

规范与标准

# 国家标准 GB/T 41982—2022 《电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件 通用技术条件》研制的必要性和技术概要

秦思晓<sup>1</sup>, 雷丙旺<sup>2</sup>, 秦瑞廷<sup>2</sup>, 董 波<sup>2</sup>, 周 林<sup>1</sup>

(1. 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083; 2. 内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古自治区 包头 014030)

**摘要:** 分析了高合金耐热钢厚壁管道和锻件在电力工业中的应用情况和我国热挤压技术研究现状。结果表明, 我国高合金耐热钢厚壁管道热挤压技术日趋成熟, 应用范围不断扩大, 但与之配套的技术标准研究与开发工作严重滞后。因此, 国家标准《电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件 通用技术条件》的研制具有必要性。介绍了该标准的技术概要, 该标准规定了电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件的技术要求、试验方法、检验规则、订货内容及包装、标志和质量证明书, 适用于热挤压或锻造工艺生产的电站用高合金耐热钢大口径 (外径不小于  $\Phi 219$  mm) 厚壁管道和锻件。该标准的研制有助于提升电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件的产业竞争能力, 有效服务于我国电力系统的基础设施建设。

**关键词:** 热挤压; 高合金耐热钢; 厚壁管道; 电站; 国家标准

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.03.033

**中图分类号:** TG306      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2025) 03-0262-07

## Research necessity and technical summary on national standard GB/T 41982—2022 High alloy heat-resisting steel thick wall pipes and forgings used for power station—General specification

Qin Sixiao<sup>1</sup>, Lei Bingwang<sup>2</sup>, Qin Ruiting<sup>2</sup>, Dong Bo<sup>2</sup>, Zhou Lin<sup>1</sup>

(1. China Academy of Machinery Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China;  
2. Inner Mongolia North Heavy Industries Group Corp. Ltd., Baotou 014030, China)

**Abstract:** The application of high alloy heat-resistant steel thick wall pipes and forgings in the power industry and the current status of research on hot extrusion technology in China were analyzed. The results show that the hot extrusion technology of high alloy heat-resisting steel thick wall pipes in China is becoming more and more mature, and the application scope is expanding, while the research and development of the matching technical standards are seriously lagging behind. So it is necessary to develop the national standard GB/T 41982—2022 High alloy heat-resisting steel thick wall pipes and forgings used for power station—General specification. The technical summary of the standard was introduced. The standard specifies the technical requirements, test methods, test rules, ordering content as well as packaging, marking and quality certification of high alloy heat-resisting steel thick wall pipes and forgings used for power station, which is applicable to the large diameter (outside diameter of not less than  $\Phi 219$  mm) and thick wall pipes and forgings of high alloy heat-resisting steel used for power station produced by hot extrusion or forging process. The research of the standard is helpful for enhancing the industrial competitiveness of high alloy heat-resisting steel thick wall pipes and forgings for power stations, and plays a positive role in the infrastructure construction of power system in China.

**Key words:** hot extrusion; high alloy heat-resisting steel; thick wall pipes; power station; national standard

目前, 我国拥有的超超临界火电机组的数量在

国际上最多。在持续重视绿色发展和可持续发展的背景下, 我国加快发展大容量高参数机组, 特别是超超临界机组和先进超超临界机组, “提高发电效率, 节约一次能源, 改善环境, 降低发电成本” 将是我国火力发电的必然趋势。

高合金耐热钢厚壁管道和锻件是电站关键零部件之一。一台 1000 MW 机组 (包括超超临界蒸汽锅炉和电站四大管道) 需高端耐热合金钢 P92 大口径

收稿日期: 2025-01-23; 修订日期: 2025-02-26

基金项目: 国家标准化管理委员会 2020 年第一批推荐性国家标准计划 (20201638-T-469)

作者简介: 秦思晓 (1992-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: sxcxb\_qsx@126.com

通信作者: 雷丙旺 (1966-), 男, 博士, 正高级工程师

E-mail: leibingwang@163.com

厚壁管道 1300 多吨, 年需求量约 2 万吨。电站用 P92 厚壁管道一直以来被德国瓦卢瑞克·曼内斯曼钢管公司和美国威曼高登锻造有限公司等国外厂家垄断, 进口钢管不仅售价高昂, 而且供货周期长, 使电厂的建设成本和周期均大幅增加, 严重影响了我国电力的建设和发展。

