

ICS 27.100
F 20
备案号: 63122-2018

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 515 — 2018
代替 DL/T 515 — 2004

电 站 弯 管

Pipe bends for power station

2018-04-03 发布

2018-07-01 实施

国家能源局 发 布

目 次

前言..... II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 2

4 规格与表示方法..... 3

5 技术要求..... 3

6 检验方法..... 7

7 检验规则..... 9

8 标志、包装、贮存..... 9

9 质量文件..... 10

附录 A （资料性附录） 弯管加工推荐数据..... 11

附录 B （资料性附录） 电站弯管常用管材化学成分、力学性能及钢管热处理制度..... 14

附录 C （资料性附录） 弯管弯制前的推荐直管壁厚..... 28

附录 D （规范性附录） 感应加热弯管工艺评定..... 29

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。
本标准与 DL/T 515—2004《电站弯管》相比，主要修订内容如下：

- 删除了工艺分类，将相关内容列入术语和定义中；
- 增加了热弯弯管、冷弯弯管、弯曲半径、不圆度、波浪度、平面度等术语定义，并对弯管不圆度的确定方法进行了修改；
- 修改了弯管直管段长度要求，对两个连续弯之间的直管段长度进行了规定；
- 修改了弯管成形后热处理要求，对 10Cr9Mo1VNbN、10Cr9MoW2VNbBN 等蠕变强度增强型铁素体钢的弯后热处理进行了单独规定，明确规定了 15Ni1MnMoNbCu 材料弯后热处理要求，增加了奥氏体钢材料冷弯后根据设计温度及变形应变确定热处理要求的规定；
- 对弯管成品质量要求进行了补充完善，修改了弯管弯曲半径允许偏差要求；
- 对弯管检验方法进行了补充完善；
- 对附录 A 表 A.1、表 A.3 和表 A.4 中的内容进行了补充修改，增加了表 A.5 奥氏体钢管冷弯后变形条件及热处理要求；
- 对附录 B 电站弯管常用管材化学成分、力学性能及钢管热处理制度按现行适用性标准进行了修订；
- 修改了附录 C 中感应加热弯管弯制前的推荐直管最小壁厚要求；
- 对附录 D 表 D.1 按现行标准对常用钢管材料分类分级进行了调整；对工艺评定几何准则及评定要求进行了修改、补充和完善。

请注意本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电站金属材料标准化技术委员会（DL/TC 23）归口。

本标准负责起草单位：华电电力科学研究院有限公司。

本标准参加起草单位：江苏电力装备有限公司、中国能源建设集团天津电力建设有限公司、华电重工股份有限公司、中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司、江阴东联高压管件有限公司。

本标准主要起草人：郭延军、沈寿林、毛敏、孟庆若、吕继祖、林磊、孙惠民、刘少军。

本标准首次发布日期为 1993 年 3 月 8 日（DL/T 515—1993），2004 年完成第一次修订（DL/T 515—2004），本次是第二次修订。

本标准自实施之日起代替 DL/T 515—2004《电站弯管》。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

电 站 弯 管

1 范围

本标准规定了电站弯管的术语和定义、规格与表示方法、技术要求、检验方法、检验规则、标志、包装和质量文件等要求。

本标准适用于电站主蒸汽、再热蒸汽、主给水管道和一般钢制管道的弯管。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法

GB/T 228.2 金属材料 拉伸试验 第2部分：高温试验方法

GB/T 229 金属夏比缺口冲击试验方法

GB/T 231.1 金属布氏硬度试验 第1部分：试验方法

GB/T 2975 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备

GB/T 3087 低中压锅炉用无缝钢管

GB/T 5310 高压锅炉用无缝钢管

GB/T 6394 金属平均晶粒度测定方法

GB/T 13296 锅炉、热交换器用不锈钢无缝钢管

GB/T 13298 金属显微组织检验方法

GB/T 14976 流体输送用不锈钢无缝钢管

GB/T 16507.4 水管锅炉 第4部分：受压元件强度计算

GB/T 17394.1 金属材料 里氏硬度试验 第1部分：试验方法

GB/T 32270 压力管道规范 动力管道

DL/T 438 火力发电厂金属技术监督规程

DL/T 718 火力发电厂三通及弯头超声波检测

DL/T 819 火力发电厂焊接热处理技术规程

DL/T 869 火力发电厂焊接技术规程

DL/T 1719 采用便携式布氏硬度计检验金属部件技术导则

DL/T 5054—2016 火力发电厂汽水管道设计规范

NB/T 47013.4 承压设备无损检测 第4部分：磁粉检测

NB/T 47013.5 承压设备无损检测 第5部分：渗透检测

ASTM A106 高温用无缝碳钢管规范 (Standard specification for seamless carbon steel pipe for high-temperature service)

ASTM A213 锅炉、过热器及热交换器用铁素体及奥氏体无缝钢管规范 (Standard specification for seamless ferritic and austenitic alloy-steel boiler, superheater, and heat-exchanger tubes)

ASTM A312 无缝、焊接和重度冷加工的奥氏体不锈钢管规范 (Standard specification for seamless, welded, and heavily cold worked austenitic stainless steel pipes)

ASTM A335 高温用无缝铁素体合金钢管规范 (Standard specification for seamless ferritic alloy-steel pipe for high-temperature service)

EN 10216-2 压力用无缝钢管交货技术条件 第 2 部分：具有规定高温性能的合金钢管与非合金钢管 (Seamless steel tubes for pressure purposes—technical delivery conditions part 2: non-alloy and alloy steel tubes with specified elevated temperature properties)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

热弯弯管 hot formed bend

在钢管加热温度满足下列条件下弯制的弯管：

- 对铁素体钢（蠕变强度增强型铁素体钢 10Cr9Mo1VNbN、10Cr9MoW2VNbBN、10Cr11MoW2VNbCu1BN、11Cr9Mo1W1VNbBN、07Cr2MoW2VNbB 等除外），钢管弯曲成形温度 $t \geq (Ac1 - 56) ^\circ C$ 。
- 对蠕变强度增强型铁素体钢 10Cr9Mo1VNbN、10Cr9MoW2VNbBN、10Cr11MoW2VNbCu1BN、11Cr9Mo1W1VNbBN，钢管弯曲成形温度 $t \geq 705 ^\circ C$ ；对 07Cr2MoW2VNbB 钢，钢管弯曲成形温度 $t \geq 605 ^\circ C$ 。
- 对奥氏体钢，钢管弯曲成形温度 $t \geq 300 ^\circ C$ 。

注：Ac1 为钢管材料的下临界温度，单位为 $^\circ C$ ；Ac1 值参见附录 A 表 A.1。

3.2

冷弯弯管 cold formed bend

在环境温度（但不低于 $5 ^\circ C$ ）或钢管加热温度满足下列条件下弯制的弯管：

- 对铁素体钢（蠕变强度增强型铁素体钢 10Cr9Mo1VNbN、10Cr9MoW2VNbBN、10Cr11MoW2VNbCu1BN、11Cr9Mo1W1VNbBN、07Cr2MoW2VNbB 等除外），钢管弯曲成形温度 $t < (Ac1 - 56) ^\circ C$ 。
- 对蠕变强度增强型铁素体钢 10Cr9Mo1VNbN、10Cr9MoW2VNbBN、10Cr11MoW2VNbCu1BN、11Cr9Mo1W1VNbBN，钢管弯曲成形温度 $t < 705 ^\circ C$ ；对 07Cr2MoW2VNbB 钢，钢管弯曲成形温度 $t < 605 ^\circ C$ 。
- 对奥氏体钢，钢管弯曲成形温度 $t < 300 ^\circ C$ 。

3.3

弯曲半径 bend radius

弯管的弯曲中心点至弯管中心轴线的距离，用 R 表示。

3.4

不圆度 out-of-roundness

弯管同一截面上最大外径和最小外径差值的 2 倍与最大外径加最小外径之和的比值，用百分数表示。

3.5

波高 vertical height of wave

弯管内弧面两相邻波峰峰顶（或褶皱峰顶）处弯管外径的平均值与该两波峰之间波谷谷底处弯管外径的差值，用 h 表示。

3.6

波距 distance between the wave crest

弯管内弧面两相邻波峰峰顶（或褶皱峰顶）之间的最短距离，用 A 表示。

3.7

波浪度 wave degree

波高 h 与钢管外径 D_0 之比，用百分数表示。

3.8

平面度 flat plane of bend

弯管平面与其理论平面的偏差值。

4 规格与表示方法

4.1 规格

电站弯管的规格范围如下：

——钢管外径 D_o ： $D_o \leq 1220\text{mm}$ 。

——钢管壁厚 S ： $S \leq 120\text{mm}$ 。

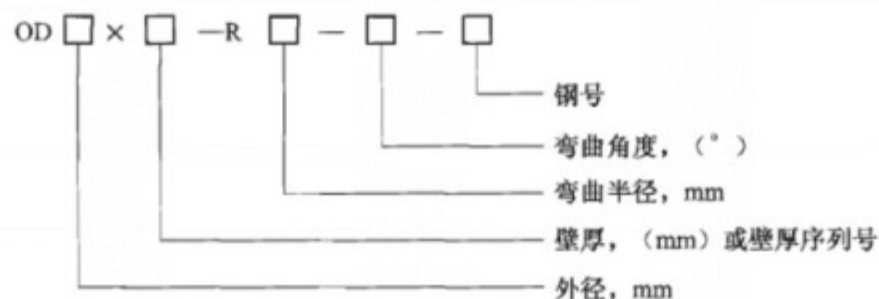
——弯曲半径 R ：碳钢管 $R \geq 2.5D_o$ ；合金钢管和奥氏体不锈钢管 $R \geq 3.0D_o$ 。

——弯曲角度 θ ： $\theta \leq 100^\circ$ 。

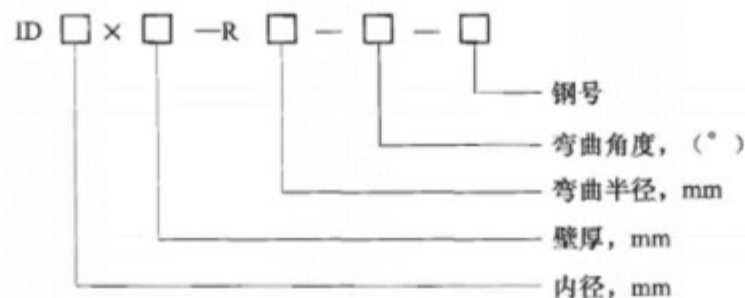
注：当弯管规格超出上述范围时，弯管检验标准由供需双方协商确定。

4.2 表示方法

对于外径管，弯管表示方法如下：



对于内径管，弯管表示方法如下：



示例1：外径 D_o 为 325mm，壁厚 S 为 30mm，钢号为 12Cr1MoVG，弯曲半径 R 为 1300mm，弯曲角度 θ 为 90° 的弯管表示为：OD325×30-R1300-90°-12Cr1MoVG。

示例2：外径 D_o 为 168mm，壁厚序列号为 Sch40，钢号为 A106B，弯曲半径 R 为 900mm，弯曲角度 θ 为 90° 的弯管表示为：OD168×Sch40-R900-90°-A106B。

示例3：内径 D_i 为 370mm，壁厚 S 为 40mm，钢号为 A335P91，弯曲半径 R 为 1800mm，弯曲角度 θ 为 90° 的弯管表示为：ID370×40-R1800-90°-A335P91。

