

《1000MW 级核电汽轮机组整锻低压转子锻件 技术条件》团体标准

编制说明

一、工作简况

1.1 任务来源

本标准由中国第一重型机械股份公司提出，经中国锻压协会标准委员会批准，列入 2022 年团体标准制修订计划项目，项目名称为《1000MW 级核电汽轮机组整锻低压转子锻件技术条件》，项目编号为 TBJHCCMI010-2021。

本标准主编单位为中国第一重型机械股份公司

本标准参编单位为哈尔滨汽轮机厂有限责任公司、上海电气电站设备有限公司。

1.2 项目背景和意义

为保证 21 世纪我国能源的可持续发展，发展核电是唯一可以大规模取代化石燃料的成熟的清洁能源。在核电装备领域，根据中国核电中长期发展规划，到 2020 年核电装机容量将达到 5800 万千瓦，平均每年新增 2--3 套百万千瓦核电机。“积极”的核电发展政策为我国发展核电事业提供了前所未有的机遇和广阔的市场空间。目前，全球核电已进入了一个高速发展时期，为了改善能源结构，各工业发达国家和发展中国家都在积极致力于核电的发展。

目前国内核电机组整锻低压转子锻件是按日本三菱为中国锻件制造厂制定的标准进行生产制造，并且多项验收指标不明确，需要三菱判定是否合格，国产化进程受制于人。编制此标准是为改变国内大型核电汽轮机整锻低压转子锻件无国产适用标准的现状，为实现核电机组国产化和国际化推广提供坚实的技术支撑，具有良好的社会效益和巨大的经济效益。

中国一重按三菱针对中国制定的核电汽轮机组整锻低压转子锻件技术条件(严于三菱原标准)已生产了海阳 4#机组、陆丰 2#机组共 6 支低压转子锻件，其中海阳 4#机组的 3 支低压转子锻件各项指标全部满足技术要求，并于 2019 年成功通过竣工验收和产品国产化鉴定，中国一重成为国内唯一生产大型核电汽轮机组整锻低压转子锻件的制造商、唯一具有成熟制造经验的企业，具备编写该标准的资格和条件。

1.3 主要工作过程

制定组全面调研了国内外 1000MW 核电高压转子的产品技术条件，同时对我国高压转子锻件的市场需求和生产厂家现状深入了解，同时也对比评价了国内外相关产品各项检测数据，确定了标准主要内容。并通过中国锻压协会标准委员会提出制定标准的建议。

立项申请通过后，按后续计划开展标准制定工作。

1.4 标准主要起草人及其所作的工作

标准主要起草人员：张金珠、于秀平、芮守泰、曹志远、张国利、赵义翰、陈纪伟、宫金鑫。

起草人张金珠、于秀平、芮守泰、曹志远、张国利来自中国第一重型机械股份公司，负责基础研究和模拟实验、数值模拟、试验件生产及解剖分析检测等，并制定产品制造过程中的各项热加工工艺参数、制造过程工艺控制和实施等各项技术工作。

起草人赵义翰来自哈尔滨汽轮机厂有限责任公司，根据产品使用环境和工况提供产品性能指标要求和无损探伤要求。

起草人陈纪伟和宫金鑫来自上海电气电站设备有限公司，二者作为转子汽轮机设计方的技术人员，对转子各项性能指标和检测标准提供合理建议。

二、标准技术内容论据

根据 1000MW 核电常规岛整锻低压转子超大、超长及综合性能高等技术要求开发出的热加工制造技术，一重围绕 1000MW 核电整锻低压转子研制中的炼钢、铸锭、锻造、热处理机械加工等制造技术开展研究，解决技术难题，实现转子国产化。按照转子研制技术路线进行了如下六方面的研究工作：