电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件主要采用热挤压工艺进行生产。我国对热挤压工艺的研究起始于 20 世纪 50 年代, 经过 70 年来的探索和发展, 目前我国热挤压技术日趋成熟。1964 年计伟志等<sup>[1]</sup>对复杂断面型材正挤压时的金属流动规律进行了研究。1978 年, 江油长城钢厂从国外引进了一条 31.5 MN 挤压机生产线, 用于制造不锈钢等合金的无缝管和棒材, 产品规格为  $\Phi 42 \sim \Phi 219$  mm<sup>[2]</sup>。2005 年, 攀钢集团四川长城特殊钢有限公司开发电站锅炉用热挤压合结管, 产品的性能及表面质量均达到了用户要求, 受到了用户肯定<sup>[3]</sup>。2006 年, 浙江久立特材科技股份有限公司从意大利 Danieli 公司引进 3500 t 热挤压机, 挤压产品规格为  $\Phi 42 \sim \Phi 219$  mm, 使热挤压工艺在不锈钢无缝钢管生产中充分应用<sup>[2]</sup>。“八五”期间, 我国开始着力进行 P91/T91 钢的国产化研究, 其中, 宝山钢铁有限责任公司钢管分公司负责研制 T91 钢<sup>[4]</sup>, 攀钢集团成都钢铁有限责任公司负责研制 P91 钢<sup>[5]</sup>。在 2009 年以前, 我国生产的 P91 钢管规格受技术能力制约, 只能生产直径小于  $\Phi 800$  mm 的厚壁管<sup>[6]</sup>。国内各大锅炉厂及电厂对 P92 钢管的需求只能依赖进口, 不仅交货周期长、价格高, 且受制于人。为了打破国外厂商对我国的封锁和控制, 内蒙古北方重工业集团有限公司于 2006 年开始组织研发锻造工艺制造 P92 钢管, 2009 年, 依托当时首台套世界最大的 3.6 万吨黑色金属挤压机成功研发了 620 °C 超超临界机组用 P92 钢大口径厚壁无缝管道技术, 通过热挤压成形工艺生产的大口径厚壁管道的各项性能均满足了产品技术要求。2014 年, 国产 P92 钢厚壁管道的示范项目——华能南通电厂 2#超超临界百万千瓦机组正式投入并网发电。在此基础上, 雷丙旺等<sup>[7]</sup>利用 3.6 万吨垂直立式挤压机热挤压 G115 大口径厚壁无缝钢管, 为国家 630 °C 示范电站提供坚实的关键零部件基础。根据 650 °C 先进超超临界机组的需求, 开发了 Sanicro25 高端耐热合金钢大口径厚壁无缝钢管, 标志着国产高合金耐热钢厚壁管道和锻件的制造技术达到国际先进水平。

随着国产高合金耐热钢厚壁管道和锻件的应用

范围不断扩大, 与之相配套的技术标准的研究与开发工作严重滞后的问题日益突出。在国家标准 GB/T 41982—2022《电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件 通用技术条件》<sup>[8]</sup>制定前, 我国没有关于高合金耐热钢厚壁管道热成形工艺要求的相关标准, 这直接影响了高端耐热合金钢厚壁管道的竞争能力。针对这一问题, 国家标准 GB/T 41982—2022《电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件 通用技术条件》<sup>[8]</sup>基于高合金耐热钢管道及锻件产品生产制造经验和参数, 科学、合理、全面地规定了电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件的技术要求、试验方法和检验规则等, 体现了中国大型挤压锻件近年来取得的技术进步, 对提高电站用高合金耐热钢管道及锻件产品的整体技术水平, 提升电站运行的本质可靠性, 增强国家能源安全具有重要作用, 有效服务于我国电力系统基础设施建设。

## 1 高合金耐热钢厚壁管道和锻件在电力工业中的应用

随着我国电力工业飞速发展, 电站锅炉向大容量、高参数的超(超)临界机组发展, 超临界、超超临界机组的过热器、再热器、集箱和蒸汽管道等通常使用 P91 钢管。内蒙古北方重工业集团有限公司从 2004 年开始率先采用锻造镗孔的工艺研制电站用大口径厚壁无缝钢管, 2006 年攻克了锻造镗孔制造 P91 大口径厚壁无缝钢管技术, 2008 年开始陆续向甘肃平凉电厂 2×600 MW 机组、山东济宁电厂 2×330 MW 超临界机组批量供货。P91 大口径厚壁无缝钢管经过近 10 余年的快速发展, 轧制、锻造和挤压等工艺制造的大口径无缝钢管已在电力工业中得到充分应用。

P92 钢在 P91 钢的基础上对成分做了进一步完善, 使材料具有更好的抗腐蚀性、持久强度、韧性、可焊性和时效前后的组织及性能稳定性, 目前主要应用于超超临界锅炉和电站管道领域。内蒙古北方重工业集团有限公司于 2006 年开始组织研发 P92 大口径厚壁钢管, 在西安热工研究院有限公司、东方电气集团东方锅炉股份有限公司等单位的协助和支持下, 2008 年成功研发了 P92 无缝钢管并应用于东方锅炉厂超超临界动力锅炉的集箱。