5 技术要求

5.1 钢管入厂验收的基本要求

5.1.1 钢管应有钢号及标准代号标记，钢管标记应符合采购合同或相关钢管技术标准要求。

5.1.2 钢管材料应按质量合格证书或质量证明书进行质量验收。质量合格证书或质量证明书应标明钢号、化学成分、力学性能（常用管材化学成分及力学性能参见附录 B 表 B.1～表 B.4）及必要的热处理

工艺等。数据不全的应进行补检，补检的方法、范围、数量应符合国家标准或行业标准。进口钢管除应符合合同规定的有关国家的技术标准外，还应有原产地证明及入境货物检验检疫证明。

5.2 弯制前准备

5.2.1 钢管在弯制前应验证其钢号，钢管直径和壁厚应符合相应的钢管技术标准及设计要求。

5.2.2 钢管在弯制前应做外观检查，并应符合以下要求：

- a) 钢管表面不应有裂纹、折叠、结疤、轧折和重皮等缺陷；
- b) 钢管表面应光滑，不应有尖锐划痕，以及深度超过 1.5mm、尺寸大于钢管周长的 5%或 40mm（取两者较小值）的凹陷；
- c) 经检查发现有重皮、裂纹、划痕、凹坑等局部缺陷的钢管，应逐步修磨直至缺陷完全消除，修磨后的实际壁厚仍应符合其相应的钢管技术标准要求或设计要求。

5.2.3 合金钢管弯制前应进行光谱分析和硬度检验。

5.2.4 主蒸汽、高温再热蒸汽和高压给水管道用钢管弯制前应按照 DL/T 438 的规定对钢管端头 500mm 区段内进行夹层缺陷检测。

5.2.5 弯管弯制前的直管最小壁厚可参照附录 C 给出的推荐值选用。弯制时应将直管较厚的一侧置于弯管的受拉侧。

5.2.6 钢管在下料时宜保存材料的原始标记。当无法保存原始标记时，应进行钢管材料标记（包括钢号和钢管炉批号）移植。材料标记移植应符合以下要求：

- a) 对于主蒸汽管道、再热蒸汽管道和高压给水管道，宜进行钢印标记移植，钢印标记应清晰完整，其字体大小不应小于 3.5 号；钢印标记宜采用低应力钢印—钝头连续点字模或钝头断续点字模，也可用“圆头”或“球形”冲头打印；每一字模不应呈现尖锐状和危及钢管设计厚度的深坑。
- b) 当奥氏体不锈钢材料采用色码标记时，印色不应含有硫、铅和氯等对材料产生损害的物质。
- c) 对于其他管道，材料标记移植方法由供需双方协商确定。
- d) 移植的标记应位于便于识别的直管段上。

5.3 弯管工艺评定

5.3.1 管子的弯曲成形应根据材料、规格、弯曲半径、弯管形状和弯管设备选用热弯或冷弯弯管。

5.3.2 弯管成形应进行弯管工艺评定试验。感应加热弯管工艺评定要求应按附录 D 的规定进行。

5.3.3 弯管工艺评定试验应由具备资质的第三方检验机构进行现场见证。

5.4 弯制工艺要求

5.4.1 弯管每端应有直管段，直管段长度应符合以下要求：

- a) 热弯弯管的直管段长度不宜小于管子外径；对于感应加热弯管，推荐的直管段长度参见附录 A 表 A.2。
- b) 对于外径 $D_o \leq 610\text{mm}$ 的管子，感应加热弯管两个连续弯之间的直管段长度不宜小于 610mm；对于外径 $D_o > 610\text{mm}$ 的管子，感应加热弯管两个连续弯之间的直管段长度不宜小于 1500mm。
- c) 冷弯弯管的两端直管段及两个连续弯之间的直管段长度不宜小于管子外径的 2 倍。

5.4.2 弯管过程中管子不应与腐蚀性介质或有害物质接触。

5.4.3 应按评定合格的弯管工艺进行弯管，不应弯制评定范围以外的钢管。热弯弯管宜采用感应加热方法进行弯制。螺旋焊管和直缝焊管不宜用作冷弯弯管。

5.4.4 热弯弯管应严格控制加热温度和加热范围，奥氏体不锈钢管热弯时应防止加热过程中的渗碳并

避开引起晶间腐蚀的敏化温度。热弯弯管推荐的加热温度及冷却方式参见附录 A 表 A.3。

5.5 热处理要求

5.5.1 需要热处理的弯管，应采用整体热处理方法，并应符合 DL/T 819 的规定。

5.5.2 公称壁厚大于 19.0mm 的碳钢管，若弯制温度低于 900℃，弯制后应对弯管进行回火热处理。

5.5.3 对于外径 $D_o < 114.3\text{mm}$ 或公称壁厚小于 12.7mm 的合金钢管（蠕变强度增强型铁素体钢和奥氏体钢除外），热弯后应进行回火热处理。对于外径 $D_o \geq 114.3\text{mm}$ 或公称壁厚大于或等于 12.7mm 的合金钢管（蠕变强度增强型铁素体钢和奥氏体钢除外），弯制成形后应按下述要求进行热处理：

- 对于冷弯弯管，应进行消除应力热处理，推荐的热处理制度参见附录 A 表 A.4；
- 对于热弯弯管，应按弯管合格工艺评定文件或设计要求进行完全退火、正火加回火或回火热处理，推荐的热处理制度参见附录 B 表 B.5。

5.5.4 对蠕变强度增强型铁素体钢 10Cr9Mo1VNbN、10Cr9MoW2VNbBN、10Cr11MoW2VNbCu1BN 和 11Cr9Mo1W1VNbBN，弯制成形后应按下列要求进行热处理：

- 热弯弯管应按相应钢管标准要求进行正火加回火热处理。
- 冷弯弯管应按表 1 的规定进行热处理。

表 1 蠕变强度增强型铁素体钢管冷弯后热处理规定

材料牌号	设计温度 t ℃	应变率 ϵ %	热处理要求
07Cr2MoW2VNbB	$t \leq 480$	—	不强制进行热处理
	$t > 480$	> 20	正火+回火
		$> 5 \sim 20$	消除应力热处理
10Cr9Mo1VNbN	$540 < t \leq 600$	> 25	正火+回火
10Cr9MoW2VNbBN		$> 5 \sim 25$	消除应力热处理
10Cr11MoW2VNbCu1BN	$t > 600$	> 20	正火+回火
11Cr9Mo1W1VNbBN		$> 5 \sim 20$	消除应力热处理

注 1：弯管变形应变率的计算方法见式 (1)。
注 2：正火加回火热处理制度应与相应钢管标准要求一致。

5.5.5 对蠕变强度增强型铁素体钢 07Cr2MoW2VNbB，弯制成形后应按下列要求进行热处理：

- 公称壁厚小于 12.7mm 的冷弯弯管，应按表 1 的规定进行热处理。
- 公称壁厚大于或等于 12.7mm 的弯管或变形应变率大于 5% 的热弯弯管，应按相应钢管标准要求进行正火加回火热处理；变形应变率小于或等于 5% 的弯管，当采用冷弯成形或成形温度小于或等于 790℃ 的热弯成形时，可不进行热处理。

5.5.6 奥氏体钢管弯制成形后热处理要求如下：

- 冷弯成形后的热处理要求应根据设计温度及变形应变率确定（参见附录 A 表 A.5），弯管变形应变率 ϵ 的计算公式如下：

$$\epsilon(\%) = 50D_o/R \quad (1)$$

式中：

D_o ——管子外径，mm；

R ——弯曲半径，mm。

- 如果热弯弯管的弯制成形结束温度不低于附录 A 表 A.5 规定的最低热处理温度，同时温度保持时间按管子壁厚达到 0.8min/mm 且不少于 10min，则可不进行热处理。

c) 未列入附录 A 表 A.1 中的奥氏体合金钢管弯后不强制要求热处理。

5.5.7 对 15Ni1MnMoNbCu 材料的热弯弯管或变形应变率超过 5% 的冷弯弯管, 应按相应钢管材料标准要求进行处理。

5.5.8 对于规格、材料在 5.5.2~5.5.7 规定之外的弯管, 其热处理要求应由供需双方协商确定。

5.5.9 热处理后, 当弯管角度超出允许偏差值时, 对碳素钢及合金钢管 (蠕变强度增强型铁素体钢除外), 可采用低于该钢种回火温度 30℃ 的温度进行校正; 对 10Cr9Mo1VNbN、10Cr9MoW2VNbBN、10Cr11MoW2VNbCu1BN 和 11Cr9Mo1W1VNbBN 钢管, 校正加热温度不应高于 675℃; 对 07Cr2MoW2VNbB 钢管, 校正加热温度不应高于 575℃。

5.6 成品质量要求

5.6.1 弯管表面不应有裂纹、折叠、重皮、凹陷、尖锐划痕等缺陷。表面发现裂纹、重皮等缺陷, 应逐步修磨直至缺陷完全消除, 修磨后的实际壁厚应符合 5.6.3 的要求。

5.6.2 弯管不应有过烧组织, 不应出现晶间裂纹。

5.6.3 弯管实测壁厚不应小于弯管相应部位的设计最小壁厚, 且任何一点的实测壁厚不应小于与其相连直管的最小壁厚。对电站汽水管, 直管最小壁厚及弯管外弧面、内弧面和中性层的壁厚应分别按 DL/T 5054—2016 中 5.2 和 5.3 相应公式计算确定; 对 GB/T 32270 规定的锅炉本体管道, 直管最小壁厚及弯管外弧面、内弧面和中性层的壁厚应按照 GB/T 16507.4 的要求计算确定。

5.6.4 热弯弯管的不圆度不应大于 7%; 冷弯弯管的不圆度不应大于 8%; 对于主蒸汽管道、再热蒸汽管道及设计压力大于 8MPa 的管道, 弯管不圆度不应大于 5%。弯管两端直管段端部的不圆度应符合相应钢管技术标准要求。

5.6.5 平面弯管弯曲角度 θ (见图 1) 的允许偏差为 $\pm 0.5^\circ$; 不在同一平面上两个连续弯空间夹角 β (见图 2) 的允许偏差要求为:

