 4
23.0	200	299.95	588.36	0.045 2	1.020	0.974 4
23.0	220	278.31	616.53	0.045 4	1.093	0.925 1
23.0	240	260.34	643.71	0.046 0	1.171	0.888 5
23.0	260	245.11	670.17	0.046 7	1.252	0.860 6
23.0	280	231.99	696.11	0.047 5	1.336	0.838 9
23.0	300	220.52	721.67	0.048 5	1.422	0.821 7
23.0	320	210.37	746.96	0.049 5	1.510	0.807 9
23.0	340	201.31	772.05	0.050 6	1.601	0.796 7
23.0	360	193.16	797.00	0.051 7	1.694	0.787 4
23.0	380	185.76	821.86	0.052 9	1.788	0.779 7
23.0	400	179.01	846.66	0.054 1	1.885	0.773 2
23.0	420	172.82	871.44	0.055 3	1.983	0.767 6
23.0	440	167.12	896.20	0.056 5	2.084	0.762 9
23.0	460	161.83	920.98	0.057 8	2.186	0.758 8
23.0	480	156.93	945.78	0.059 0	2.289	0.755 2
23.0	500	152.35	970.61	0.060 3	2.394	0.752 1

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
23.0	520	148.06	995.49	0.061 5	2.501	0.749 3
23.0	540	144.05	1 020.42	0.062 8	2.610	0.746 9
23.0	560	140.27	1 045.40	0.064 1	2.720	0.744 7
23.0	580	136.71	1 070.44	0.065 3	2.831	0.742 7
23.0	600	133.34	1 095.54	0.066 6	2.944	0.740 9
23.5	100	561.21	409.36	0.061 9	0.781	1.594 4
23.5	120	477.42	452.36	0.054 8	0.793	1.406 3
23.5	140	415.05	490.84	0.050 3	0.829	1.242 8
23.5	160	369.03	525.43	0.047 6	0.880	1.124 9
23.5	180	334.10	557.17	0.045 8	0.941	1.049 6
23.5	200	306.67	586.90	0.045 6	1.008	0.980 3
23.5	220	284.47	615.22	0.045 8	1.079	0.930 0
23.5	240	266.05	642.52	0.046 3	1.155	0.892 6
23.5	260	250.43	669.09	0.047 0	1.234	0.864 0
23.5	280	236.98	695.13	0.047 8	1.315	0.841 8
23.5	300	225.22	720.78	0.048 7	1.399	0.824 3
23.5	320	214.83	746.14	0.049 7	1.486	0.810 1
23.5	340	205.56	771.29	0.050 8	1.575	0.798 6
23.5	360	197.21	796.31	0.051 9	1.665	0.789 1
23.5	380	189.65	821.22	0.053 1	1.758	0.781 2
23.5	400	182.75	846.07	0.054 3	1.853	0.774 5
23.5	420	176.42	870.89	0.055 5	1.949	0.768 8
23.5	440	170.58	895.70	0.056 7	2.047	0.764 0
23.5	460	165.18	920.51	0.057 9	2.147	0.759 8
23.5	480	160.17	945.35	0.059 2	2.248	0.756 1
23.5	500	155.49	970.21	0.060 4	2.351	0.752 9
23.5	520	151.11	995.12	0.061 7	2.456	0.750 1
23.5	540	147.01	1 020.08	0.062 9	2.562	0.747 5
23.5	560	143.15	1 045.09	0.064 2	2.670	0.745 3
23.5	580	139.51	1 070.15	0.065 4	2.779	0.743 3
23.5	600	136.08	1 095.28	0.066 7	2.889	0.741 4
24.0	100	570.90	407.50	0.062 9	0.783	1.589 1
24.0	120	487.25	450.33	0.055 7	0.792	1.410 5

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
24.0	140	424.13	488.89	0.051 1	0.825	1.250 3
24.0	160	377.19	523.65	0.048 3	0.874	1.132 5
24.0	180	341.45	555.56	0.046 4	0.932	1.056 6
24.0	200	313.36	585.46	0.046 1	0.997	0.986 2
24.0	220	290.61	613.92	0.046 2	1.066	0.934 9
24.0	240	271.72	641.35	0.046 7	1.140	0.896 7
24.0	260	255.73	668.03	0.047 3	1.217	0.867 5
24.0	280	241.95	694.16	0.048 1	1.296	0.844 8
24.0	300	229.92	719.89	0.049 0	1.378	0.826 8
24.0	320	219.28	745.32	0.050 0	1.463	0.812 3
24.0	340	209.80	770.55	0.051 0	1.550	0.800 5
24.0	360	201.26	795.62	0.052 2	1.638	0.790 8
24.0	380	193.52	820.58	0.053 3	1.729	0.782 7
24.0	400	186.47	845.48	0.054 5	1.822	0.775 8
24.0	420	180.00	870.35	0.055 7	1.916	0.770 0
24.0	440	174.04	895.20	0.056 9	2.012	0.765 0
24.0	460	168.52	920.05	0.058 1	2.110	0.760 7
24.0	480	163.40	944.92	0.059 3	2.209	0.757 0
24.0	500	158.62	969.82	0.060 6	2.310	0.753 7
24.0	520	154.15	994.76	0.061 8	2.413	0.750 8
24.0	540	149.97	1 019.74	0.063 1	2.517	0.748 2
24.0	560	146.03	1 044.77	0.064 3	2.622	0.745 9
24.0	580	142.31	1 069.87	0.065 6	2.729	0.743 8
24.0	600	138.81	1 095.01	0.066 8	2.837	0.742 0
24.5	100	580.20	405.74	0.063 9	0.786	1.583 3
24.5	120	496.81	448.37	0.056 6	0.792	1.413 7
24.5	140	433.05	486.99	0.051 9	0.822	1.257 3
24.5	160	385.27	521.90	0.048 9	0.868	1.139 7
24.5	180	348.75	553.99	0.046 9	0.924	1.063 3
24.5	200	320.00	584.04	0.046 5	0.986	0.991 9
24.5	220	296.71	612.64	0.046 6	1.054	0.939 7
24.5	240	277.38	640.19	0.047 0	1.125	0.900 7
24.5	260	261.00	666.97	0.047 6	1.200	0.870 9