尽管国产 P92 钢管研发成功并批量生产已近十年, 但产品主要应用于超超临界锅炉, P92 四大管道此前依然依赖进口, 导致国内新型火电机组的建

设长期处于原材料受制于人、成本居高不下的境地。推进 P92 钢管的国产化,可有效支撑国家超超临界火电机组建设,扭转关键原材料受制于国外的局面。在国家能源局等部门及中国华能集团有限公司等电力集团的支持和帮助下,内蒙古北方重工业集团有限公司不断创新提,升产品的市场竞争实力,东方电气集团东方锅炉股份有限公司、上海发电设备成套设计研究院有限责任公司及西安热工研究院有限公司等单位的检测结果表明内蒙古北方重工业集团有限公司生产的 P92 钢管性能完全满足 ASME SA-335/SA-335M<sup>[9]</sup>要求,个别指标优于进口钢管。

2010 年,国家能源局启动超超临界火电机组四大管道国产化进程,选定华能国际电力股份有限公司南通电厂 1000 MW 超超临界火电 2 号机组作为示范项目,机组 50%指定采用内蒙古北方重工业集团有限公司生产的 P92 无缝钢管。2012 年,内蒙古北方重工业集团有限公司与华能南通电厂签订 P92 四大管道的钢管供货合同。2013 年,上海发电设备成套设计研究院有限责任公司、东方电气集团东方锅炉股份有限公司完成内蒙古北方重工业集团有限公司 P92 钢管持久强度试验,产品性能满足要求。2014 年,江苏华能南通电厂顺利通过“168 小时”测试运行,正式并网发电。同年,南通电厂进行了首次 C 级检修,对内蒙古北方重工业集团有限公司 P92 钢管进行了检测,各项指标数据与进口钢管接近,用户反映良好。机组四大管道的国产化工作对促进国内先进耐高温高压关键材料的研发有重要意义,有利于提高我国大口径厚壁无缝钢管的研发和生产水平,降低电站造价,缩短电厂建设周期,提高我国电力行业市场竞争力。

钢铁研究总院有限公司在 P92 钢的基础上调整优化合金元素,开发出了 G115 钢。G115 钢是一种新型的马氏体耐热钢,在温度低于 650 ℃ 时, G115 钢的蠕变持久强度是 P92 钢的 1.5 倍<sup>[10-12]</sup>。G115 钢主要应用于主汽和再热段管、高温过热器出口集箱和高温再热器出口集箱等高温高压元件,在世界首台 630 ℃ 国家电力示范项目——大唐郅城发电有限公司 2×100 万千瓦超超临界二次再热燃煤发电机组中投入应用,目前厚壁管道已开始交付电厂。

## 2 我国热挤压技术研究现状

### 2.1 热挤压技术发展历程

热挤压工艺是生产无缝管材的重要方法之一,

无缝管挤压示意图如图 1 所示。1797 年,该工艺最早被用来制备铝管,1899 年,俄罗斯首先使用该工艺制造较难熔的金属和合金棒材;1924 年,英国采用热挤压工艺挤压管材;1925 年,法国使用热挤压工艺挤压黑色金属产品;1928 年,德国建成了世界上第 1 台机械挤压机,用以生产碳素钢无缝钢管。但是,在批量生产钢管时,由于热挤压过程中润滑、工模具寿命、无氧化加热以及提高挤压速度等问题未得到解决,该技术在较长时间内没有投入工业生产。1941 年,玻璃润滑剂的试验成功解决了钢的热挤压工艺中的润滑问题;20 世纪 50 年代,美国和英国先后开始应用感应加热技术,解决了无氧化加热的问题;此外,随着特殊钢的不断开发研制,挤压模具使用性能得到提升,可承受高温、高压、高疲劳负荷,工模具的寿命延长,以上几项制约热挤压技术发展的主要问题的解决,使钢管热挤压技术进入加速发展的阶段。