- a) 当夹角成 90° 时, 允许偏差为 $\pm 1^\circ$;
- b) 当夹角不成 90° 时, 允许偏差为 $\pm 1.5^\circ$ 。

5.6.6 弯管的弯曲半径允许偏差为 $\pm 1\%R$, 且不应超过 $\pm 50\text{mm}$ 。

5.6.7 热弯弯管的波浪度不应大于 2%, 冷弯弯管的波浪度不应大于 3%, 且波距 A 与波高 h 之比应大于 12 (见图 3)。

5.6.8 同一平面上弯管 (包括两个连续弯) 的平面度应符合表 2 的规定。

表 2 同一平面上弯管的平面度 单位: mm

结构尺寸 L	≤ 500	$> 500 \sim 1000$	$> 1000 \sim 1500$	> 1500
平面度	≤ 3	≤ 4	≤ 6	≤ 10

5.6.9 弯管两端坡口应符合设计图纸或 DL/T 869 的规定。

5.6.10 弯管两端坡口加工后的结构尺寸 L (见图 1) 的允许偏差 ΔL 应符合表 3 的规定。

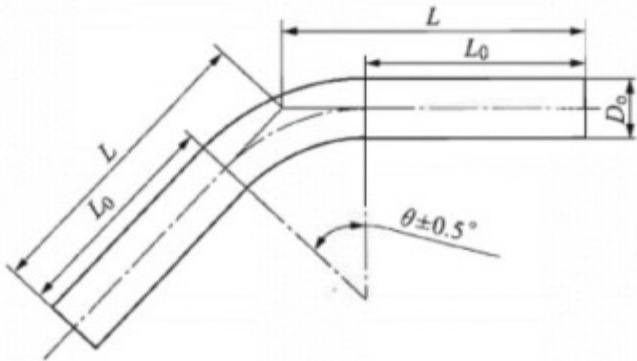


图 1 平面弯管弯曲角度允许偏差

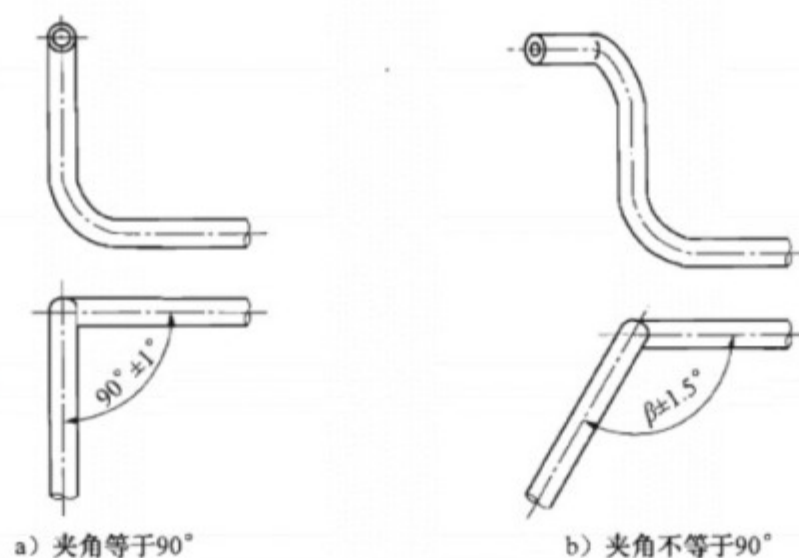


图2 不在同一平面上两个连续弯的空间夹角允许偏差

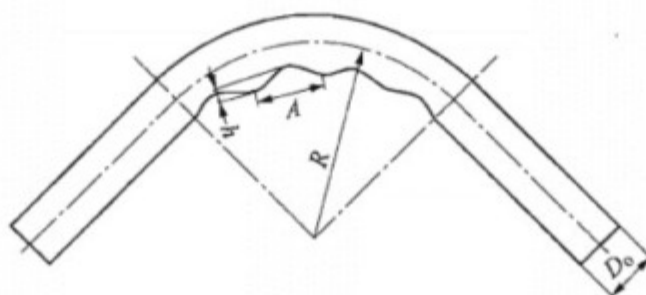


图3 弯管波浪度示意图

表3 结构尺寸允许偏差

单位: mm

结构尺寸 L	$L \leq 1000$	$1000 < L \leq 3000$	$L > 3000$
允许偏差 ΔL	± 3	± 4	± 5

5.6.11 合金钢弯管热处理后的硬度值、显微组织和晶粒度应符合相应的钢管技术标准要求。

5.6.12 弯管应清除内外壁异物，并按供需双方协议规定的方法进行表面处理。

6 检验方法

6.1 检验条件

采用加热弯曲的弯管，应在弯管冷却到室温后方可检验；弯后需进行热处理的，应以热处理后的检验结果进行最终判定。

6.2 外观检查

目测或采用放大镜、照明工具等对弯管内外表面进行检查，检查结果应符合 5.6.1 的要求。

6.3 无损检测

按照 NB/T 47013.4 或 NB/T 47013.5 对弯管弯曲部分的外弧面（受拉侧）中心线上下各 45°区域进行磁粉或渗透检测，I 级为合格；需要时，按照 DL/T 718 对弯管弯曲部分受拉侧中心线上下各 45°区域进行超声检测，I 级为合格。

6.4 壁厚检验

用超声波测厚仪在弯管外弧面（受拉侧）中心线上至少均匀取 5 点进行检验，需要时，在内弧面

(受压面) 和中性层中心线上各取 1~3 点进行检验, 检验结果应符合 5.6.3 的要求。

6.5 不圆度检验

用外卡尺或卡规、直尺在弯管弯曲部分至少均匀取 5 个截面进行检验, 检验结果应符合 5.6.4 的要求。

6.6 弯曲角度检验

平面夹角 θ 可采用角度尺、放样检查或通过测量以弯管两端直管段中心线为两边的三角形的三个边长 a 、 b 、 c (如图 4 所示), 用式 (2) 或式 (3) 进行计算。空间夹角通过放样测量。检验结果应符合 5.6.5 的要求。

$$a \neq b \text{ 时, } \theta = 180^\circ - \arccos[(a^2 + b^2 - c^2)/(2ab)] \quad (2)$$

$$a = b \text{ 时, } \theta = 2\arccos(0.5c/a) \quad (3)$$

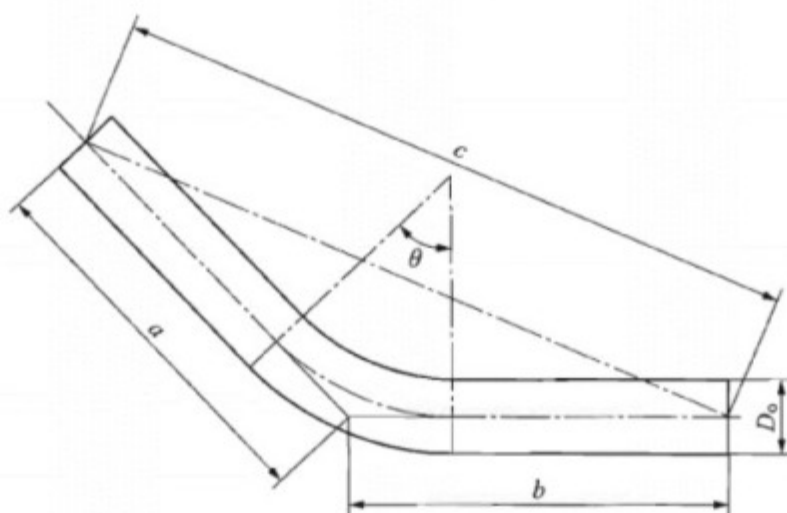


图 4 弯曲角度计算示意图

6.7 弯曲半径检验

弯管弯曲半径可采用样板、钢直尺在弯管中心平面上测量或用钢卷尺、划规划出弯管理论弧线后进行摆样检验, 检验结果应符合 5.6.6 的要求。

6.8 波浪度检验

用卡尺、卡规和直尺在目测波浪度最大的两个相邻波峰及波谷处测量波高和波距, 波浪度及波距与波高比值应符合 5.6.7 的要求。

6.9 平面度检验

将弯管水平放置在平台上, 呈自然状态, 用塞尺、标准塞块或内卡规和直尺检验, 检验结果应符合 5.6.8 的要求。

6.10 坡口尺寸检验

用游标卡尺、万能角度尺或角度样板尺对加工好的坡口进行检验, 检验结果应符合 5.6.9 的要求。

6.11 结构尺寸检验

将弯管水平放置并调平, 用水平仪和钢直尺在弯管两端直管段中心线上分别至少确定 2 点, 再用钢卷尺和辅助测量工具测量结构尺寸 L (见图 1), 检验结果应符合 5.6.10 的要求。

6.12 硬度检验

按照 GB/T 231.1、GB/T 17394.1 或 DL/T 1719, 用硬度计分别在弯曲部分的外弧面(受拉侧)和中性侧各检验 3 个~5 个测点, 每个测点取 5 个读数的平均值作为该测点的硬度, 检验结果应符合 5.6.11 的要求。

6.13 显微组织检验

按照 GB/T 13298 和 GB/T 6394, 用金相显微镜在弯曲部分外弧面分别进行显微组织检验和晶粒度检验, 检验结果应符合 5.6.11 的要求。

7 检验规则

7.1 外观、结构尺寸、坡口尺寸

应对每根弯管的外观、结构尺寸、坡口尺寸进行检验。

7.2 弯曲半径

应对弯曲半径相同的同种规格、同种材料的首根弯管进行检验。

7.3 壁厚、不圆度、弯曲角度、平面度、波浪度

对主蒸汽管道、再热蒸汽管道和主给水管道的弯管应逐根进行检验。对其他管道的弯管按每批或每种规格抽检 20%, 但每种规格不应少于 1 根。当抽检发现不合格项目时, 应对该项目进行 100% 检验。

7.4 硬度

合金钢弯管应在热处理后逐根进行硬度检验。

7.5 显微组织

对主蒸汽管道和高温再热蒸汽管道的弯管应逐根进行显微组织检验。对其他管道的弯管按每炉或每批抽检 20%, 但不应少于 1 根。当抽检发现 1 根不合格时, 应将该炉(批)抽检改为逐根检验。

7.6 无损检测

对于设计温度大于 450℃ 的主蒸汽管道和高温再热蒸汽管道, 以及 300MW 及以上机组的低温再热蒸汽管道和主给水管道, 应逐根进行磁粉或渗透检测, 并对其中同种规格、同种材料的弯管按其数量的 10% 进行超声波抽检, 但不应少于 1 根。被抽检的弯管应包括弯曲半径较小的弯管。当抽检发现裂纹或分层缺陷时, 应对该批弯管逐根进行超声波检测。其他管道弯管的无损检测要求由供需双方协商确定。

8 标志、包装、贮存

8.1 标志

在弯管直管段上应醒目地标示出直径、壁厚、钢号、弯曲半径、弯曲角度(或以供需双方商定的内容进行标记), 以及制造厂名、制造日期等内容。主蒸汽管道、再热蒸汽管道和主给水管道的弯管还应在直管段上用钢印作材料标记(包括钢号和钢管炉批号)。

8.2 包装

弯管两端坡口应采取防锈措施, 并用木制、金属、塑料或橡胶封盖予以保护。不锈钢弯管不应采

用对其有危害的材料进行包装。

8.3 贮存

弯管贮存期间不应与腐蚀性介质或有害物质相接触。

9 质量文件

弯管出厂质量文件应包括：

- a) 外观检查及无损检测报告；
- b) 弯曲角度、尺寸与形状偏差（包括弯曲半径、壁厚、不圆度、平面度、波浪度、结构尺寸、坡口尺寸等）检验报告；
- c) 合金钢弯管的硬度和显微组织检验报告；
- d) 热处理报告（适用时）。

附录 A
(资料性附录)
弯管加工推荐数据

A.1 钢管材料的下临界温度 A_{c1} 的近似值见表 A.1。

表 A.1 钢管材料的下临界温度 A_{c1} 的近似值

钢 种	Ac1 的近似值 ℃
碳素钢 (20、20G、A106B、A106C、FPA、FPB、P235GH)	725
C-Mo 钢 (15MoG、P1、FP1、16Mo3)	730
1.15Ni-0.65Cu-Mo-Nb 钢 (15Ni1MnMoNbCu、15NiCuMoNb5-6-4、P36)	725
1Cr-0.5Mo 钢 (15CrMoG、P12、FP12、13CrMo4-5)	745
1.25Cr-0.5Mo-Si 钢 (T11、P11、FP11)	775
2.25Cr-1Mo 钢 (12Cr2MoG、T22、P22、FP22、10CrMo9-10)	805
3Cr-1Mo 钢 (T21、P21、FP21)	
5Cr-0.5Mo 钢 (T5、P5、FP5)	820
9Cr-1Mo 钢 (T9、P9、FP9)	800
9Cr-1Mo-V 钢 (10Cr9Mo1VNbN、T91、P91、FP91、X10CrMoVNb9-1)	800
9Cr-2W 钢 (10Cr9MoW2VNbBN、T92、P92、FP92、X10CrWMoVNb9-2)	
注：表中数据仅供参考，对括号内的具体材料，应采用该材料的相应温度代替表中数值。	