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
24.5	280	246.90	693.20	0.048 4	1.278	0.847 7
24.5	300	234.59	719.01	0.049 3	1.358	0.829 3
24.5	320	223.72	744.52	0.050 2	1.441	0.814 5
24.5	340	214.02	769.80	0.051 3	1.526	0.802 4
24.5	360	205.29	794.93	0.052 4	1.613	0.792 5
24.5	380	197.39	819.95	0.053 5	1.702	0.784 2
24.5	400	190.18	844.90	0.054 7	1.792	0.777 2
24.5	420	183.57	869.81	0.055 8	1.885	0.771 2
24.5	440	177.48	894.70	0.057 0	1.979	0.766 1
24.5	460	171.85	919.59	0.058 3	2.075	0.761 7
24.5	480	166.62	944.50	0.059 5	2.172	0.757 9
24.5	500	161.75	969.43	0.060 7	2.271	0.754 5
24.5	520	157.19	994.40	0.062 0	2.371	0.751 5
24.5	540	152.91	1 019.41	0.063 2	2.473	0.748 9
24.5	560	148.89	1 044.47	0.064 5	2.576	0.746 5
24.5	580	145.10	1 069.58	0.065 7	2.681	0.744 4
24.5	600	141.53	1 094.76	0.066 9	2.787	0.742 5
25.0	100	589.14	404.07	0.064 8	0.788	1.577 2
25.0	120	506.11	446.50	0.057 4	0.792	1.416 0
25.0	140	441.82	485.15	0.052 6	0.819	1.263 6
25.0	160	393.25	520.20	0.049 6	0.862	1.146 6
25.0	180	355.99	552.44	0.047 4	0.916	1.069 9
25.0	200	326.60	582.65	0.047 0	0.977	0.997 6
25.0	220	302.78	611.38	0.047 0	1.042	0.944 5
25.0	240	283.00	639.05	0.047 4	1.112	0.904 8
25.0	260	266.26	665.93	0.047 9	1.185	0.874 3
25.0	280	251.84	692.25	0.048 7	1.261	0.850 6
25.0	300	239.25	718.14	0.049 5	1.339	0.831 8
25.0	320	228.13	743.72	0.050 5	1.420	0.816 7
25.0	340	218.22	769.07	0.051 5	1.503	0.804 4
25.0	360	209.31	794.26	0.052 6	1.588	0.794 2
25.0	380	201.24	819.33	0.053 7	1.675	0.785 7
25.0	400	193.88	844.33	0.054 9	1.764	0.778 5

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
25.0	420	187.13	869.28	0.056 0	1.855	0.772 4
25.0	440	180.92	894.21	0.057 2	1.947	0.767 2
25.0	460	175.17	919.14	0.058 4	2.041	0.762 7
25.0	480	169.83	944.08	0.059 6	2.136	0.758 7
25.0	500	164.86	969.04	0.060 9	2.233	0.755 3
25.0	520	160.21	994.04	0.062 1	2.332	0.752 3
25.0	540	155.85	1 019.08	0.063 4	2.432	0.749 6
25.0	560	151.75	1 044.16	0.064 6	2.533	0.747 1
25.0	580	147.89	1 069.30	0.065 8	2.636	0.745 0
25.0	600	144.24	1 094.50	0.067 1	2.740	0.743 0
25.5	100	597.74	402.49	0.065 7	0.791	1.570 8
25.5	120	515.15	444.71	0.058 3	0.792	1.417 6
25.5	140	450.42	483.36	0.053 4	0.817	1.269 3
25.5	160	401.14	518.53	0.050 2	0.858	1.153 2
25.5	180	363.17	550.92	0.047 9	0.909	1.076 2
25.5	200	333.16	581.27	0.047 4	0.968	1.003 1
25.5	220	308.82	610.14	0.047 4	1.031	0.949 2
25.5	240	288.60	637.92	0.047 7	1.099	0.908 7
25.5	260	271.48	664.91	0.048 3	1.170	0.877 7
25.5	280	256.75	691.31	0.049 0	1.245	0.853 5
25.5	300	243.89	717.28	0.049 8	1.321	0.834 3
25.5	320	232.54	742.93	0.050 7	1.400	0.818 9
25.5	340	222.41	768.35	0.051 7	1.482	0.806 3
25.5	360	213.31	793.59	0.052 8	1.565	0.795 9
25.5	380	205.07	818.72	0.053 9	1.650	0.787 2
25.5	400	197.56	843.76	0.055 0	1.737	0.779 8
25.5	420	190.68	868.76	0.056 2	1.826	0.773 6
25.5	440	184.34	893.73	0.057 4	1.916	0.768 3
25.5	460	178.48	918.69	0.058 6	2.008	0.763 6
25.5	480	173.04	943.66	0.059 8	2.102	0.759 6
25.5	500	167.96	968.66	0.061 0	2.197	0.756 1
25.5	520	163.22	993.69	0.062 3	2.294	0.753 0
25.5	540	158.78	1 018.75	0.063 5	2.392	0.750 2

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
25.5	560	154.60	1 043.87	0.064 7	2.491	0.747 8
25.5	580	150.66	1 069.03	0.066 0	2.592	0.745 6
25.5	600	146.94	1 094.25	0.067 2	2.694	0.743 6
26.0	100	606.01	401.00	0.066 6	0.793	1.564 3
26.0	120	523.94	442.99	0.059 1	0.792	1.418 5
26.0	140	458.87	481.64	0.054 1	0.815	1.274 4
26.0	160	408.92	516.91	0.050 8	0.853	1.159 4
26.0	180	370.27	549.44	0.048 5	0.903	1.082 4
26.0	200	339.67	579.92	0.047 9	0.959	1.008 5
26.0	220	314.82	608.91	0.047 8	1.021	0.953 9
26.0	240	294.17	636.81	0.048 1	1.087	0.912 7
26.0	260	276.69	663.89	0.048 6	1.157	0.881 1
26.0	280	261.64	690.39	0.049 3	1.229	0.856 4
26.0	300	248.51	716.43	0.050 1	1.304	0.836 9
26.0	320	236.92	742.16	0.051 0	1.382	0.821 1
26.0	340	226.59	767.63	0.052 0	1.461	0.808 2
26.0	360	217.30	792.93	0.053 0	1.543	0.797 5
26.0	380	208.90	818.11	0.054 1	1.626	0.788 7
26.0	400	201.24	843.20	0.055 2	1.712	0.781 2
26.0	420	194.22	868.24	0.056 4	1.799	0.774 8
26.0	440	187.75	893.25	0.057 6	1.887	0.769 4
26.0	460	181.78	918.25	0.058 8	1.977	0.764 6
26.0	480	176.23	943.25	0.060 0	2.069	0.760 5
26.0	500	171.06	968.28	0.061 2	2.162	0.756 9
26.0	520	166.23	993.34	0.062 4	2.257	0.753 7
26.0	540	161.70	1 018.43	0.063 6	2.353	0.750 9
26.0	560	157.44	1 043.57	0.064 9	2.451	0.748 4
26.0	580	153.43	1 068.76	0.066 1	2.550	0.746 1
26.0	600	149.64	1 094.00	0.067 3	2.650	0.744 1
26.5	100	613.98	399.58	0.067 4	0.796	1.557 7
26.5	120	532.47	441.34	0.060 0	0.793	1.418 8
26.5	140	467.15	479.96	0.054 8	0.813	1.279 0
26.5	160	416.60	515.32	0.051 5	0.849	1.165 2