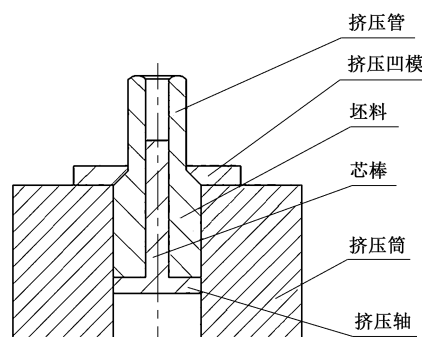


图 1 无缝管挤压简图

Fig. 1 Schematic diagram for seamless pipe extrusion

### 2.2 我国热挤压技术发展历程及研究现状

我国钢的热挤压技术起步较晚,对钢的挤压工艺试验开始于 20 世纪 50 年代,在黑龙江国营华安机械厂自制的一台 15 MN 挤压机上完成。1966 年,上钢第五钢铁厂等单位试制 GH39 高温合金管等军工产品,在松江 901 厂的 15 MN 挤压机上开展热挤压高温合金管的试验研究。但是,由于技术和装备基本上依赖于国外,我国钢的热挤压技术发展缓慢,2009 年之前,国内仅有四川长城钢厂等少数几家单位形成了一定的批量生产热挤压钢管的能力<sup>[13-14]</sup>。

2009 年,内蒙古北方重工业集团有限公司建成当时世界最大的 3.6 万吨垂直挤压机,并挤出第 1 根大口径厚壁无缝钢管,随机开始小批量生产。通过小批量试生产,挤压工艺和工模具结构等进一步优化,具备了大批量生产大口径厚壁无缝钢管的能力<sup>[15]</sup>。3.6 万吨挤压机挤压的 P91、P92 厚壁无缝



钢管产品已批量应用于超(超)临界电站锅炉。

李攀等<sup>[16]</sup>针对某型号核能发电用 P91 大口径厚壁无缝钢管进行了不同挤压比条件下的挤压成形缩比数值模拟,发现挤压过程中晶粒组织演变受金属的温度场和应变速率的影响,并进行了与数值模拟相匹配的缩比挤压试验。刘长勇等<sup>[17]</sup>根据一维稳态传热原理,搭建了界面传热系数的测试平台,在 P92 钢与 H13 钢之间使用玻璃润滑剂隔开,研究温度、玻璃润滑剂厚度和界面压力对传热系数的影响,并提出了应用于工艺数值模拟的界面传热系数的数值。

内蒙古北方重工业集团有限公司研发的超超临界机组高品质 P92 大直径厚壁无缝钢管制造工艺,生产的 P92 钢管满足 ASME SA-335/SA-335M<sup>[9]</sup>、DIN EN 10216-2: 2007<sup>[18]</sup>和 GB/T 5310—2023<sup>[19]</sup>的要求;产品可应用于超超临界锅炉、电站四大管道等不同领域。采用该方法有效保证了产品质量, P92 钢管可替代进口产品<sup>[20]</sup>。

雷丙旺等<sup>[7]</sup>利用 3.6 万吨垂直立式挤压机热挤压 G115 大口径厚壁无缝钢管,针对 G115 大口径厚壁管制造关键技术展开论述,包括原材料准备、制坯、挤压成形和钢管热处理,同时试制了大口径厚壁无缝钢管,结果表明:钢管表面质量良好,各项指标均满足技术要求。刘海江等<sup>[21]</sup>采用 Deform-2D 有限元软件对大长径比管坯挤压试制工艺进行了数值模拟。结果表明,随着挤压模角的增加,金属流经挤压模变形区的应变速率从  $30 \sim 90 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  变化至  $5 \sim 150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;通过合理选择模角、提升金属流动均匀性,可以有效控制产品表面质量。在 3.6 万吨挤压机上挤压试验,试制生产情况与模拟结果一致,经检测,钢管的性能显著提高,材料利用率提升 27%。

为解决 650 ℃先进超超临界机组用大口径厚壁无缝钢管的缺失问题,内蒙古北方重工业集团有限公司联合瑞典山特维克公司,开发了 Sanicro25 高端大口径厚壁无缝钢管,实现了国际首创。

### 3 研制国家标准 GB/T 41982—2022《电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件 通用技术条件》的必要性

高合金耐热钢厚壁管道主要应用于超超临界火电机组的主要汽水输送管道和锅炉的集箱管,是对材料性能及安全性要求特别严格的电力工业建设用关键设备,其制造工艺和质量控制,直接影响到电

力工业建设的质量。

国家标准 GB/T 41982—2022《电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件 通用技术条件》<sup>[8]</sup>的研制符合我国重点产业发展规划的要求。在该标准制定前,我国尚没有针对电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件加工制造的国家或行业标准。由于缺少统一且明确的工艺技术要求和质量控制要求,国内主要的电力管道及锻件生产企业在生产活动中选用不同的制造方法和工艺参数,生产的产品质量参差不齐,良品率低,应用于火电机组后可能导致质量问题。同时,在产品交付过程中由于缺少统一的技术要求和试验方法作为验收依据,供需双方只能按各自的技术协议或企业标准生产和验收,给企业组织生产带来了极大的困难,急需研制一项国家标准规范行业生产,为高合金耐热钢厚壁管道的工艺设计、生产制造、验收交货以及质量判定提供依据。