A.2 采用感应加热弯曲时，弯管两端直管段长度 L_0 的推荐值见表 A.2。

表 A.2 弯管两端直管段长度 L_0 的推荐值

单位：mm

管子外径 D_0	$D_0 \leq 219.1$	$219.1 < D_0 \leq 323.9$	$323.9 < D_0 \leq 508$	$D_0 > 508$
直管段长度 L_0	500	800	1200	1500

A.3 热弯弯管推荐的加热温度及冷却方式见表 A.3。

表 A.3 热弯弯管推荐的加热温度及冷却方式

钢 种	加热温度 ℃	冷却方式
碳素钢 ($C \leq 0.35\%$)	≤ 1000	$S \leq 25\text{mm}$: 喷水冷却 $S > 25\text{mm}$: 强迫风冷
C-Mo 钢	≤ 1000	强迫风冷
1.15Ni-0.65Cu-Mo-Nb 钢	≤ 950	强迫风冷
1Cr-0.5Mo 钢	≤ 900	强迫风冷
1Cr-0.5Mo-V 钢		
1.25Cr-0.5Mo-Si 钢		

表 A.3 (续)

钢 种	加热温度 ℃	冷 却 方 式
2.25Cr-1Mo 钢	≤900	强迫风冷
9Cr-1Mo-V 钢 9Cr-2W 钢	≤800	强迫风冷
18Cr-8Ni 钢	1050~1100	喷水冷却
16Cr-12Ni-2Mo 钢	≤1050	强迫风冷

A.4 铁素体钢管冷弯后推荐的热处理制度见表 A.4。

表 A.4 铁素体钢管冷弯后推荐的热处理制度

钢 种	保温温度 ℃	最少保温时间
碳素钢 ($C \leq 0.35\%$) C-Mo 钢 0.5Cr-0.5Mo 钢	595~650	按壁厚每毫米 2.4min 计, 但至少 15min
1Cr-0.5Mo 钢 1.25Cr-0.5Mo-Si 钢	650~705	按壁厚每毫米 2.4min 计, 但至少 15min
1Cr-0.5Mo-V 钢	700~750	按壁厚每毫米 2.4min 计, 但至少 15min
2.25Cr-1Mo 钢 3Cr-1Mo 钢 5Cr-0.5Mo 钢 9Cr-1Mo 钢	675~760	按壁厚每毫米 2.4min 计, 但至少 15min
9Cr-1Mo-V 钢 9Cr-2W 钢	根据钢管设计温度及冷弯后的变形应变率确定热处理制度。若采用正火加回火热处理, 则应与相应钢管材料标准一致。若采用消除应力热处理, 则保温温度应为 730℃~775℃, 保温时间应按壁厚每毫米 2.4min 计, 且至少 30min	

A.5 奥氏体钢管冷弯后推荐的热处理要求见表 A.5。

表 A.5 奥氏体钢管冷弯后推荐的热处理要求

钢号	UNS 号	标准号	较低设计温度限制范围		较高设计温度限制范围		热处理温度 ℃
			设计温度 t ℃	应变率 ϵ %	设计温度 t ℃	应变率 ϵ %	
07Cr9Ni10	—	GB/T5310	$580 < t \leq 675$	> 20	> 675	> 10	1040~1120
10Cr18Ni9NbCu3BN	—		$540 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1100~1180
07Cr25Ni21NbN	—		$540 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1100~1230
07Cr19Ni11Ti	—		$540 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1100~1180
07Cr18Ni11Nb	—		$540 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1100~1230
08Cr18Ni11NbFG	—		$540 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1180~1250
TP304	S30400	ASTM A213	$580 < t \leq 675$	> 20	> 675	> 10	1040~1120
TP304H	S30409	ASTM A312	$580 < t \leq 675$	> 20	> 675	> 10	1040~1120
—	S30432	ASTM A213	$540 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1100~1180

表 A.5 (续)

钢号	UNS 号	标准号	较低设计温度限制范围		较高设计温度限制范围		热处理温度 ℃
			设计温度 t ℃	应变率 ε %	设计温度 t ℃	应变率 ε %	
TP304N	S30451	ASTM A213 ASTM A312	$580 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1040~1120
TP309S	S30908		$580 < t \leq 675$	> 20	> 675	> 10	1095~1175
TP310H	S31009		$580 < t \leq 675$	> 20	> 675	> 10	1095~1175
TP310S	S31008	ASTM A213 ASTM A312	$580 < t \leq 675$	> 20	> 675	> 10	1095~1175
TP310HCbN	S31042		$540 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1095~1225
TP316	S31600		$580 < t \leq 675$	> 20	> 675	> 10	1040~1120
TP316H	S31609	ASTM A213 ASTM A312	$580 < t \leq 675$	> 20	> 675	> 10	1040~1120
TP316N	S31651		$580 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1040~1120
TP321	S32100		$540 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1040~1120
TP321H	S32109	ASTM A213 ASTM A312	$540 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1100~1180
TP347	S34700		$540 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1040~1170
TP347H	S34709		$540 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1100~1220
TP347HFG	S34710	ASTM A213	$540 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1175~1255
TP348	S34800	ASTM A213	$540 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1040~1170
TP348H	S34809	ASTM A312	$540 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1100~1220
—	N06230	ASTM B622	$595 < t \leq 760$	> 15	> 760	> 10	1205~1285
600	N06600	ASTM B167	$580 < t \leq 650$	> 20	> 650	> 10	1040~1120
601	N06601		$580 < t \leq 650$	> 20	> 650	> 10	1040~1120
617	N06617		$650 < t \leq 760$	> 15	> 760	> 10	1150~1230
690	N06690	ASTM A312 ASTM B407	$580 < t \leq 650$	> 20	> 650	> 10	1040~1120
800	N08800		$595 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	980~1060
800H	N08810		$595 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1120~1200
—	N08811	ASTM A213 ASTM A312	$595 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1150~1230
—	S30815		$580 < t \leq 675$	> 15	> 675	> 10	1050~1130
—	N06022		$580 < t \leq 675$	> 15	—	—	1120~1200

注：对 07Cr19Ni11Ti、TP321 和 TP321H 材料，当弯管外径小于 89mm 时，较低设计温度限制范围内的弯管变形应变率限制条件由大于 15% 提高到大于 20%。

附录 B
(资料性附录)
电站弯管常用管材化学成分、力学性能及钢管热处理制度

B.1 化学成分

B.1.1 电站弯管常用国产管材的化学成分见表 B.1。

表 B.1 电站弯管常用国产管材的化学成分

钢 号	标准号	化学成分 (质量分数) %												
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ti	B	W	Ni	Al	Cu	Nb
														N
10	GB/T 3087	0.07~0.13	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.15	—	—	—	—	—	≤0.30	—	≤0.25	—
														P S 不大于 0.035 0.035
20	GB/T 3087	0.17~0.23	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.25	—	—	—	—	—	≤0.30	—	≤0.25	—
														P S 0.035 0.035
20G	GB/T 5310	0.17~0.23	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.25	≤0.15	≤0.08	—	—	—	≤0.25	—	≤0.20	—
														P S 0.025 0.015
20MnG	GB/T 5310	0.17~0.23	0.17~0.37	0.70~1.00	≤0.25	≤0.15	≤0.08	—	—	—	≤0.25	—	≤0.20	—
														P S 0.025 0.015
25MnG	GB/T 5310	0.22~0.27	0.17~0.37	0.70~1.00	≤0.25	≤0.15	≤0.08	—	—	—	≤0.25	—	≤0.20	—
														P S 0.025 0.015
15MoG	GB/T 5310	0.12~0.20	0.17~0.37	0.40~0.80	≤0.30	0.25~0.35	≤0.08	—	—	—	≤0.30	—	≤0.20	—
														P S 0.025 0.015
20MoG	GB/T 5310	0.15~0.25	0.17~0.37	0.40~0.80	≤0.30	0.44~0.65	≤0.08	—	—	—	≤0.30	—	≤0.20	—
														P S 0.025 0.015
12CrMoG	GB/T 5310	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.40~0.70	0.40~0.55	≤0.08	—	—	—	≤0.30	—	≤0.20	—
														P S 0.025 0.015
15CrMoG	GB/T 5310	0.12~0.18	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.40~0.55	≤0.08	—	—	—	≤0.30	—	≤0.20	—
														P S 0.025 0.015

表 B.1 (续)

钢 号	标准号	化学成分 (质量分数) %																
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ti	B	W	Ni	Al	Cu	Nb	N	P S		
																不大于		
12Cr2MoG	GB/T 5310	0.08~0.15	≤0.50	0.40~0.60	2.00~2.50	0.90~1.13	≤0.08	—	—	—	≤0.30	—	≤0.20	—	—	—	0.025	0.015
12Cr1MoVG	GB/T 5310	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.90~1.20	0.25~0.35	0.15~0.30	—	—	—	≤0.30	—	≤0.20	—	—	—	0.025	0.010
12Cr2MoWVTiB	GB/T 5310	0.08~0.15	0.45~0.75	0.45~0.65	1.60~2.10	0.50~0.65	0.28~0.42	0.08~0.18	0.0020~0.0080	0.30~0.55	≤0.30	—	≤0.20	—	—	—	0.025	0.015
07Cr2MoW2VNbB	GB/T 5310	0.04~0.10	≤0.50	0.10~0.60	1.90~2.60	0.05~0.30	0.20~0.30	—	0.0005~0.0060	1.45~1.75	≤0.30	≤0.030	≤0.20	0.02~0.08	≤0.030	0.025	0.010	0.010
12Cr3MoVSiTiB	GB/T 5310	0.09~0.15	0.60~0.90	0.50~0.80	2.50~3.00	1.00~1.20	0.25~0.35	0.22~0.38	0.0050~0.0110	—	≤0.30	—	≤0.20	—	—	0.025	0.015	0.015
15Ni1MnMoNbCu	GB/T 5310	0.10~0.17	0.25~0.50	0.80~1.20	≤0.30	0.25~0.50	≤0.02	—	—	—	1.00~1.30	≤0.050	0.50~0.80	0.015~0.045	≤0.020	0.025	0.015	0.015
10Cr9Mo1VNbN	GB/T 5310	0.08~0.12	0.20~0.50	0.30~0.60	8.00~9.50	0.85~1.05	0.18~0.25	≤0.01	—	—	≤0.40	≤0.020	≤0.20	0.06~0.10	0.030~0.070	0.020	0.010	0.010
10Cr9MoW2VNbBN	GB/T 5310	0.07~0.13	≤0.50	0.30~0.60	8.50~9.50	0.30~0.60	0.15~0.25	≤0.01	0.0010~0.0060	1.50~2.00	≤0.40	≤0.020	≤0.20	0.04~0.09	0.030~0.070	0.020	0.010	0.010
10Cr11MoW2V-NbCu1BN	GB/T 5310	0.07~0.14	≤0.50	≤0.70	10.00~11.50	0.25~0.60	0.15~0.30	≤0.01	0.0005~0.0050	1.50~2.50	≤0.50	≤0.020	0.30~1.70	0.04~0.10	0.040~0.100	0.020	0.010	0.010
11Cr9Mo1W1VNbBN	GB/T 5310	0.09~0.13	0.10~0.50	0.30~0.60	8.50~9.50	0.90~1.10	0.18~0.25	≤0.01	0.0003~0.0060	0.90~1.10	≤0.40	≤0.020	≤0.20	0.06~0.10	0.040~0.090	0.020	0.010	0.010
07Cr19Ni10	GB/T 5310	0.04~0.10	≤0.75	≤2.00	18.00~20.00	—	—	—	—	—	8.00~11.00	—	≤0.25	—	—	0.030	0.015	0.015
10Cr18Ni9NbCu3BN	GB/T 5310	0.07~0.13	≤0.30	≤1.00	17.00~19.00	—	—	—	0.0010~0.0100	—	7.50~10.50	0.003~0.030	2.50~3.50	0.30~0.60	0.050~0.120	0.030	0.010	0.010
07Cr25Ni21NbN	GB/T 5310	0.04~0.10	≤0.75	≤2.00	24.00~26.00	—	—	—	—	—	19.00~22.00	—	≤0.25	0.20~0.60	0.150~0.350	0.030	0.015	0.015