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
26.5	180	377.31	547.98	0.049 0	0.897	1.088 3
26.5	200	346.12	578.60	0.048 4	0.951	1.013 8
26.5	220	320.78	607.71	0.048 2	1.011	0.958 4
26.5	240	299.71	635.71	0.048 5	1.076	0.916 6
26.5	260	281.87	662.89	0.048 9	1.143	0.884 5
26.5	280	266.51	689.47	0.049 6	1.214	0.859 3
26.5	300	253.11	715.60	0.050 4	1.288	0.839 4
26.5	320	241.29	741.39	0.051 3	1.364	0.823 3
26.5	340	230.75	766.93	0.052 2	1.441	0.810 1
26.5	360	221.28	792.28	0.053 3	1.521	0.799 2
26.5	380	212.71	817.51	0.054 3	1.603	0.790 2
26.5	400	204.90	842.65	0.055 4	1.687	0.782 5
26.5	420	197.74	867.72	0.056 6	1.772	0.776 0
26.5	440	191.15	892.77	0.057 7	1.859	0.770 4
26.5	460	185.06	917.81	0.058 9	1.948	0.765 6
26.5	480	179.41	942.85	0.060 1	2.038	0.761 4
26.5	500	174.14	967.91	0.061 3	2.129	0.757 7
26.5	520	169.22	992.99	0.062 6	2.222	0.754 5
26.5	540	164.61	1 018.11	0.063 8	2.317	0.751 6
26.5	560	160.27	1 043.28	0.065 0	2.412	0.749 0
26.5	580	156.19	1 068.49	0.066 2	2.509	0.746 7
26.5	600	152.33	1 093.75	0.067 5	2.608	0.744 6
27.0	100	621.65	398.24	0.068 3	0.799	1.551 1
27.0	120	540.76	439.77	0.060 8	0.794	1.418 6
27.0	140	475.26	478.34	0.055 6	0.812	1.283 0
27.0	160	424.16	513.78	0.052 1	0.846	1.170 7
27.0	180	384.27	546.55	0.049 5	0.891	1.093 9
27.0	200	352.53	577.29	0.048 8	0.944	1.019 0
27.0	220	326.70	606.52	0.048 6	1.002	0.962 9
27.0	240	305.22	634.63	0.048 8	1.065	0.920 5
27.0	260	287.02	661.91	0.049 3	1.131	0.887 8
27.0	280	271.36	688.57	0.049 9	1.200	0.862 2
27.0	300	257.69	714.77	0.050 6	1.272	0.841 9

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
27.0	320	245.64	740.63	0.051 5	1.346	0.825 4
27.0	340	234.89	766.23	0.052 5	1.423	0.812 0
27.0	360	225.24	791.64	0.053 5	1.501	0.800 9
27.0	380	216.50	816.91	0.054 5	1.581	0.791 7
27.0	400	208.54	842.10	0.055 6	1.663	0.783 9
27.0	420	201.25	867.22	0.056 8	1.747	0.777 2
27.0	440	194.54	892.30	0.057 9	1.832	0.771 5
27.0	460	188.34	917.38	0.059 1	1.919	0.766 6
27.0	480	182.58	942.45	0.060 3	2.008	0.762 3
27.0	500	177.22	967.54	0.061 5	2.097	0.758 6
27.0	520	172.20	992.65	0.062 7	2.189	0.755 3
27.0	540	167.51	1 017.80	0.063 9	2.281	0.752 3
27.0	560	163.09	1 042.99	0.065 1	2.375	0.749 7
27.0	580	158.94	1 068.22	0.066 4	2.471	0.747 3
27.0	600	155.01	1 093.51	0.067 6	2.567	0.745 2
27.5	100	629.05	396.96	0.069 1	0.802	1.544 5
27.5	120	548.81	438.26	0.061 6	0.795	1.417 9
27.5	140	483.20	476.78	0.056 3	0.811	1.286 6
27.5	160	431.62	512.27	0.052 7	0.843	1.175 9
27.5	180	391.16	545.16	0.050 1	0.886	1.099 4
27.5	200	358.88	576.01	0.049 3	0.937	1.024 0
27.5	220	332.57	605.35	0.049 1	0.994	0.967 3
27.5	240	310.69	633.56	0.049 2	1.055	0.924 3
27.5	260	292.14	660.94	0.049 6	1.119	0.891 1
27.5	280	276.18	687.68	0.050 2	1.187	0.865 1
27.5	300	262.25	713.95	0.050 9	1.257	0.844 3
27.5	320	249.97	739.88	0.051 8	1.330	0.827 6
27.5	340	239.02	765.53	0.052 7	1.405	0.814 0
27.5	360	229.18	791.00	0.053 7	1.482	0.802 6
27.5	380	220.28	816.33	0.054 7	1.560	0.793 2
27.5	400	212.18	841.55	0.055 8	1.641	0.785 2
27.5	420	204.75	866.72	0.057 0	1.723	0.778 5
27.5	440	197.92	891.84	0.058 1	1.807	0.772 6

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
27.5	460	191.60	916.95	0.059 3	1.892	0.767 6
27.5	480	185.74	942.05	0.060 5	1.979	0.763 2
27.5	500	180.28	967.17	0.061 7	2.067	0.759 4
27.5	520	175.18	992.32	0.062 9	2.156	0.756 0
27.5	540	170.40	1 017.49	0.064 1	2.247	0.753 0
27.5	560	165.91	1 042.70	0.065 3	2.340	0.750 3
27.5	580	161.68	1 067.96	0.066 5	2.433	0.747 9
27.5	600	157.68	1 093.27	0.067 7	2.528	0.745 7
28.0	100	636.20	395.75	0.069 9	0.804	1.538 0
28.0	120	556.63	436.81	0.062 4	0.796	1.416 9
28.0	140	490.98	475.27	0.057 0	0.810	1.289 7
28.0	160	438.97	510.81	0.053 4	0.840	1.180 7
28.0	180	397.97	543.79	0.050 6	0.881	1.104 6
28.0	200	365.17	574.76	0.049 8	0.931	1.028 9
28.0	220	338.41	604.20	0.049 5	0.986	0.971 7
28.0	240	316.13	632.51	0.049 6	1.045	0.928 1
28.0	260	297.24	659.98	0.049 9	1.108	0.894 4
28.0	280	280.98	686.80	0.050 5	1.174	0.867 9
28.0	300	266.79	713.15	0.051 2	1.243	0.846 8
28.0	320	254.28	739.13	0.052 0	1.314	0.829 8
28.0	340	243.13	764.85	0.052 9	1.388	0.815 9
28.0	360	233.11	790.37	0.053 9	1.463	0.804 4
28.0	380	224.05	815.75	0.055 0	1.540	0.794 7
28.0	400	215.80	841.02	0.056 0	1.619	0.786 6
28.0	420	208.24	866.22	0.057 1	1.700	0.779 7
28.0	440	201.28	891.38	0.058 3	1.782	0.773 8
28.0	460	194.86	916.53	0.059 4	1.866	0.768 6
28.0	480	188.89	941.66	0.060 6	1.951	0.764 2
28.0	500	183.34	966.81	0.061 8	2.037	0.760 2
28.0	520	178.15	991.98	0.063 0	2.125	0.756 8
28.0	540	173.28	1 017.19	0.064 2	2.215	0.753 7
28.0	560	168.71	1 042.42	0.065 4	2.305	0.751 0
28.0	580	164.41	1 067.71	0.066 6	2.397	0.748 5