国家标准 GB/T 41982—2022《电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件 通用技术条件》<sup>[8]</sup>的研制以标准引领科技成果转化成为生产力。内蒙古北方重工业集团有限公司具有 60 多年高品质军民品用特殊钢生产制造历史。从 2004 年起,内蒙古北方重工业集团有限公司应用特种钢制造技术生产电站用大口径厚壁管道,2009 年建成了 3.6 万吨垂直挤压机和大口径厚壁管道生产线,在国内率先实现 P91 钢、P92 钢等高端大口径厚壁管道的批量生产。开发的 G115、Sanicro25 等高合金耐热钢大口径厚壁管道,通过工艺稳定批试制。

内蒙古北方重工业集团有限公司从 2008 年开始陆续供应国内外超(超)临界机组四大管道用 P91 钢、P92 钢大口径厚壁管道。由于 P91 钢、P92 钢或其相近牌号材料在国内外标准要求中存在一定差异,某些标准中的部分技术要求偏低,未充分考虑到材料的成分、组织和性能特点,或者对一些重要指标没有给出规定。为了保证超超临界机组用大口径厚壁管道的质量和机组的运行安全,内蒙古北方重工业集团有限公司与西安热工研究院有限公司等研究院所和用户共同起草了产品指标更严格的技术协议,且按此协议生产的 P91、P92 四大管道在国内外电厂得到广泛应用。

该标准基于内蒙古北方重工业集团有限公司的先进科技成果,充分提炼和固化了高合金耐热钢管道及锻件的先进生产制造经验和技术参数,规范了设计、制造与验收要求,提高了电站用高合金耐热钢管道及锻件产品的整体技术水平,通过引导生产

企业采用统一、先进的生产技术,稳定生产工艺、提升产品质量一致性,有效地保证产品的使用质量、提高使用寿命,为火电蒸汽锅炉及火电管道提供可靠的技术支持。该标准的研制对提高我国国产电站用厚壁管道和锻件的市场竞争力、提升产业竞争能力和促进电力装备建设发展将起到积极的作用。

通过该标准的研制,有助于引导广大电力工业建设单位采购、使用国产高合金耐热钢厚壁管道和锻件,提升电站运行的本质可靠性,降低生产建设成本,对我国电力工业建设行业实现节能、减排、降耗,如期实现“双碳”目标将起到积极推动作用,满足电力工业发展的需要。因此,研制国家标准 GB/T 41982—2022《电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件 通用技术条件》<sup>[8]</sup>,明确工艺及质量控制要求、试验方法,严格规范电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件的制造与验收要求是十分必要的。

## 4 国家标准 GB/T 41982—2022《电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件 通用技术条件》的技术概要

根据我国电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件的生产实践,对比 GB/T 5310—2023<sup>[19]</sup>、NB/T 47010—2017<sup>[22]</sup>,国家标准 GB/T 41982—2022《电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件 通用技术条件》科学、合理、全面地规定了电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件(以下简称产品)的技术要求、试验方法、检验规则、订货内容及包装、标志和质量证明书,适用于热挤压或锻造工艺生产的电站用高合金耐热钢大口径厚壁(外径不小于  $\Phi 219$  mm、壁厚不小于 25 mm)管道和锻件,对化学成分、常温冲击功、非金属夹杂物、显微组织等技术内容进行细化,并加严控制,同时增加了生产过程控制要求,提高了产品质量的保证度,应用价值高,推广前景广。该标准在以内蒙古北方重工业集团有限公司的 3.6 万吨垂直挤压机为代表的热挤压工艺生产大口径厚壁钢管的过程中得到广泛应用,标准的技术要求、试验方法等在超(超)临界电站四大管道用 P91、P92 钢管的订货中被充分使用。尤其是 G115 管道首次被应用于世界首台 630℃ 国家电力示范项目——大唐郅城发展有限公司 2×100 万千瓦超超临界二次再热燃煤发电机组,该标准在内蒙古北方重工业集团有限公司和河北宏润核装备科技股份有限公司热挤压生产 G115 管道中提供了有力支撑,包括订货技术

协议中管道的技术要求、试验项目和技术指标等。

以下为该国家标准的关键性成果内容。

### 4.1 术语及定义

该标准给出了厚壁管道、环形锻件、饼形锻件、碗形锻件、法兰锻件、条形锻件和三通锻件的定义。为了便于对上述术语的理解,除用文字描述外,还通过主视图、左视图对锻件形状进行了表达,明确了厚壁管道内径、碗形锻件和法兰锻件的壁厚、底厚的位置。

### 4.2 技术要求及试验方法

该标准规给出化学成分、冶炼方法、供应状态、热处理、力学性能、低倍组织、非金属夹杂物、晶粒度、显微组织、形状和尺寸、表面质量、内部质量、致密性及工艺性能的要求,并规定了相应的试验方法。