表 B.1 (续)

钢 号	标准号	化学成分 (质量分数) %																
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ti	B	W	Ni	Al	Cu	Nb	N	P	S	
		不大于																
07Cr19Ni11Ti	GB/T 5310	0.04~ 0.10	≤0.75	≤2.00	17.00~ 20.00	—	—	4C~ 0.60	—	—	—	9.00~ 13.00	—	≤0.25	—	—	0.030	0.015
07Cr18Ni11Nb	GB/T 5310	0.04~ 0.10	≤0.75	≤2.00	17.00~ 19.00	—	—	—	—	—	9.00~ 13.00	—	≤0.25	8C~ 1.10	—	—	0.030	0.015
08Cr18Ni11NbFG	GB/T 5310	0.06~ 0.10	≤0.75	≤2.00	17.00~ 19.00	—	—	—	—	—	10.00~ 12.00	—	≤0.25	8C~ 1.10	—	—	0.030	0.015
06Cr19Ni10	GB/T 14976	≤0.08	≤1.00	≤2.00	18.00~ 20.00	—	—	—	—	—	8.00~ 11.00	—	—	—	—	—	0.035	0.030
07Cr17Ni12Mo2	GB/T 14976	0.04~ 0.10	≤1.00	≤2.00	16.00~ 18.00	2.00~ 3.00	—	—	—	—	10.00~ 14.00	—	—	—	—	—	0.035	0.030
07Cr19Ni11Ti	GB/T 14976	0.04~ 0.10	≤0.75	≤2.00	17.00~ 20.00	—	—	4C~ 0.60	—	—	9.00~ 13.00	—	—	—	—	—	0.030	0.030
06Cr18Ni11Nb	GB/T 14976	≤0.08	≤1.00	≤2.00	17.00~ 19.00	—	—	—	—	—	9.00~ 12.00	—	—	10C~ 1.10	—	—	0.035	0.030
07Cr18Ni11Nb	GB/T 14976	0.04~ 0.10	≤1.00	≤2.00	17.00~ 19.00	—	—	—	—	—	9.00~ 12.00	—	—	8C~ 1.10	—	—	0.035	0.030
07Cr19Ni10	GB/T 13296	0.04~ 0.10	≤1.00	≤2.00	18.00~ 20.00	—	—	—	—	—	8.00~ 11.00	—	—	—	—	—	0.035	0.030
07Cr17Ni12Mo2	GB/T 13296	0.04~ 0.10	≤1.00	≤2.00	16.00~ 18.00	2.00~ 3.00	—	—	—	—	10.00~ 14.00	—	—	—	—	—	0.035	0.030
07Cr19Ni11Ti	GB/T 13296	0.04~ 0.10	≤0.75	≤2.00	17.00~ 20.00	—	—	4C~ 0.60	—	—	9.00~ 13.00	—	—	—	—	—	0.030	0.030
07Cr18Ni11Nb	GB/T 13296	0.04~ 0.10	≤1.00	≤2.00	17.00~ 19.00	—	—	—	—	—	9.00~ 12.00	—	—	8C~ 1.10	—	—	0.035	0.030

注：表中 10Cr9Mo1VNbN、10Cr9MoW2VNbBN、10Cr11MoW2VNbCu1BN 和 11Cr9Mo1W1VNbBN 的残余 Zr 含量不超过 0.01%。

注：表中 10Cr9Mo1VNbN、10Cr9Mo2VNbBN、10Cr11Mo2VNbCu1BN 和 11Cr9Mo1W1VNbBN 的残余 Zr 含量不超过 0.01%。

B.1.2 电站弯管常用国外管材的化学成分见表 B.2。

表 B.2 电站弯管常用国外管材的化学成分

钢 号	标准号	化学成分 (质量分数) %															
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ti	B	W	Ni	Al	Cu	Nb	N	P	S
Gr.B ^a	ASTM A106	≤0.30	≥0.10	0.29~1.06	≤0.40	≤0.15	≤0.08	—	—	—	≤0.40	—	≤0.40	—	—	0.035	0.035
Gr.C ^a	ASTM A106	≤0.35	≥0.10	0.29~1.06	≤0.40	≤0.15	≤0.08	—	—	—	≤0.40	—	≤0.40	—	—	0.035	0.035
P1	ASTM A335	0.10~0.20	0.10~0.50	0.30~0.80	—	0.44~0.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.025
P2	ASTM A335	0.10~0.20	0.10~0.30	0.30~0.61	0.50~0.81	0.44~0.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.025
P5	ASTM A335	≤0.15	≤0.50	0.30~0.60	4.00~6.00	0.45~0.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.025
P11	ASTM A335	0.05~0.15	0.50~1.00	0.30~0.60	1.00~1.50	0.44~0.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.025
P12	ASTM A335	0.05~0.15	≤0.50	0.30~0.61	0.80~1.25	0.44~0.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.025
P22	ASTM A335	0.05~0.15	≤0.50	0.30~0.60	1.90~2.60	0.87~1.13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.025
P23 ^b	ASTM A335	0.04~0.10	≤0.50	0.10~0.60	1.90~2.60	0.05~0.30	0.20~0.30	0.005~0.060	0.0010~0.006	1.45~1.75	≤0.40	≤0.030	—	0.02~0.08	≤0.015	0.030	0.010
P91 ^c	ASTM A335	0.08~0.12	0.20~0.50	0.30~0.60	8.00~9.50	0.85~1.05	0.18~0.25	≤0.01	—	—	≤0.40	≤0.02	—	0.06~0.10	0.030~0.070	0.020	0.010
P92 ^c	ASTM A335	0.07~0.13	≤0.50	0.30~0.60	8.50~9.50	0.30~0.60	0.15~0.25	≤0.01	0.001~0.006	1.50~2.00	≤0.40	≤0.02	—	0.04~0.09	0.03~0.07	0.020	0.010
P122 ^e	ASTM A335	0.07~0.14	≤0.50	≤0.70	10.00~11.50	0.25~0.60	0.15~0.30	≤0.01	0.0005~0.005	1.50~2.50	≤0.50	≤0.020	0.30~1.70	0.04~0.10	0.040~0.100	0.020	0.010
P911 ^e	ASTM A335	0.09~0.13	0.10~0.50	0.30~0.60	8.50~9.50	0.90~1.10	0.18~0.25	≤0.01	0.0003~0.006	0.90~1.10	≤0.40	≤0.02	—	0.06~0.10	0.04~0.09	0.020	0.010

表 B.2 (续)

钢 号	标准号	化学成分 (质量分数) %														P	S
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ti	B	W	Ni	Al	Cu	Nb	N		
T1	ASTM A209	0.10~ 0.20	0.10~ 0.50	0.30~ 0.80	—	0.44~ 0.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.025
T2	ASTM A213	0.10~ 0.20	0.10~ 0.30	0.30~ 0.61	0.50~ 0.81	0.44~ 0.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.025
T5	ASTM A213	≤0.15	≤0.50	0.30~ 0.60	4.00~ 6.00	0.45~ 0.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.025
T11	ASTM A213	0.05~ 0.15	0.50~ 1.00	0.30~ 0.60	1.00~ 1.50	0.44~ 0.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.025
T12	ASTM A213	0.05~ 0.15	≤0.50	0.30~ 0.61	0.80~ 1.25	0.44~ 0.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.025
T22	ASTM A213	0.05~ 0.15	≤0.50	0.30~ 0.60	1.90~ 2.60	0.87~ 1.13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.025
T23 ^b	ASTM A213	0.04~ 0.10	≤0.50	0.10~ 0.60	1.90~ 2.60	0.05~ 0.30	0.20~ 0.30	0.005~ 0.060	0.0010~ 0.006	1.45~ 1.75	≤0.40	≤0.030	—	0.02~ 0.08	≤0.015	0.030	0.010
T91 ^c	ASTM A213	0.07~ 0.14	0.20~ 0.50	0.30~ 0.60	8.0~9.5	0.85~ 1.05	0.18~ 0.25	≤0.01	—	—	≤0.40	≤0.02	—	0.06~ 0.10	0.030~ 0.070	0.020	0.010
T92 ^c	ASTM A213	0.07~ 0.13	≤0.50	0.30~ 0.60	8.5~9.5	0.30~ 0.60	0.15~ 0.25	≤0.01	0.001~ 0.006	1.50~ 2.00	≤0.40	≤0.02	—	0.04~ 0.09	0.030~ 0.070	0.020	0.010
T122 ^c	ASTM A213	0.07~ 0.14	≤0.50	≤0.70	10.0~ 11.5	0.25~ 0.60	0.15~ 0.30	≤0.01	0.0005~ 0.005	1.50~ 2.50	≤0.50	≤0.02	0.30~ 1.70	0.04~ 0.10	0.040~ 0.100	0.020	0.010
T911 ^c	ASTM A213	0.09~ 0.13	0.10~ 0.50	0.30~ 0.60	8.5~9.5	0.90~ 1.10	0.18~ 0.25	≤0.01	0.0003~ 0.006	0.90~ 1.10	≤0.40	≤0.02	—	0.06~ 0.10	0.040~ 0.090	0.020	0.010
TP304	ASTM A213	≤0.08	≤1.00	≤2.00	18.0~ 20.0	—	—	—	—	—	8.0~ 11.0	—	—	—	—	0.045	0.030
	ASTM A312	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TP304H	ASTM A213	0.04~ 0.10	≤1.00	≤2.00	18.0~ 20.0	—	—	—	—	—	8.0~ 11.0	—	—	—	—	0.045	0.030
	ASTM A312	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 B.2 (续)