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
28.0	600	160.35	1 093.04	0.067 8	2.491	0.746 3
28.5	100	643.10	394.59	0.070 7	0.807	1.531 6
28.5	120	564.23	435.43	0.063 1	0.797	1.415 5
28.5	140	498.59	473.80	0.057 7	0.809	1.292 3
28.5	160	446.20	509.38	0.054 0	0.838	1.185 2
28.5	180	404.70	542.45	0.051 2	0.877	1.109 6
28.5	200	371.41	573.53	0.050 2	0.925	1.033 6
28.5	220	344.20	603.08	0.049 9	0.978	0.975 9
28.5	240	321.53	631.48	0.049 9	1.036	0.931 8
28.5	260	302.30	659.03	0.050 3	1.097	0.897 6
28.5	280	285.75	685.93	0.050 8	1.162	0.870 7
28.5	300	271.31	712.35	0.051 5	1.229	0.849 3
28.5	320	258.57	738.40	0.052 3	1.299	0.832 0
28.5	340	247.22	764.18	0.053 2	1.371	0.817 8
28.5	360	237.02	789.75	0.054 2	1.445	0.806 1
28.5	380	227.80	815.17	0.055 2	1.521	0.796 2
28.5	400	219.40	840.49	0.056 2	1.598	0.788 0
28.5	420	211.71	865.73	0.057 3	1.677	0.780 9
28.5	440	204.64	890.93	0.058 5	1.758	0.774 9
28.5	460	198.10	916.11	0.059 6	1.840	0.769 6
28.5	480	192.03	941.28	0.060 8	1.924	0.765 1
28.5	500	186.38	966.46	0.062 0	2.009	0.761 1
28.5	520	181.10	991.66	0.063 2	2.096	0.757 6
28.5	540	176.15	1 016.88	0.064 4	2.183	0.754 4
28.5	560	171.51	1 042.15	0.065 6	2.273	0.751 6
28.5	580	167.13	1 067.45	0.066 8	2.363	0.749 1
28.5	600	163.00	1 092.80	0.068 0	2.454	0.746 9
29.0	100	649.77	393.50	0.071 5	0.810	1.525 3
29.0	120	571.61	434.10	0.063 9	0.799	1.413 9
29.0	140	506.04	472.39	0.058 4	0.809	1.294 6
29.0	160	453.32	507.99	0.054 6	0.835	1.189 4
29.0	180	411.35	541.15	0.051 7	0.873	1.114 4
29.0	200	377.59	572.32	0.050 7	0.919	1.038 2

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
29.0	220	349.95	601.97	0.050 3	0.971	0.980 1
29.0	240	326.90	630.46	0.050 3	1.027	0.935 5
29.0	260	307.34	658.10	0.050 6	1.087	0.900 8
29.0	280	290.50	685.08	0.051 1	1.151	0.873 5
29.0	300	275.80	711.57	0.051 8	1.216	0.851 8
29.0	320	262.84	737.68	0.052 6	1.285	0.834 1
29.0	340	251.29	763.51	0.053 4	1.355	0.819 7
29.0	360	240.92	789.14	0.054 4	1.428	0.807 8
29.0	380	231.54	814.61	0.055 4	1.502	0.797 8
29.0	400	222.99	839.96	0.056 4	1.578	0.789 3
29.0	420	215.17	865.25	0.057 5	1.656	0.782 1
29.0	440	207.98	890.48	0.058 6	1.735	0.776 0
29.0	460	201.33	915.70	0.059 8	1.816	0.770 6
29.0	480	195.16	940.90	0.060 9	1.898	0.766 0
29.0	500	189.41	966.11	0.062 1	1.982	0.761 9
29.0	520	184.05	991.33	0.063 3	2.067	0.758 3
29.0	540	179.02	1 016.59	0.064 5	2.153	0.755 1
29.0	560	174.30	1 041.87	0.065 7	2.241	0.752 3
29.0	580	169.85	1 067.20	0.066 9	2.330	0.749 7
29.0	600	165.65	1 092.57	0.068 1	2.420	0.747 4
29.5	100	656.23	392.45	0.072 3	0.813	1.519 2
29.5	120	578.78	432.84	0.064 6	0.800	1.412 0
29.5	140	513.32	471.03	0.059 1	0.809	1.296 4
29.5	160	460.32	506.65	0.055 2	0.834	1.193 3
29.5	180	417.92	539.87	0.052 2	0.870	1.118 9
29.5	200	383.70	571.13	0.051 2	0.914	1.042 7
29.5	220	355.65	600.87	0.050 7	0.964	0.984 1
29.5	240	332.23	629.46	0.050 7	1.019	0.939 1
29.5	260	312.35	657.18	0.050 9	1.078	0.904 0
29.5	280	295.22	684.24	0.051 4	1.140	0.876 3
29.5	300	280.28	710.79	0.052 0	1.204	0.854 2
29.5	320	267.09	736.97	0.052 8	1.271	0.836 3
29.5	340	255.35	762.86	0.053 7	1.340	0.821 6

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
29.5	360	244.80	788.53	0.054 6	1.411	0.809 5
29.5	380	235.26	814.05	0.055 6	1.484	0.799 3
29.5	400	226.57	839.45	0.056 6	1.559	0.790 7
29.5	420	218.62	864.77	0.057 7	1.635	0.783 4
29.5	440	211.31	890.04	0.058 8	1.713	0.777 1
29.5	460	204.55	915.29	0.060 0	1.793	0.771 7
29.5	480	198.28	940.52	0.061 1	1.874	0.766 9
29.5	500	192.44	965.76	0.062 3	1.956	0.762 8
29.5	520	186.98	991.01	0.063 5	2.039	0.759 1
29.5	540	181.87	1 016.29	0.064 6	2.124	0.755 9
29.5	560	177.07	1 041.60	0.065 8	2.210	0.752 9
29.5	580	172.55	1 066.95	0.067 0	2.298	0.750 3
29.5	600	168.29	1 092.35	0.068 2	2.386	0.748 0
30.0	100	662.48	391.45	0.073 1	0.816	1.513 1
30.0	120	585.75	431.62	0.065 4	0.802	1.410 0
30.0	140	520.45	469.71	0.059 8	0.809	1.298 0
30.0	160	467.21	505.33	0.055 9	0.832	1.196 8
30.0	180	424.40	538.62	0.052 8	0.866	1.123 2
30.0	200	389.76	569.97	0.051 6	0.909	1.047 0
30.0	220	361.30	599.80	0.051 1	0.958	0.988 1
30.0	240	337.52	628.48	0.051 0	1.011	0.942 6
30.0	260	317.32	656.28	0.051 3	1.069	0.907 1
30.0	280	299.91	683.41	0.051 7	1.129	0.879 1
30.0	300	284.72	710.03	0.052 3	1.192	0.856 6
30.0	320	271.32	736.26	0.053 1	1.258	0.838 4
30.0	340	259.38	762.21	0.053 9	1.326	0.823 5
30.0	360	248.66	787.93	0.054 8	1.396	0.811 2
30.0	380	238.97	813.49	0.055 8	1.467	0.800 8
30.0	400	230.14	838.94	0.056 8	1.541	0.792 1
30.0	420	222.06	864.30	0.057 9	1.616	0.784 6
30.0	440	214.62	889.61	0.059 0	1.692	0.778 2
30.0	460	207.75	914.89	0.060 1	1.770	0.772 7
30.0	480	201.38	940.15	0.061 3	1.850	0.767 9