#### 4.2.1 化学成分

该标准规定了钢的牌号及化学成分(熔炼成分)、化学成分允许偏差,并规定了残余 Ti、Zr 含量、痕量元素含量和各种形态的氢总含量。对化学成分的规定远超国内外 P92 材料产品标准<sup>[9,18-19]</sup>的要求,对保证产品的使用性能具有重要作用。为便于阅读,在附件中提供了与国际钢牌号的成分与之对照。

#### 4.2.2 冶炼方法及供应状态

产品用钢熔炼应采用电弧炉或感应电炉冶炼,并经炉外精炼及真空处理。采用电渣重熔或其他方法冶炼应特殊注明。产品应以热挤压(或锻造)+热处理+精整加工状态供应,规定了产品热处理制度。

#### 4.2.3 力学性能

该标准规定了产品的抗拉强度、规定塑性延伸强度、断后伸长率、冲击吸收能量及硬度等常温力学性能。根据需方要求,可做高温拉伸性能试验。产品应做布氏硬度试验,可在管道外表面做硬度试验,非破坏性试验可采用便携式布氏硬度计或里氏硬度计进行,有争议时,以便携式布氏硬度计的测量结果为准。该标准提高了 P92 材料常温拉伸性能指标的下限,大幅度提高对材料冲击韧性的要求,常温冲击功的指标较 GB/T 5310—2023<sup>[19]</sup> 提高一倍以上。此外,为响应近年来电厂安装中频繁出现的材料硬度低的问题,对管道硬度指标的下限做出规定。

#### 4.2.4 低倍组织

产品低倍组织中不应有白点及夹杂、裂纹、皮下气泡、翻皮和分层。产品的非金属夹杂物各类夹杂物的细系级别总数与粗系级别总数应各不大于 GB/T 10561—2005<sup>[23]</sup> 中规定的 5.0 级。

#### 4.2.5 显微组织

该标准明确提出了控制 P92 钢中  $\delta$  铁素体含量的要求, P92 钢成品管道的显微组织应为完全的回火马氏体, 要求在  $400\times$  视场下马氏体板条位向清晰。应严格控制避免  $\delta$  铁素体的出现,  $\delta$  铁素体含量不超过 1%, 最严重视场不得超过 3%。对 P92 钢管道非金属夹杂物的规定, 较 GB/T 5310—2023<sup>[19]</sup> 更为严格。

#### 4.2.6 形状和尺寸

该标准对管道的内径上偏差进行了规定, 给出了壁厚允许的上偏差的计算公式。管道不圆度、壁厚不均应分别不超过外径和壁厚允许偏差的 80%, 每米弯曲度应不大于 1.5 mm, 全长弯曲度应不大于 6 mm。

#### 4.2.7 表面质量

产品内外表面的裂纹、折叠、结疤、凹坑等缺陷及氧化皮应打磨清除, 并对清除要求进行了规定。产品内外表面的机械刻痕、擦伤允许深度应不大于 0.4 mm, 表面粗糙度应不大于  $Ra6.3\ \mu\text{m}$ 。若需方有要求, 可进行磁粉检测或渗透检测。

#### 4.2.8 内部质量及致密性

管道和锻件在进行热处理后应进行超声波检测, 管道应符合 GB/T 5777—2019<sup>[24]</sup> 中的 U2 级; 锻件应符合 NB/T 47013.3—2015<sup>[25]</sup> 中的 I 级。

管道致密性应进行涡流检测。若需方有要求, 管道可进行液压试验, 不应渗漏。

#### 4.2.9 工艺性能

外径  $D$  小于等于  $\Phi 400\ \text{mm}$  的管道应做压扁试验。延性试验试样上不应存在裂缝或裂口, 完整性试验 (闭合压扁) 试样不应有分层、白点、夹杂。试样表面缺陷引起的裂缝或裂口及外径与壁厚比 ( $t/D$ ) 大于 0.1 时试样 6 点钟 (底部) 和 12 点钟 (顶部) 位置处内表面的裂纹或裂口, 不应作为压扁试验合格与否的判定依据。

压扁试验可分两步进行, 首先, 将试样压至两平板间距离  $H$ ,  $H$  的计算方法如式 (1) 所示。此后, 继续进行压扁试验, 直至试样破裂或试样相对两壁相碰。当  $t/D$  大于 0.1 时, 可将管道外壁车削至  $t/D$  小于 0.1, 再进行压扁试验。

$$H = \frac{(1 + \alpha)t}{\alpha + t/D} \quad (1)$$

式中:  $H$  为两平板间的距离, mm;  $t$  为管道壁厚, mm;  $D$  为管道外径, mm;  $\alpha$  为单位长度变形系数, 06Cr22Ni25W3Cu3Co2NbN 钢的  $\alpha$  值为 0.09, 其他钢的  $\alpha$  值为 0.08。