钢 号	标准号	化学成分 (质量分数) %													P S	
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ti	B	W	Ni	Al	Cu	Nb	N	不大于
S30432	ASTM A213	0.07~ 0.13	≤0.30	≤1.00	17.0~ 19.0	—	—	—	0.001~ 0.010	—	7.5~ 10.5	0.003~ 0.030	2.50~ 3.50	0.30~ 0.60	0.05~ 0.12	0.040 0.010
	ASTM A213 ASTM A312	0.04~ 0.10	≤1.00	≤2.00	24.0~ 26.0	—	—	—	—	—	19.0~ 22.0	—	—	—	—	0.045 0.030
TP310HCbN	ASTM A213	0.04~ 0.10	≤1.00	≤2.00	24.0~ 26.0	—	—	—	—	—	19.0~ 22.0	—	—	0.20~ 0.60	0.15~ 0.35	0.045 0.030
	ASTM A213 ASTM A312	≤0.08	≤1.00	≤2.00	16.0~ 18.0	2.00~ 3.00	—	—	—	—	10.0~ 14.0 11.0~ 14.0	—	—	—	—	0.045 0.030
TP316H	ASTM A213	0.04~ 0.10	≤1.00	≤2.00	16.0~ 18.0	2.00~ 3.00	—	—	—	—	11.0~ 14.0	—	—	—	—	0.045 0.030
	ASTM A213 ASTM A312	≤0.08	≤1.00	≤2.00	17.0~ 19.0	—	—	5 (C+N)~ 0.70	—	—	9.0~ 12.0	—	—	—	—	0.045 0.030
TP321H	ASTM A213	0.04~ 0.10	≤1.00	≤2.00	17.0~ 19.0	—	—	4 (C+N)~ 0.70	—	—	9.0~ 12.0	—	—	—	—	0.045 0.030
	ASTM A213 ASTM A312	≤0.08	≤1.00	≤2.00	17.0~ 19.0	—	—	—	—	—	9.0~ 12.0	—	—	—	—	0.045 0.030
TP347	ASTM A213	≤0.08	≤1.00	≤2.00	17.0~ 20.0	—	—	—	—	—	9.0~ 13.0	—	—	10C~ 1.10	—	0.045 0.030
	ASTM A213 ASTM A312	≤0.08	≤1.00	≤2.00	17.0~ 19.0	—	—	—	—	—	9.0~ 13.0	—	—	10C~ 1.00	—	0.045 0.030
TP347H	ASTM A213	0.04~ 0.10	≤1.00	≤2.00	17.0~ 19.0	—	—	—	—	—	9.0~ 13.0	—	—	8C~ 1.10	—	0.045 0.030
	ASTM A213 ASTM A312	≤0.08	≤1.00	≤2.00	17.0~ 19.0	—	—	—	—	—	9.0~ 13.0	—	—	8C~ 1.00	—	0.045 0.030

表 B.2 (续)

钢 号	标准号	化学成分 (质量分数) %														P S	
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ti	B	W	Ni	Al	Cu	Nb	N	不大于	
TP347HFG	ASTM A213	0.06~ 0.10	≤1.00	≤2.00	17.0~ 19.0	—	—	—	—	—	9.0~ 13.0	—	—	8C~ 1.10	—	0.045	0.030
P235GH ^d	EN 10216-2	≤0.16	≤0.35	≤1.20	≤0.30	≤0.08	—	—	—	—	≤0.30	—	≤0.30	—	—	0.025	0.010
P265GH ^d	EN 10216-2	≤0.20	≤0.40	≤1.40	≤0.30	≤0.08	—	—	—	—	≤0.30	—	≤0.30	—	—	0.025	0.010
P280GH ^e	RCC-M	≤0.20	0.10~ 0.35	0.80~ 1.60	≤0.25	≤0.10	—	—	—	—	≤0.50	0.020~ 0.050	≤0.25	—	—	0.020	0.015
16Mo3 ^f	EN 10216-2	0.12~ 0.20	≤0.35	0.40~ 0.90	≤0.30	0.25~ 0.35	—	—	—	—	≤0.30	≤0.040	≤0.30	—	—	0.025	0.010
14MoV6-3	EN 10216-2	0.10~ 0.15	0.15~ 0.35	0.40~ 0.70	0.30~ 0.60	0.50~ 0.70	0.22~ 0.28	—	—	—	≤0.30	≤0.040	≤0.30	—	—	0.025	0.010
13CrMo4-5 ^f	EN 10216-2	0.10~ 0.17	≤0.35	0.40~ 0.70	0.70~ 1.15	0.40~ 0.60	—	—	—	—	≤0.30	≤0.040	≤0.30	—	—	0.025	0.010
10CrMo9-10	EN 10216-2	0.08~ 0.14	≤0.50	0.30~ 0.70	2.00~ 2.50	0.90~ 1.10	—	—	—	—	≤0.30	≤0.040	≤0.30	—	—	0.020	0.010
15NiCuMoNb5-6-4	EN 10216-2	≤0.17	0.25~ 0.50	0.80~ 1.20	≤0.30	0.25~ 0.50	—	—	—	—	1.00~ 1.30	≤0.050	0.50~ 0.80	0.015~ 0.045	—	0.025	0.010
X10CrMoVNb9-1 ^e	EN 10216-2	0.08~ 0.12	0.20~ 0.50	0.30~ 0.60	8.0~9.5	0.85~ 1.05	0.18~ 0.25	≤0.01	—	—	≤0.40	≤0.02	≤0.30	0.06~ 0.10	0.030~ 0.070	0.020	0.005
X10CrWMoVNb9-2 ^e	EN 10216-2	0.07~ 0.13	≤0.50	0.30~ 0.60	8.5~9.5	0.30~ 0.60	0.15~ 0.25	≤0.01	0.001~ 0.006	1.50~ 2.00	≤0.40	≤0.02	—	0.04~ 0.09	0.030~ 0.070	0.020	0.010
X11CrMoWVNb9-1 ^e	EN 10216-2	0.09~ 0.13	0.10~ 0.50	0.30~ 0.60	8.5~9.5	0.90~ 1.10	0.18~ 0.25	≤0.01	0.0005~ 0.005	0.90~ 1.10	0.10~ 0.40	≤0.02	—	0.06~ 0.10	0.050~ 0.090	0.020	0.010
X20CrMoV11-1	EN 10216-2	0.17~ 0.23	0.15~ 0.50	≤1.00	10.0~ 12.5	0.80~ 1.20	0.25~ 0.35	—	—	—	0.30~ 0.80	≤0.040	≤0.30	—	—	0.025	0.010

^a 对 A106B 和 A106C 材料, 化学成分中 Cr、Cu、Mo、Ni、V 五种元素的总含量不应超过 1%。

^b 对 T23、P23 材料, Ti/N≥3.5。

^c P91、P92、P122、P911、T91、T92、T122、T911、X10CrMoVNb9-1、X10CrWMoVNb9-2、X11CrMoWVNb9-1-1 的残余元素 Zr 含量不应超过 0.01%。

^d P235GH、P265GH 材料的 Cr、Cu、Mo、Ni 四种元素的总含量不应超过 0.70%。

^e P280GH 材料的 Sn≤0.030%, 碳当量 $C_{eq}≤0.48$; 碳当量 C_{eq} 的计算公式为 $C_{eq}=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15$ 。

^f 壁厚 S≥30mm 时, 16Mo3、13CrMo4-5 的 C 含量可增加 0.02%。

B.2 力学性能

B.2.1 电站弯管常用国产管材的室温力学性能见表 B.3。

表 B.3 电站弯管常用国产管材的室温力学性能

钢 号	标 准 号	壁厚 S mm	R_m MPa		R_{eL} 或 $R_{p0.2}$ MPa		A %		冲击功 KV_2 J		硬 度 HBW
			不小于		不小于		纵向	横向	纵向	横向	
10	GB/T 3087	≤ 16	335~475		205		24	—	—	—	—
		> 16	—		195		—	—	—	—	
20	GB/T 3087	≤ 16	410~550		245		20	—	—	—	—
		> 16	—		235		—	—	—	—	
20G	GB/T 5310	—	410~550		245		24	22	40	27	120~160
20MnG	GB/T 5310	—	415~560		240		22	20	40	27	125~170
25MnG	GB/T 5310	—	485~640		275		20	18	40	27	130~180
15MoG	GB/T 5310	—	450~600		270		22	20	40	27	125~180
20MoG	GB/T 5310	—	415~665		220		22	20	40	27	125~180
12CrMoG	GB/T 5310	—	410~560		205		21	19	40	27	125~170
15CrMoG	GB/T 5310	—	440~640		295		21	19	40	27	125~170
12Cr2MoG	GB/T 5310	—	450~600		280		22	20	40	27	125~180
12Cr1MoVG	GB/T 5310	—	470~640		255		21	19	40	27	135~195
12Cr2MoWVTiB	GB/T 5310	—	540~735		345		18	—	40	—	160~220
07Cr2MoW2VNbB	GB/T 5310	—	≥ 510		400		22	18	40	27	150~220
12Cr3MoVSiTiB	GB/T 5310	—	610~805		440		16	—	40	—	180~250

表 B.3 (续)

钢 号	标 准 号	壁厚 S mm	拉 伸 性 能				冲击功 KV_2 J		硬 度
			R_m MPa	R_{eL} 或 $R_{p0.2}$ MPa	A %		纵向	横向	
					纵向	横向			
					不小于		不小于		不大于
15Ni1MnMoNbCu	GB/T 5310	—	620~780	440	19	17	40	27	185~255
10Cr9Mo1VNbN	GB/T 5310	—	≥585	415	20	16	40	27	185~250
10Cr9MoW2VNbBN	GB/T 5310	—	≥620	440	20	16	40	27	185~250
10Cr11MoW2VNbCu1BN	GB/T 5310	—	≥620	400	20	16	40	27	185~250
11Cr9Mo1W1VNbBN	GB/T 5310	—	≥620	440	20	16	40	27	185~250
07Cr19Ni10	GB/T 5310	—	≥515	205	35	—	—	—	140~192
10Cr18Ni9NbCu3BN	GB/T 5310	—	≥590	235	35	—	—	—	150~219
07Cr25Ni21NbN	GB/T 5310	—	≥655	295	30	—	—	—	175~256
07Cr19Ni11Ti	GB/T 5310	—	≥515	205	35	—	—	—	140~192
07Cr18Ni11Nb	GB/T 5310	—	≥520	205	35	—	—	—	140~192
08Cr18Ni11NbFG	GB/T 5310	—	≥550	205	35	—	—	—	140~192
06Cr19Ni10	GB/T 14976	—	≥520	205	35	—	—	—	—
07Cr17Ni12Mo2	GB/T 14976	—	≥515	205	35	—	—	—	—
07Cr19Ni11Ti	GB/T 14976	—	≥520	205	35	—	—	—	—
06Cr18Ni11Nb	GB/T 14976	—	≥520	205	35	—	—	—	—
07Cr18Ni11Nb	GB/T 14976	—	≥520	205	35	—	—	—	—
07Cr19Ni10	GB/T 13296	—	≥520	205	35	—	—	—	≤187
07Cr17Ni12Mo2	GB/T 13296	—	≥520	205	35	—	—	—	≤187
07Cr19Ni11Ti	GB/T 13296	—	≥520	205	35	—	—	—	≤187
07Cr18Ni11Nb	GB/T 13296	—	≥520	205	35	—	—	—	≤187

注：表中 GB/T 3087、GB/T 13296、GB/T 14976 的拉伸性能是指纵向力学性能；GB/T 13296 热挤压不锈钢管的抗拉强度允许降低 20MPa。

注：表中 GB/T 3087、GB/T 13296、GB/T 14976 的拉伸性能是指纵向力学性能；GB/T 13296 热挤压不锈钢管的抗拉强度允许降低 20MPa。