表 A.1 超临界二氧化碳物性数据（续）

压力 MPa	温度 ℃	密度 kg/m ³	比焓 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	运动黏度 10 ⁻⁷ m ² /s	普朗特数
30.0	500	195.45	965.42	0.062 4	1.931	0.763 6
30.0	520	189.91	990.70	0.063 6	2.013	0.759 9
30.0	540	184.72	1 016.00	0.064 8	2.096	0.756 6
30.0	560	179.84	1 041.34	0.066 0	2.181	0.753 6
30.0	580	175.25	1 066.71	0.067 2	2.267	0.751 0
30.0	600	170.92	1 092.13	0.068 4	2.354	0.748 6

附录 B

(资料性)

超临界二氧化碳布雷顿循环发电机组启动前吹管方法

B.1 预吹扫

B.1.1 预吹扫的前提条件如下：

- a) 参与预吹扫的管路及临时管路安装验收工作结束；
- b) 管路化学清洗工作已完成；
- c) 工质充装系统分部试运行工作已完成；
- d) 工质充装系统及储罐的仪表调试已完成；
- e) 预吹扫所需的二氧化碳工质等物资准备充足。

B.1.2 预吹扫的程序要点如下：

- a) 系统中所有管道在安装之前经过酸洗或喷砂处理；
- b) 以充装系统为源头，按从上游到下游的顺序依次对充装系统管路、储罐、储罐下游的管路、压缩机前后管路、压缩机和透平的干气密封管路等进行吹扫；
- c) 预吹扫的排空气体通过临时管引至室外安全处，并在排气口设置安全警示装置；
- d) 用于预吹扫的二氧化碳工质压力不宜低于4 MPa，每根管道的吹扫次数不宜少于3次，每次吹扫时间不低于3 min；
- e) 与二氧化碳储罐不直接相连的管路，可先按设计把管路连接成形，但不与上下游的设备连接，对这些管路进行喷砂处理，再用高压CO₂或压缩空气把管路中的焊渣等杂质吹出，最后将清理干净的路与上下游的设备连接；
- f) 预吹扫结束后，压缩机进口至上游过滤器之间的管道不再施焊、引入二次污染。

B.1.3 典型的超临界二氧化碳布雷顿循环系统预吹扫示意图见图 B.1，工作流程如下。

- a) 系统中所有管道在安装之前经过酸洗或喷砂处理。将处理后的管道按设计要求连接。
- b) 通过稳压罐进口管路1向稳压罐3中充装吹扫气体至一定压力，然后关闭阀门2、4、5、7，打开阀门6，对稳压罐3及其排污管46进行吹扫。吹扫完成后，关闭阀门6。
- c) 通过管路47向高压罐8中充装吹扫气体至一定压力，关闭阀门10和26，打开阀门4和9，对高压罐8、管路47和管路48进行吹扫，吹扫完成后关闭阀门4和9。
- d) 将压缩机进出口管路33上的过滤器11和压缩机12分别用临时管31和32替代。向稳压罐3中充装吹扫气体至规定压力，打开阀门13，关闭阀门10和14，然后打开阀门5吹扫压缩机进出口管道33，吹扫气体主要从断口Ⅰ处喷出。向稳压罐3中充装吹扫气体至一定压力，打开阀门14，关闭阀门10和13，然后打开阀门5吹扫压缩机进出口管道33，吹扫气体从断口Ⅱ处喷出。向稳压罐3中充装吹扫气体至一定压力，打开阀门10，关闭阀门13和14，然后打开阀门5吹扫压缩机进出口管道33，吹扫气体从断口Ⅲ处喷出。向稳压罐3中充装吹扫气体至一定压力，打开阀门10、13和14，然后打开阀门5吹扫压缩机进出口管道33，吹扫气体同时从断口Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ处喷出。
- e) 向稳压罐3中充装吹扫气体至一定压力，保持与稳压罐3相连的管路上所有阀门处于关闭状态，然后打开阀门7吹扫管路43，吹扫气体从断口Ⅳ处喷出。
- f) 通过稳压罐3向高压罐8充装吹扫气体至一定压力，打开阀门28，关闭阀门29和30，然后打开阀门26对压缩机干气密封管路进行吹扫，排气从断口Ⅴ处排出；打开阀门29，关闭阀门28和30，然后打开阀门26对再压缩机干气密封管路进行吹扫，排气从断口Ⅵ处排出；打开阀门30，关闭阀门27和28，然后打开阀门26对透平干气密封或冷却气体管路进行吹扫，排气从断口Ⅶ处

排出。

- g) 与稳压罐3或高压罐8不直接相连的管路：34、35、36、37、38、39、40、41、42、44和45，可先按设计把管路连接成形，但不与上下游的设备连接，对这些管路进行喷砂处理，再用高压CO₂或压缩空气把管路中的焊渣等杂质吹出，最后将清理干净的管路与上下游的设备连接。
- h) 恢复管路33、43、27，用过滤器11替换掉临时管31，压缩机替换临时管32，干气密封管路27恢复与压缩机12、再压缩机16和透平21的干气密封系统的连接。