外径  $D$  大于  $\Phi 400\ \text{mm}$  或壁厚  $t$  大于 40 mm 的管

道可用弯曲试验代替压扁试验。弯曲试验的弯芯直径为  $\Phi 25\ \text{mm}$ , 试样应在室温下弯曲至  $180^\circ$ 。一组弯曲试验应包括一个正向弯曲 (靠近管道外表面的试样表面受拉变形) 和一个反向弯曲 (靠近管道内表面的试样表面受拉变形)。弯曲试验后, 试样弯曲受拉表面及侧面不应出现目视可见的裂缝或裂口。

#### 4.3 检验规则

该标准对组批规则、取样数量和取样部位、判定及复验规则进行了规定。进行产品化学成分分析时, 有一件产品的分析结果不符合该标准中规定的要求, 则应全数分析。当产品出现表面硬度值超标时, 可在该部位重新打磨检查, 或选择该部位相邻两处及其对面位置, 合计 3 处测量。硬度不合格应重新热处理, 重新热处理不应超过两次。

### 5 结语

本文介绍了国家标准 GB/T 41982—2022《电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件 通用技术条件》的技术概要, 该标准规定了生产高合金耐热钢管道和锻件的通用技术要求及与之配套的试验方法和检验规则, 并明确了订货内容及包装、标志和质量证明书等随行文件内容。该标准体现了中国大型挤压锻件近年来取得的技术进步, 促进了我国锻件技术和工艺水平的提高与发展, 为高合金耐热钢厚壁管道和锻件的制造和验收提供通用技术条件和产品验收依据, 提升了电站运行的本质可靠性, 增强了国家能源安全, 更好地为我国基础设施建设服务。

#### 参考文献:

- [1] 計伟志, 黎景全. 复杂断面型材正挤压时的金属流动规律 [J]. 上海交通大学学报, 1964 (4): 49–58.  
Ji W Z, Li J Q. The metal flow law during forward extrusion of complex cross-section profiles [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1964 (4): 49–58.
- [2] 王国颖. 无缝钢管的热挤压技术 [J]. 现代工业经济和信息化, 2013 (10): 60–61, 67.  
Wang G Y. Hot extrude technology of seamless pipe [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2013 (10): 60–61, 67.
- [3] 曹勇. 电站锅炉用热挤压结合管的开发 [J]. 特钢技术, 2005 (2): 45–48.  
Cao Y. Development of hot-extruded alloy structure tubes for power station boilers [J]. Special Steel Technology, 2005 (2): 45–48.
- [4] 束国刚, 刘江南. 超临界锅炉用 T/P91 钢的组织性能与工程应用 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006.  
Shu G G, Liu J N. Microstructure Properties and Engineering Application of T/P91 Steel for Supercritical Boiler [M]. Xi'an:



- Shaanxi Science and Technology Press, 2006.
- [5] 郭元蓉, 吴红. P91 无缝钢管国产化研究进展 [J]. 钢管, 2008, 37 (1): 22-27.
- Guo Y R, Wu H. Progress of research on production localization of P91 seamless steel tube [J]. Steel Pipe, 2008, 37 (1): 22-27.
- [6] 程世长, 刘正东. 火电机组高端锅炉耐热钢的发展和国产化 [A]. 600MW/1000MW 超超临界机组新型钢国产化研讨会报告文集 [C]. 扬州, 2009.
- Cheng S C, Liu Z D. Development and domestication of heat-resisting steel for high-end boilers in thermal power units [A]. Proceedings of the Seminar on Localization of new Steel for 600MW/1000MW Ultra Supercritical Units [C]. Yangzhou, 2009.
- [7] 雷丙旺, 李永清, 庞海平, 等. 新型马氏体耐热钢 G115 大口径厚壁无缝钢管制造技术 [J]. 金属功能材料, 2020, 27 (5): 14-19.
- Lei B W, Li Y Q, Pang H P, et al. Manufacturing technology of novel heat resistant steel G115 large-diameter heavy wall seamless pipe [J]. Metallic Functional Materials, 2020, 27 (5): 14-19.
- [8] GB/T 41982—2022, 电站用高合金耐热钢厚壁管道和锻件 通用技术条件 [S].
- GB/T 41982—2022, High alloy heat-resisting steel thick wall pipes and forgings used for power station—General specification [S].
- [9] ASME SA-335/SA-335M, Standard specification for seamless ferritic alloy-steel pipe for high-temperature service [S].
- [10] 刘正东, 陈正宗, 何西扣, 等. 630~700 °C 超超临界燃煤电站耐热管及其制造技术进展 [J]. 金属学报, 2020, 56 (4): 539-548.
- Liu Z D, Chen Z Z, He X K, et al. Systematical innovation of heat resistant materials used for 630~700 °C advanced ultra-supercritical (A-USC) fossil fired boilers [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56 (4): 539-548.
- [11] Liu Z, Xie X. The Chinese 700 °C A-USC development program [J]. Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants, 2017: 715-731.
- [12] 何焕生, 余黎明, 刘晨曦, 等. 新一代马氏体耐热钢 G115 的研究进展 [J]. 金属学报, 2022, 58 (3): 311-323.
- He H S, Yu L M, Liu C X, et al. Research progress of a novel martensitic heat-resistant steel G115 [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58 (3): 311-323.
- [13] 邹子和, 欧新哲, 倪履安. 钢管热挤压成形技术与装备的发展 [J]. 宝钢技术, 2008 (5): 15-19.
- Zou Z H, Ou X Z, Ni L A. Technology and equipment development of hot extrusion forming for steel tubes [J]. Baosteel Technology, 2008 (5): 15-19.
- [14] 邹子和. 我国不锈钢管生产技术的进展及其与国外的差距 [J]. 钢管, 2000, 29 (6): 7-14.
- Zou Z H. Development of domestic manufacturing technologies for stainless steel tubes and gap with similar technologies developed overseas [J]. Steel Pipe, 2000, 29 (6): 7-14.
- [15] 白箴. 垂直挤压大口径厚壁无缝钢管生产线 [J]. 制造技术与机床, 2011 (11): 71-74.
- Bai Z. Vertical extrusion large caliber thick wall seamless tube production line [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2011 (11): 71-74.
- [16] 李攀, 罗建国, 卜祥丽, 等. 大口径厚壁管道热挤压成形过程微观组织模拟及实验研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (3): 169-178.
- Li P, Luo J G, Bu X L, et al. Simulation and experimental study on microstructure of large diameter and thick wall pipes during hot extrusion forming process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (3): 169-178.
- [17] 刘长勇, 张人佶, 颜永年, 等. 带有玻璃润滑剂的 P92 耐热钢与 H13 模具钢间的界面传热系数 [J]. 塑性工程学报, 2011, 18 (5): 24-28.
- Liu C Y, Zhang R J, Yan Y N, et al. Investigation on heat transfer coefficient of glass lubricated interface between P92 heat-resistant steel and H13 steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18 (5): 24-28.
- [18] DIN EN 10216-2 : 2007, Seamless steel tube for pressure purposes—Technical delivery conditions—Part 2: Non-alloy and alloy steel tubes with specified elevated temperature properties [S].
- [19] GB/T 5310—2023, 高压锅炉用无缝钢管 [S].
- GB/T 5310—2023, Seamless steel pipe for high pressure boiler [S].
- [20] 内蒙古北方重工集团有限公司. 超超临界机组高品质 P92 大口径厚壁无缝钢管制造方法 [P]. 中国: CN1040436728, 2016-01-13.
- Inner Mongolia North Heavy Industries Group Corp. Ltd.. Manufacturing method of high-quality P92 large-diameter thick-wall seamless steel pipe for ultra-supercritical units [P]. China: CN10404367213, 2016-01-13.
- [21] 刘海江, 雷丙旺, 胡永平, 等. 大长径比管坯挤压工艺数值模拟及试制 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (12): 24-30.
- Liu H J, Lei B W, Hu Y P, et al. Numerical simulation and trial production of extrusion technology for pipe billet with large length to diameter ratio [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (12): 24-30.
- [22] NB/T 47010—2017, 承压设备用不锈钢和耐热钢锻件 [S].
- NB/T 47010—2017, Stainless and heat resisting steel forgings for pressure equipment [S].
- [23] GB/T 10561—2005, 钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法 [S].
- GB/T 10561—2005, Steel—Determination of content of nonmetallic inclusions—Micrographic method using standards diagrams [S].
- [24] GB/T 5777—2019, 无缝和焊接 (埋弧焊除外) 铜管纵向和/或横向缺欠的全圆周自动超声检测 [S].
- GB/T 5777—2019, Automated full peripheral ultrasonic testing of seamless and welded (except submerged arc-welded) steel tubes for the detection of longitudinal and/or transverse imperfections [S].
- [25] NB/T 47013.3—2015, 承压设备无损检测 第 3 部分: 超声检测 [S].
- NB/T 47013.3—2015, Nondestructive testing of pressure equipments—Part 3: Ultrasonic Testing [S].