B.2.2 电站弯管用国外管材的室温力学性能见表 B.4。

表 B.4 电站弯管用国外管材的室温力学性能

钢 号	标 准 号	壁厚 S mm	拉 伸 性 能					冲击功 KV_2 J		硬 度 HBW
			R_m MPa	R_{eL} 或 $R_{p0.2}$ MPa	A %		纵向	横向		
					纵向	横向				
									不小于	
Gr. B	ASTM A106	—	≥415	240	22	12	—	—	—	
Gr. C	ASTM A106	—	≥485	275	20	12	—	—	—	
P1	ASTM A335	—	≥380	205	22	14	—	—	—	
P2	ASTM A335	—	≥380	205	22	14	—	—	—	
P5	ASTM A335	—	≥415	205	22	14	—	—	—	
P11	ASTM A335	—	≥415	205	22	14	—	—	—	
P12	ASTM A335	—	≥415	220	22	14	—	—	—	
P22	ASTM A335	—	≥415	205	22	14	—	—	—	
P23	ASTM A335	—	≥510	400	20	13	—	—	≤220	
P91	ASTM A335	—	≥585	415	20	13	—	—	190~250	
P92	ASTM A335	—	≥620	440	20	13	—	—	≤250	
P122	ASTM A335	—	≥620	400	20	13	—	—	≤250	
P911	ASTM A335	—	≥620	440	20	13	—	—	≤250	
T1	ASTM A209	—	≥380	205	30	—	—	—	≤146	
T2	ASTM A213	—	≥415	205	30	—	—	—	≤163	
T5	ASTM A213	—	≥415	205	30	—	—	—	≤163	
T11	ASTM A213	—	≥415	205	30	—	—	—	≤163	
T12	ASTM A213	—	≥415	220	30	—	—	—	≤163	
T22	ASTM A213	—	≥415	205	30	—	—	—	≤163	
T23	ASTM A213	—	≥510	400	20	—	—	—	≤220	

表 B.4 (续)

钢 号	标 准 号	壁厚 S mm	拉 伸 性 能				冲击功 KV_2 J		硬 度
			R_m MPa	R_{eL} 或 $R_{p0.2}$ MPa	A %		纵向	横向	
					纵向	横向			
			不小于				不小于		
T91	ASTM A213	—	≥585	415	20	—	—	—	190~250
T92	ASTM A213	—	≥620	440	20	—	—	—	≤250
T122	ASTM A213	—	≥620	400	20	—	—	—	≤250
T911	ASTM A213	—	≥620	440	20	—	—	—	≤250
TP304	ASTM A213	—	≥515	205	35	—	—	—	≤192
	ASTM A312					25			
TP304H	ASTM A213	—	≥515	205	35	—	—	—	≤192
	ASTM A312					25			
S30432	ASTM A213	—	≥590	235	35	—	—	—	≤219
TP310H	ASTM A213	—	≥515	205	35	—	—	—	≤192
	ASTM A312					25			
TP310HCbN	ASTM A213	—	≥655	295	30	—	—	—	≤256
TP316	ASTM A213	—	≥515	205	35	—	—	—	≤192
	ASTM A312					25			
TP316H	ASTM A213	—	≥515	205	35	—	—	—	≤192
	ASTM A312					25			
TP321	ASTM A213	—	≥515	205	35	—	—	—	≤192
	ASTM A312					25			
TP321H	ASTM A213	—	≥515	205	35	—	—	—	≤192
	ASTM A312					25			
TP321H	ASTM A213	—	≥515	205	35	—	—	—	≤192
	ASTM A312					25			

表 B.4 (续)

钢 号	标 准 号	壁厚 S mm	拉 伸 性 能				冲击功 KV ₂ J		硬 度
			R _m MPa	R _{el} 或 R _{p0.2} MPa	A %		纵向	横向	
					纵向	横向			
TP347	ASTM A213	—	≥515	205	35	—	—	—	≤192
	ASTM A312	—	—	—	25	—	—	—	
TP347H	ASTM A213	—	≥515	205	35	—	—	—	≤192
	ASTM A312	—	—	—	25	—	—	—	
TP347HFG	ASTM A213	—	≥550	205	35	—	—	—	≤192
	—	≤16	—	235	—	—	—	—	
P235GH	EN 10216-2	16<S≤40	360~500	225	25	23	40 (0℃)	27 (0℃)	—
		40<S≤60	—	215	—	—	—	—	
		—	≤16	—	265	—	—	—	
P265GH	EN 10216-2	16<S≤40	410~570	255	23	21	40 (0℃)	27 (0℃)	—
		40<S≤60	—	245	—	—	—	—	
P280GH	RCC-M	—	470~570	275	21	21	60 (0℃)	60 (0℃)	—
16Mo3	EN 10216-2	≤16	—	280	—	—	—	—	—
		16<S≤40	450~600	270	22	20	40	27	
		40<S≤60	—	260	—	—	—	—	
14MoV6-3 ^a	EN 10216-2	≤40	460~610	320	20	18	40	27	—
		40<S≤60	—	310	—	—	—	—	
13CrMo4-5	EN 10216-2	≤40	440~590	290	22	20	40	27	—
		40<S≤60	—	280	—	—	—	—	
10CrMo9-10	EN 10216-2	≤40	480~630	280	22	20	40	27	—
		40<S≤60	—	270	—	—	—	—	

表 B.4 (续)

钢 号	标 准 号	壁厚 S mm	拉 伸 性 能					冲击功 KV ₂ J		硬 度
			R _m MPa	R _{eL} 或 R _{p0.2} MPa	A %		纵向	横向		
					纵向	横向				
			不小于					不小于		
15NiCuMoNb5-6-4 ^a	EN 10216-2	≤80	610~780	440	19	17	40	27	—	
X10CrMoVNb9-1 ^a	EN 10216-2	≤100	630~830	450	19	17	40	27	—	
X10CrWMoVNb9-2 ^a	EN 10216-2	≤100	620~850	440	19	17	40	27	—	
X11CrMoWVNb9-1-1 ^a	EN 10216-2	≤100	620~850	450	19	17	40	27	—	
X20CrMoV11-1 ^a	EN 10216-2	≤100	690~840	490	17	14	40	27	—	

注 1: 拉伸试样标距长度为 50mm; 表中 A106B、A106C 及 ASTM A335 中的 P1~P911 材料的断后伸长率数据为采用标距 50mm 标准圆形试样。

注 2: 当采用标距 50mm 标准圆形试样时, ASTM A209 中的 T1 及 ASTM A213 中的 T2、T5、T11、T12 和 T22 材料的最小断后伸长率为 22%。

^a 当壁厚 S≥16mm 时, 冲击试验是强制性要求。

B.3 钢管热处理制度

B.3.1 电站弯管常用钢管的热处理制度见表 B.5。

表 B.5 电站弯管常用钢管的热处理制度

钢 号	标 准 号	热 处 理 制 度
10	GB/T 3087	正火: 正火温度 900℃~960℃
20	GB/T 3087	正火: 正火温度 880℃~940℃
20G	GB/T 5310	正火: 正火温度 880℃~940℃
20MnG 25MnG	GB/T 5310	正火: 正火温度 880℃~940℃
15MoG 20MoG	GB/T 5310	正火: 正火温度 890℃~950℃
12CrMoG	GB/T 5310	正火加回火: 正火温度 900℃~960℃, 回火温度 670℃~730℃

表 B.5 (续)

钢 号	标 准 号	热 处 理 制 度
15CrMoG	GB/T 5310	壁厚 $S \leq 30\text{mm}$ 的钢管, 正火加回火: 正火温度 $900^{\circ}\text{C} \sim 960^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $680^{\circ}\text{C} \sim 730^{\circ}\text{C}$ 。壁厚 $S > 30\text{mm}$ 的钢管, 淬火加回火或正火加回火: 淬火温度不低于 900°C , 回火温度 $680^{\circ}\text{C} \sim 750^{\circ}\text{C}$; 正火温度 $900^{\circ}\text{C} \sim 960^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $680^{\circ}\text{C} \sim 730^{\circ}\text{C}$, 正火后应进行快速冷却
12Cr2MoG	GB/T 5310	壁厚 $S \leq 30\text{mm}$ 的钢管, 正火加回火: 正火温度 $900^{\circ}\text{C} \sim 960^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $700^{\circ}\text{C} \sim 750^{\circ}\text{C}$ 。壁厚 $S > 30\text{mm}$ 的钢管, 淬火加回火或正火加回火: 淬火温度不低于 900°C , 回火温度 $700^{\circ}\text{C} \sim 750^{\circ}\text{C}$; 正火温度 $900^{\circ}\text{C} \sim 960^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $700^{\circ}\text{C} \sim 750^{\circ}\text{C}$, 正火后应进行快速冷却
12Cr1MoVG	GB/T 5310	壁厚 $S \leq 30\text{mm}$ 的钢管, 正火加回火: 正火温度 $980^{\circ}\text{C} \sim 1020^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $720^{\circ}\text{C} \sim 760^{\circ}\text{C}$ 。壁厚 $S > 30\text{mm}$ 的钢管, 淬火加回火或正火加回火: 淬火温度 $950^{\circ}\text{C} \sim 990^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $720^{\circ}\text{C} \sim 760^{\circ}\text{C}$; 正火温度 $980^{\circ}\text{C} \sim 1020^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $720^{\circ}\text{C} \sim 760^{\circ}\text{C}$, 正火后应进行快速冷却
12Cr2MoWVTiB	GB/T 5310	正火加回火: 正火温度 $1020^{\circ}\text{C} \sim 1060^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $760^{\circ}\text{C} \sim 790^{\circ}\text{C}$
07Cr2MoW2VNbB	GB/T 5310	正火加回火: 正火温度 $1040^{\circ}\text{C} \sim 1080^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $750^{\circ}\text{C} \sim 780^{\circ}\text{C}$
12Cr3MoVSiTiB	GB/T 5310	正火加回火: 正火温度 $1040^{\circ}\text{C} \sim 1090^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $720^{\circ}\text{C} \sim 770^{\circ}\text{C}$
15Ni1MnMoNbCu	GB/T 5310	壁厚 $S \leq 30\text{mm}$ 的钢管, 正火加回火: 正火温度 $880^{\circ}\text{C} \sim 980^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $610^{\circ}\text{C} \sim 680^{\circ}\text{C}$ 。壁厚 $S > 30\text{mm}$ 的钢管, 淬火加回火或正火加回火: 淬火温度不低于 900°C , 回火温度 $610^{\circ}\text{C} \sim 680^{\circ}\text{C}$; 正火温度 $880^{\circ}\text{C} \sim 980^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $610^{\circ}\text{C} \sim 680^{\circ}\text{C}$, 正火后应进行快速冷却
10Cr9Mo1VNbN	GB/T 5310	正火加回火: 正火温度 $1040^{\circ}\text{C} \sim 1080^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $750^{\circ}\text{C} \sim 780^{\circ}\text{C}$ 。壁厚 $S > 70\text{mm}$ 的钢管, 可淬火加回火, 淬火温度不低于 1040°C , 回火温度 $750^{\circ}\text{C} \sim 780^{\circ}\text{C}$
10Cr9MoW2VNbBN	GB/T 5310	正火加回火: 正火温度 $1040^{\circ}\text{C} \sim 1080^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $760^{\circ}\text{C} \sim 790^{\circ}\text{C}$ 。壁厚 $S > 70\text{mm}$ 的钢管, 可淬火加回火, 淬火温度不低于 1040°C , 回火温度 $760^{\circ}\text{C} \sim 790^{\circ}\text{C}$
10Cr11MoW2VNbCu1BN	GB/T 5310	正火加回火: 正火温度 $1040^{\circ}\text{C} \sim 1080^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $760^{\circ}\text{C} \sim 790^{\circ}\text{C}$ 。壁厚 $S > 70\text{mm}$ 的钢管, 可淬火加回火, 淬火温度不低于 1040°C , 回火温度 $760^{\circ}\text{C} \sim 790^{\circ}\text{C}$
11Cr9Mo1W1VNbBN	GB/T 5310	正火加回火: 正火温度 $1040^{\circ}\text{C} \sim 1080^{\circ}\text{C}$, 回火温度 $750^{\circ}\text{C} \sim 780^{\circ}\text{C}$ 。壁厚 $S > 70\text{mm}$ 的钢管, 可淬火加回火, 淬火温度不低于 1040°C , 回火温度 $750^{\circ}\text{C} \sim 780^{\circ}\text{C}$
07Cr19Ni10	GB/T 5310	固溶处理: 固溶温度不低于 1040°C , 急冷
10Cr18Ni9NbCu3BN	GB/T 5310	固溶处理: 固溶温度不低于 1100°C , 急冷
07Cr25Ni21NbN	GB/T 5310	固溶处理: 固溶温度不低于 1100°C , 急冷
07Cr19Ni11Ti 07Cr18Ni11Nb	GB/T 5310	固溶处理: 热轧 (挤压、扩) 钢管固溶温度不低于 1050°C , 冷拔 (轧) 钢管固溶温度不低于 1100°C , 急冷
08Cr18Ni11NbFG	GB/T 5310	冷加工之前软化热处理: 软化热处理温度应比固溶处理温度至少高 50°C ; 最终冷加工之后固溶处理: 固溶温度不低于 1180°C , 急冷