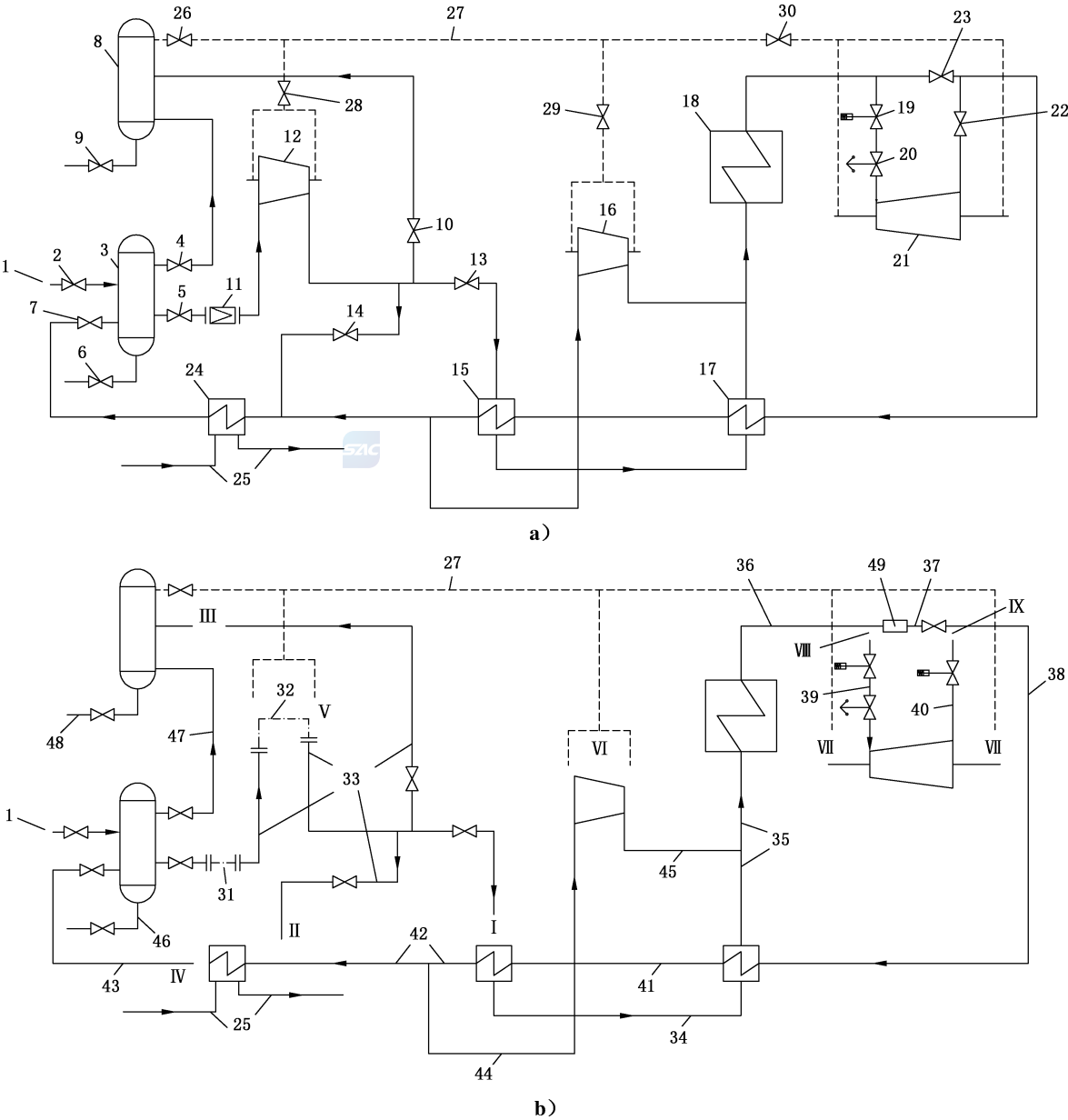


图 B.1 典型的超临界二氧化碳布雷顿循环系统预吹扫示意图

标引序号说明：

- | | |
|----------------|-------------------------|
| 1 ——工质进口； | 26 ——干气密封管路关断阀； |
| 2 ——稳压罐进口关断阀a； | 27 ——干气密封管路； |
| 3 ——稳压罐； | 28 ——压缩机前干气密封气体关断阀； |
| 4 ——稳压罐出口关断阀a； | 29 ——再压缩机前干气密封气体关断阀； |
| 5 ——稳压罐出口关断阀b； | 30 ——透平前干气密封气体关断阀； |
| 6 ——稳压罐排污阀； | 31 ——过滤器段临时管； |
| 7 ——稳压罐进口关断阀b； | 32 ——压缩机段临时管； |
| 8 ——高压罐； | 33 ——压缩机进出口管； |
| 9 ——高压罐排污阀； | 34 ——低温回热器至高温回热器高压侧连接管； |
| 10 ——高压罐进口关断阀； | 35 ——高温回热器至加热器连接管； |
| 11 ——过滤器； | 36 ——加热器出口管； |
| 12 ——压缩机； | 37 ——透平旁路管； |
| 13 ——压缩机出口关断阀； | 38 ——高温回热器低压侧进口管； |
| 14 ——防喘阀； | 39 ——透平进口管； |
| 15 ——低温回热器； | 40 ——透平出口管； |
| 16 ——再压缩机； | 41 ——高温回热器至低温回热器低压侧连接管； |
| 17 ——高温回热器； | 42 ——低温回热器至预冷器连接管； |
| 18 ——加热器； | 43 ——预冷器至稳压罐连接管； |
| 19 ——透平进口关断阀； | 44 ——再压缩机入口管； |
| 20 ——透平进口调节阀； | 45 ——再压缩机出口管； |
| 21 ——透平； | 46 ——稳压罐排污管； |
| 22 ——透平出口关断阀； | 47 ——稳压罐至高压罐联络管； |
| 23 ——透平旁路调节阀； | 48 ——高压罐排污管； |
| 24 ——预冷器； | 49 ——集粒器。 |
| 25 ——循环冷却水管路； | |

图 B.1 典型的超临界二氧化碳布雷顿循环系统预吹扫示意图（续）

B.2 闭式稳压吹管

B.2.1 闭式稳压吹管使用前提条件如下。

- 吹管系统的安装验收工作已完成。
- 设备分系统试运工作已完成。
- 系统热工测量、连锁保护传动等工作已完成。
- 透平监视仪表（TSI）系统安装、验收已完成，防止透平进气的各项措施已落实。
- 透平具备投盘车及抽真空的条件；若不具备盘车投入条件，则隔离透平进气管道与吹管系统。
- 吹管所需的工质、燃料等物资准备充足。

B.2.2 闭式稳压吹管使用程序要点如下。

- 在压缩机进口管路上加装过滤器，在透平位置的临时管路上安装集粒器和过滤器。
- 完成设备系统的全面检查及各项试验。
- 正式投入工质加热器之前，完成系统的冷态循环流动试验，达到最大连续工质流量，开始冷态吹管。冷态吹管过程中，监视集粒器和过滤器的压差，及时清理集粒器和过滤器，直至冷态吹管过程中集粒器和过滤器的压降不再显著增加。
- 首次冷态吹管宜加装靶板，检查吹管系统原始冷态脏污程度及靶板的使用性能。

- e) 冷态吹管完成后,按有关程序和措施进行热态试验,开始热态吹管。
- f) 热态吹管过程中,监视集粒器和过滤器的压差,及时清理集粒器和过滤器。
- g) 热态吹管过程中,逐级增加加热功率和工质循环流量,系统中各位置的吹管系数大于1.0。
- h) 热态吹管达到吹管系数后,每次持续时间不少于15 min。
- i) 热态吹管过程中,至少停机冷却2次,每次停机冷却时间不小于12 h。
- j) 吹管期间,控制主要受热面各部分金属温度不超过规定值。

B.3 吹管质量标准

B.3.1 过热器、再热器吹管系数大于1.0,压缩机进口管路的吹管系数大于1.0。

B.3.2 过热器出口、再热器出口和压缩机进口管道分别设置靶板。

B.3.3 靶板宽度为靶板安装处管道内径的8%且不小于25 mm,厚度不小于5 mm,长度纵贯管道内径;靶板表面粗糙度小于或等于100。

B.3.4 选用铝质材料靶板,连续2次更换靶板检查,无0.8 mm以上的瘢痕,且0.2 mm~0.8 mm范围内的瘢痕不多于8点。

B.3.5 采用钢、铜或其他材质的靶板,验收标准参照制造厂的要求执行。

附 录 C

(资料性)

超临界二氧化碳锅炉工质采样方法

C.1 方法提要

通过测点处工质流通排除采样系统中气体影响，通过多级减压阀与伴热装置实现无凝结降压，通过减压前后两级过滤二氧化碳中固体杂质，通过外接气体色谱仪分析气体杂质，最终在储气罐中收集二氧化碳工质样品。

C.2 采样系统

采用减压与伴热相结合，之后水冷降温流入储气罐的工质收集方法，采样流程见图 C.1。

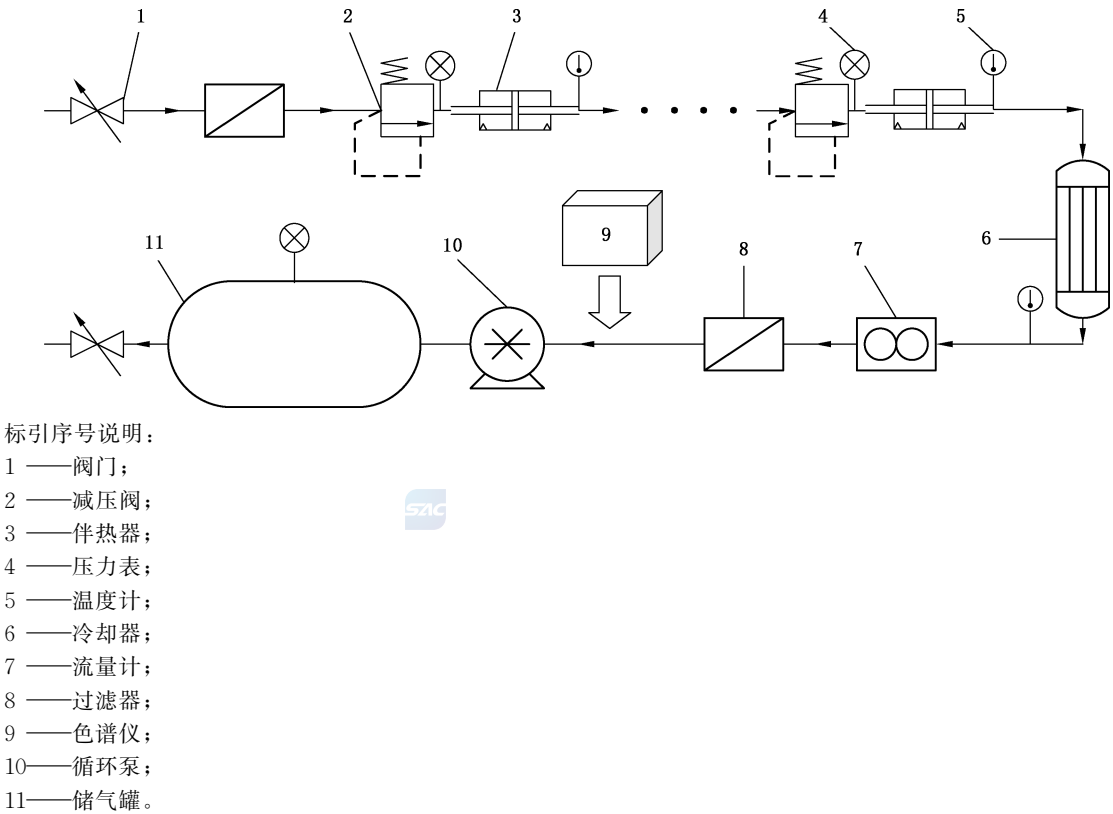


图 C.1 工质采样系统

C.3 采样条件

超临界二氧化碳锅炉工质的采样位置设置在压力、温度相对较低的位置，降低采样对循环系统参数的影响。基于以上分析，超临界二氧化碳循环压缩机前稳压罐位置适于作为超临界流体采样位置，此处为循环过程中压力、温度最低点，同时稳压罐对进入压缩机的工质起到了较好的稳定工况作用，减少了采样过程对循环系统的影响。

C.4 采样步骤

采样步骤如下：

- a) 在密闭采样系统中充满高纯二氧化碳；
- b) 将采样系统入口与储气罐尾部出气口分别与测点位置气口相连接，先打开入口阀门，再打开出口阀门，通过循环泵使工质在采样系统中流通，排出非工质二氧化碳；
- c) 关闭尾部出气口阀门，将从测点引出的二氧化碳工质先通过多级伴热减压阀（降压并防止凝结），再通过冷却管路降低温度，最终流入储气罐储存。

附 录 D

(资料性)

二氧化碳品质要求和检测方法

D.1 二氧化碳的品质要求

对于闭式超临界二氧化碳布雷顿循环，二氧化碳工质在系统内重复加压升温后做功降温减压过程，系统内二氧化碳品质空间分布差异可忽略，系统各处二氧化碳工质执行统一标准；压缩机入口、透平入口布置连续监测点。

购入二氧化碳、新建机组试运行期间工质及运行期间补气标准见表 D.1 中初始二氧化碳质量标准；机组启动前储罐内二氧化碳与正常运行期间循环二氧化碳中杂质标准见表 D.1 中运行二氧化碳质量标准。

表 D.1 二氧化碳质量标准

组分	初始二氧化碳质量标准	运行二氧化碳质量标准
二氧化碳/%	99.9	99.9
氢气/（mL/m ³ ）	5	4 600
氧气/（mL/m ³ ）	 10	100
氮气/（mL/m ³ ）	50	5 700
一氧化碳/（mL/m ³ ）	5	18
总烃（THC）/（mL/m ³ ）	5	7 000
水分/（mL/m ³ ）	15	20
氦气/（mL/m ³ ）	100	100
氩气/（mL/m ³ ）	100	100
硫化氢/（mL/m ³ ）	7	7
二氧化氮/（mL/m ³ ）	4	4
二氧化硅/（μg/kg）	—	10
铁/（μg/kg）	—	5

D.2 二氧化碳品质检测方法

D.2.1 高温高压循环二氧化碳采样方法

二氧化碳采样方法见附录 C，可采用其他等效方法，当不同采样方法存在异议时，以附录 C 中规定的方法为准。

D.2.2 二氧化碳杂质测量方法

D.2.2.1 氧含量的测定方法见 GB/T 6285，可采用其他等效方法，当测定结果有异议时，以 GB/T 6285 规定的方法为准。

D.2.2.2 氢、氮、一氧化碳含量的测定方法见 GB/T 23938，可采用其他等效方法，当测定结果有异议

时，以 GB/T 23938 规定的方法为准。

D.2.2.3 水分含量的测定方法见 GB/T 5832.1 或 GB/T 5832.2，当测定结果有异议时，以 GB/T 5832.2 规定的方法为准。

D.2.2.4 总烃的测定方法见 GB/T 8984，可采用其他等效方法，当测定结果有异议时，以 GB/T 8984 规定的方法为准。

D.2.2.5 金属元素检测。在采样位置连接采样装置，见图 D.1，开启采样口，待二氧化碳工质气体将洗气瓶前的测试系统中空气排净后连接洗气瓶 1 的进气口。二氧化碳气体由采样口出来后经三级酸洗，收集其中的金属元素，三级洗气后的气体流量计记录经过酸洗的二氧化碳气体量。将酸洗液调配至合适状态后加入整合剂使金属元素发生显色反应，测量其在特定波长的紫外吸收峰强度并与标准谱线对比，即可得到溶液中金属离子的浓度，再结合输出气量等数据进行计算，即可得到二氧化碳中金属元素的含量，见 D.2.2.6 和 D.2.2.7。