注: 热弯弯管也可按评定合格的弯管热处理工艺进行热处理。

附录 C
(资料性附录)

弯管弯制前的推荐直管壁厚

- C.1 为补偿弯制过程中弯管外弧侧受拉引起的减薄量，弯制弯管用的直管壁厚应符合本附录的规定。
C.2 对于感应加热弯管，弯制前的直管最小壁厚推荐值见表 C.1。

表 C.1 感应加热弯管弯制前的推荐直管最小壁厚

弯曲半径 R	弯制前推荐直管最小壁厚
$R \geq 6 D_o$	$1.07 S_m$
$R = 5 D_o$	$1.09 S_m$
$R = 4 D_o$	$1.12 S_m$
$R = 3 D_o$	$1.16 S_m$
注 1: D_o 为管子外径, S_m 为与弯管相连的直管最小壁厚。对于电站汽水管道, S_m 应按照 DL/T 5054—2016 中的式 (5.2.1-1)、式 (5.2.1-2) 或式 (5.2.1-5) 计算确定; 对于锅炉范围内管道, S_m 应按照 GB/T 16507.4 的要求计算确定。	
注 2: 弯曲半径为中间值的弯管, 弯制前的直管最小壁厚可采用内插法计算。	

- C.3 对于冷弯弯管，弯制前的直管最小壁厚推荐值见表 C.2。

表 C.2 冷弯弯管弯制前的推荐直管最小壁厚

弯曲半径 R	弯制前推荐直管最小壁厚
$R \geq 6 D_o$	$1.09 S_m$
$R = 5 D_o$	$1.14 S_m$
$R = 4 D_o$	$1.20 S_m$
$R = 3 D_o$	$1.28 S_m$
注 1: D_o 为管子外径, S_m 为与弯管相连的直管最小壁厚。对于电站汽水管道, S_m 应按照 DL/T 5054—2016 中的式 (5.2.1-1)、式 (5.2.1-2) 或式 (5.2.1-5) 计算确定; 对于锅炉范围内管道, S_m 应按照 GB/T 16507.4 的要求计算确定。	
注 2: 弯曲半径为中间值的弯管, 弯制前的直管最小壁厚可采用内插法计算。	

附录 D
(规范性附录)
感应加热弯管工艺评定

D.1 评定的目的

用评定的弯管验证所采用的弯管工艺是否满足弯管的质量标准要求。

D.2 评定的有效范围

D.2.1 应在同一工厂用于弯制该弯管的同类型设备进行评定试验。

D.2.2 同类同级的钢管材料（包括轧制、拉拔或锻造钢管，见表 D.1）视作等效。在同类钢管材料中，高级别材料的评定可覆盖低级别材料。有缝钢管的评定可覆盖无缝钢管，反之不适用。

表 D.1 常用钢管材料分类分级表

类别	级别	钢 号		
		国家标准	ASTM/ASME 标准	EN 标准
I	1	10、20、20G、20MnG	A53B、A106B、A210A-1	P235GH
	2	25MnG	A106C、A210C	P265GH、P280GH
II	1	15MoG、20MoG	A209T1、A335P1	16Mo3
	2	12CrMoG、15CrMoG	A213T2、T12、T11 A335P2、P12、P11	10CrMo5-5、13CrMo4-5
	3	12Cr1MoVG	—	14MoV6-3
III	1	15Ni1MnMoNbCu	A213T36、A335P36	15NiCuMoNb5-6-4
IV	1	12Cr2MoG	A213T22、T21、A335P22、P21	10CrMo9-10、11CrMo9-10
V	1	07Cr2MoW2VNbB	A213T23、A335P23	7CrWVMoNb9-6
VI	1	12Cr5Mo、12Cr9Mo	A213T5、T9、A335P5、P9	—
	2	10Cr9Mo1VNbN 10Cr9MoW2VNbBN 10Cr11MoW2VNbCu1BN 11Cr9Mo1W1VNbBN	A213T91、T92、T122、T911 A335P91、P92、P122、P911	X10CrMoVNb9-1 X10CrWMoVNb9-2 X11CrMoWVNb9-1-1
VII	1	07Cr19Ni10、07Cr19Ni11Ti 10Cr18Ni9NbCu3BN 07Cr18Ni11Nb、07Cr18Ni11NbFG	TP304H、TP 321H、S30432 TP347H、TP347HFG	X6CrNi18-10 X6CrNiTi18-10 X6CrNiNb18-10
	2	07Cr25Ni21NbN	TP310HNbN	—

D.2.3 未列入表 D.1 的钢号，其评定规则如下：

- a) 已列入国家标准、行业标准的钢号，可根据其化学成分、力学性能和热弯曲性能确定列入相应的类、级中，或另外进行单独分类、分级；未列入国家标准、行业标准的钢号，应单独进行工艺评定。
- b) 国外钢管材料首次使用时应按其钢号、UNS 号或统一数字编号（按相应标准规定命名）进行

工艺评定。当已掌握该钢号热弯曲性能，且其化学成分、力学性能与表 D.1 中某钢号相当，在某钢号已进行过合格工艺评定时，该进口钢管材料可免做弯管工艺评定。

D.2.4 工艺评定的几何准则如下：

- a) 较小 R/D_0 的弯管的合格评定结果适用于较大 R/D_0 的弯管。
- b) 评定的钢管壁厚 S 的有效范围为 $0.7S\sim1.5S$ 。
- c) 评定的钢管外径 D_0 的有效范围为：
 - 1) $D_0\leq 50\text{mm}$ ；
 - 2) $50\text{mm}<D_0\leq 150\text{mm}$ ；
 - 3) 当 $D_0>150\text{mm}$ 时，外径有效范围为 $0.5D_0\sim1.8D_0$ 。

注：当需要对设备负荷进行验证时，应选用最大规格的钢管进行评定。

D.2.5 改变弯制工艺参数（感应加热温度、冷却方式、变形速度）时，需重新评定。

D.2.6 改变热处理工艺类型（如正火、回火或正火加回火等）时，需重新评定。

D.3 试验内容

D.3.1 弯曲角度

弯曲角度应大于或等于 70° ，并能满足试验取样所需要的长度。

D.3.2 检验与试验项目

D.3.2.1 检验与试验项目、要求和试验方法见表 D.2。

D.3.2.2 在成形前，应对试件的受拉区进行目视检查和表面无损检测。

表 D.2 检验与试验项目、要求和试验方法

序号	检验与试验项目	要 求	试样数量	取样部位	检验与试验方法
1	外 观	5.6.1	—	—	6.2
2	无损检测 ^a	5.6.1	—	—	6.3
3	晶间裂纹	5.6.2	1 个	弯管受拉侧	6.13、D.4.3
4	壁 厚	5.6.3	—	—	6.4
5	不 圆 度	5.6.4	—	—	6.5
6	弯曲角度	5.6.5	—	—	6.6
7	弯曲半径	5.6.6	—	—	6.7
8	波浪度	5.6.7	—	—	6.8
9	平面度	5.6.8	—	—	6.9
10	硬 度 ^b	5.6.11	—	—	见脚注 b
11	显微组织与晶粒度	5.6.11	1 个 ^c	直 管 段	GB/T 6394
		D.4.3	1 个 ^c	弯管受拉侧	GB/T 13298
12	室温拉伸试验	D.4.2	1 个	直管段（GB/T 2975）	GB/T 228.1
			各 1 个 ^f	D.4.5 （GB/T 2975）	
13	室温冲击试验	D.4.2	1 组 ^d	直管段（GB/T 2975）	GB/T 229
			各 1 组 ^{d、f}	D.4.5 （GB/T 2975）	

表 D.2 (续)

序号	检验与试验项目	要 求	试样数量	取样部位	检验与试验方法
14	高温拉伸试验 ^e	见脚注 e	1 个	直 管 段	GB/T 228.2
			1 个	弯管受拉侧	
注：外径 $D_o \geq 219\text{mm}$ 且壁厚 $S \geq 25\text{mm}$ 的钢管，其横向力学性能试验可代替纵向力学性能试验。					
^a 应对工艺评定弯管的全部弯曲表面进行磁粉或渗透检测，对受拉侧进行超声检测。 ^b 按照 GB/T 231.1、GB/T 17394.1 或 DL/T 1719 分别在弯管前和热处理后对管子弯曲部分均匀取 5 个截面进行硬度试验，每个截面沿圆周方向至少测 3 点，且其中 1 点位于弯管受拉侧。 ^c 分别对弯管的直管段和弯管的受拉侧进行放大倍数不小于 400 倍的金相组织分析： ——当壁厚 $S \geq 10\text{mm}$ 且外径 $D_o > 100\text{mm}$ 时，取纵向试样； ——当壁厚 $S \geq 10\text{mm}$ 且外径 $D_o > 250\text{mm}$ 时，取横向试样。 ^d 一组冲击试样包括 3 个试样。 ^e 当工作温度高于 450℃ 时，应做管道系统设计温度下的拉伸试验。 ^f 试样的取样位置见 D.4.5。					

D.4 技术要求

- D.4.1 弯管的成品质量要求应符合本标准 5.6 的规定。
- D.4.2 弯管相关部位取样的力学性能试验值应符合相应钢管技术标准要求。
- D.4.3 显微组织、晶粒度应符合相应钢管技术标准要求，在大于或等于 400 倍金相组织照片中，不应发现晶间裂纹。
- D.4.4 不允许对弯管进行焊接修复或返修。
- D.4.5 试验用试样的取样位置：
- 弯管受拉侧的起弯部；
 - 弯管受拉侧的中部；
 - 弯管受拉侧的接火点（需要时）；
 - 弯管受拉侧的终弯部。

D.5 文件

- 弯管工艺评定文件应至少包括：
- a) 原材料质量证明书。
 - b) 硬度检验报告。
 - c) 室温拉伸试验报告。
 - d) 设计温度下的拉伸试验报告。
 - e) 夏比冲击试验报告。
 - f) 显微组织与晶粒度检验报告（包括显微组织照片）。
 - g) 外观检查及无损检测（超声及磁粉或渗透）报告。
 - h) 尺寸、壁厚检验报告及弯管的结构尺寸图。
 - i) 弯管工艺卡、热处理工艺卡及弯管、热处理工艺记录。
 - j) 取样位置示意图和各试样标记说明。