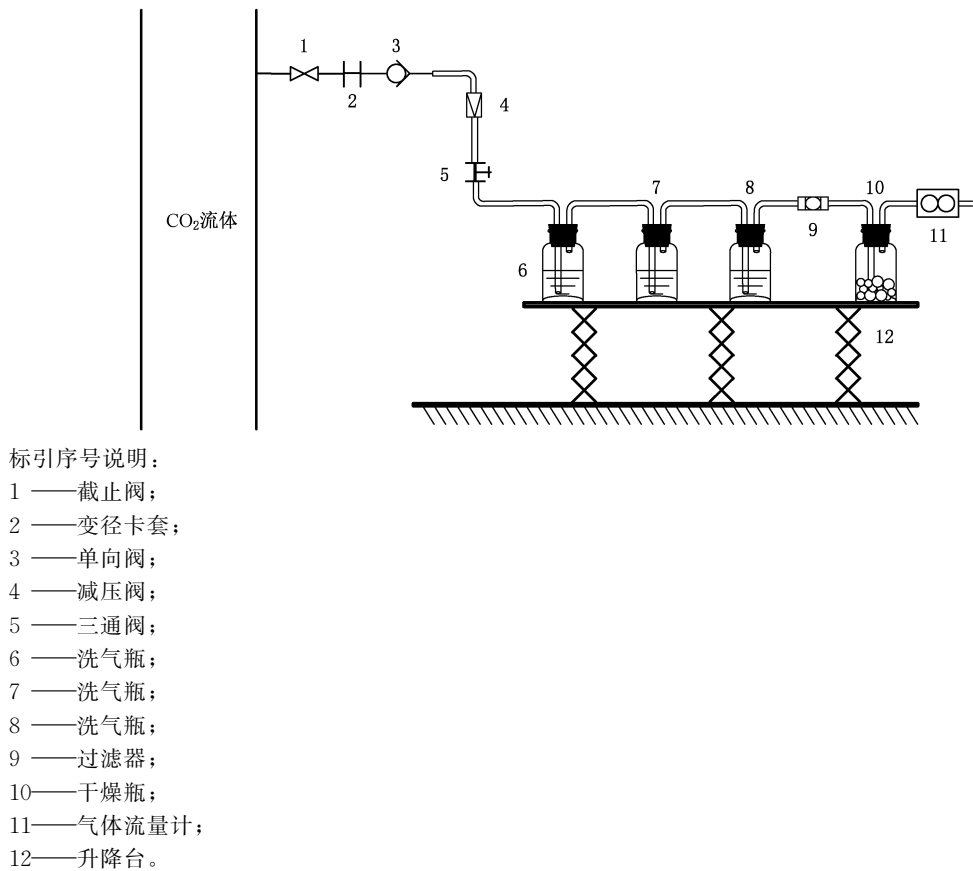


图 D.1 金属元素含量测定采样装置示意图

D.2.2.6 铁元素检测。从洗气瓶中吸取 1.0 mL 的待测溶液，转移至 10 mL 容量瓶中，加入 1.0 mL 乙酸-乙酸钠缓冲溶液（pH=4.6）调节 pH，加入 1 mL 的 1% 盐酸羟胺溶液将溶液中的铁元素全部转化为二价铁，加入 1 mL 0.1% 的邻菲罗啉溶液使其显色，用蒸馏水将混合溶液稀释至刻度，摇匀，放置 10 min，与上述操作相同但不含待测溶液的混合溶液为参比溶液，在紫外分光光度计中测量其在 510 nm 处的吸光度并与标准谱线对比。标准曲线绘制方法如下：称取 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 配置不同浓度的 Fe^{3+} 离子溶液（检测下限为 0.2 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ），使其还原并显色后测量在 510 nm 处的吸光度，还原及显色过程与铁元素检测中相同，以浓度为横坐标、吸光度为纵坐标绘制标准谱线，见图 D.2。元素检测和标准谱线绘制过程使用同一套设备。

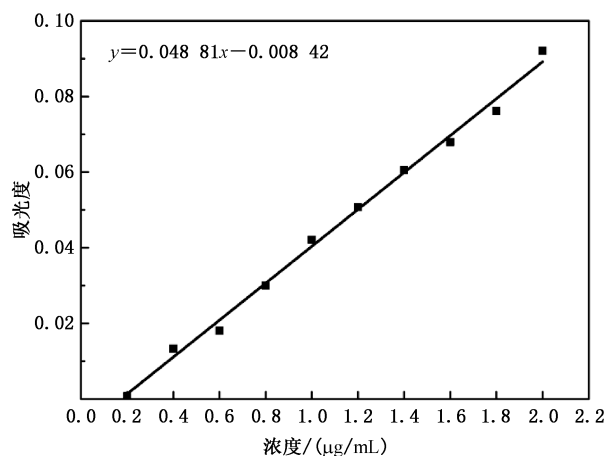


图 D.2 铁元素浓度与吸光度标准谱线图

D.2.2.7 铬元素检测。从洗气瓶中吸取 1.0 mL 的待测溶液，转移至 10 mL 容量瓶中，加水至标线处，加入 1:1 硫酸溶液和 1:1 磷酸溶液各 0.1 mL 调节 pH，摇匀后加入 4%(m/V) 高锰酸钾水溶液至溶液呈现紫红色，将铬元素氧化为六价。加热煮沸至体积约剩 2 mL，冷却后用滴管滴加 2%(m/V) 亚硝酸钠溶液，每加一滴充分摇匀，至高锰酸钾的紫红色刚好褪去，加入 0.2 mL 的 20%(m/V) 尿素溶液消耗剩余的亚硝酸钠，加入 0.4 mL 显色剂（配制方法：0.2 g 二苯碳酰二肼溶于 50 mL 丙酮中，并加水稀释定容至 100 mL）后定容至 10 mL，与上述操作相同但不含待测溶液的混合溶液为参比溶液，在紫外分光光度计中测定其在 540 nm 处的吸光度并与标准谱线对比。标准曲线绘制方法如下：称取 $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 配置不同浓度的 Cr^{3+} 离子溶液（检测下限为 $0.05 \mu\text{g/mL}$ ），使其氧化并显色后测量在 540 nm 处的吸光度，氧化及显色过程与铬元素检测中相同，以浓度为横坐标、吸光度为纵坐标绘制标准谱线，见图 D.3。元素检测和标准谱线绘制过程使用同一套设备。

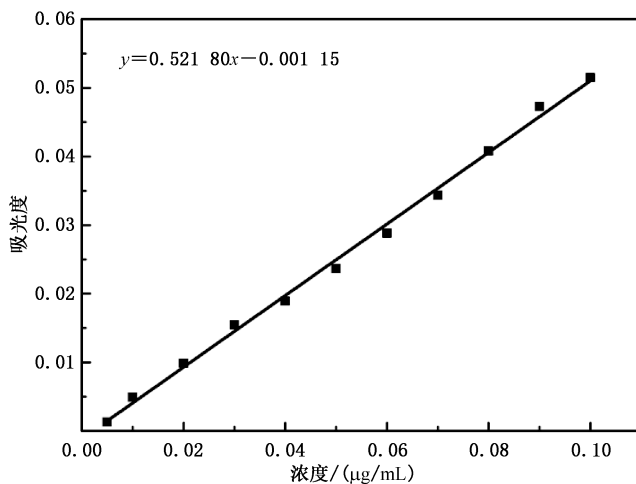


图 D.3 铬元素浓度与吸光度标准谱线图

参 考 文 献

- [1] GB/T 5832.1 气体分析 微量水分的测定 第1部分：电解法
- [2] GB/T 5832.2 气体分析 微量水分的测定 第2部分：露点法
- [3] GB/T 6285 气体中微量氧的测定 电化学法
- [4] GB/T 8984 气体中一氧化碳、二氧化碳和碳氢化合物的测定 气相色谱法
- [5] GB/T 10184 电站锅炉性能试验规程