(1) 采用理论分析与物理模拟和数值模拟技术相结合的方法开展基础研究，为确定制造工艺提供依据。

(2) 采用 600 吨级钢锭解剖获得钢锭原始铸态成分、偏析、夹杂物、孔洞、和组织的分布规律为 600 吨级钢锭的冶炼和锻造工艺指引了研制方向。

(3) 0#试验转子进行工艺方法和制造能力的工程试验，获得制造经验，为核电低压转子研制奠定了基础。

(4) 整锻低压转子锻件整体解剖研究，获得了转子各部位的化学成分、机械性能、组织和夹杂物分布规律，确定了转子锻件材料均匀、纯净、致密，为制造工艺提供了评价，为转子各种研究提供了全面的基础数据支撑。

(5) 通过工艺性的基础研究，原始钢锭解剖数据分析，整段转子的全截面解剖评价以及试制转子的工程化制造经验，完善、优化 1000MWe 核电整锻低压转子热加工工艺为批量化、稳定化制造创造条件；

(6) 715 吨钢锭制造的 1400MW 转子试制成功和海阳 4#机组全套 1000MW 转子稳定生产，确定了 1000MW 核电整段低压转子的制造技术已经成熟。

现今以海阳 4#机组 1000MW 整套低压转子为代表的三支转子已经全部完工，且三支转子的综合指标一致、稳定。标志着 1000MW 核电整锻低压转子成套锻件自主创新及工程应

用完成了历史使命，实现了核电常规岛锻件国产化的目标。

三、调研综述

核电作为清洁能源，在国家“双碳”战略目标提出后将发挥更大的作用。截至 2021 年底，我国大陆地区在建和运行核电机组共 71 台，其中运行机组 52 台。2022 年新核准 6 台机组，我国大陆地区在建、在运、核准的核电机组已达 77 台。

随着核电机组不断增加，核电上网电量也不断增加，由 2016 年 1965.68 亿千瓦时增加至 2021 年的 3820.84 亿千瓦时，到 2022 年第一季度，中国核电上网电量为 928.99 亿千瓦时，同比增长 6.90%。

核电整锻低压转子锻件作为机组核心锻件，服役工况复杂，制造技术要求高，一重承制山东海阳 4#机组 3 支低压转子已经满足交货条件，创收约 6000 万元。

四、生产验证报告

4.1 制造工艺概述

在完成 1000MW 整锻低压转子研制基础上，在 2013 年分别按定型后的工艺投产了海阳 4#机组三支低压转子，形成了批量化生产产品制造。

表 1 工艺定型后的产品批量化生产转子明细

项目名称	产品令号	产品名称	生产技术标准	重量 (t)	锭重 (t)
海阳项目	13A01180HE	LP1 低压转子	HD100.121 R2	175.9	619
	13A01181HE	LP2 低压转子	HD100.121 R2	178.7	619
	13A01182HE	LP3 低压转子	HD100.121 R2	180.3	619

4.1.1 冶炼工艺

碱性电炉粗炼，采用适当的造渣制度和钢包精炼并真空碳脱氧 (LVCD+VCD)。在浇注前和浇注钢锭的过程中进行真空处理，以便得到纯净的钢水。钢锭锭型 619 吨。

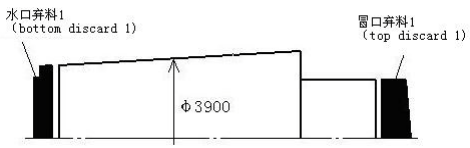
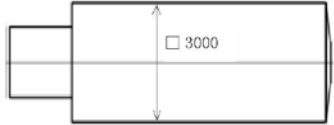
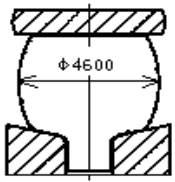
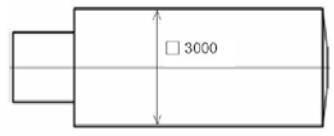
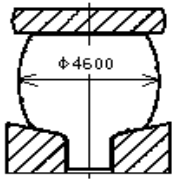
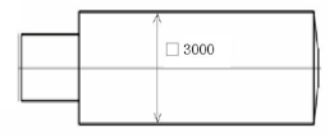
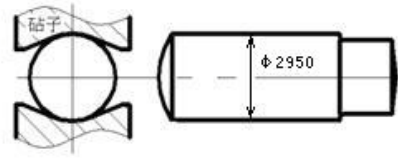
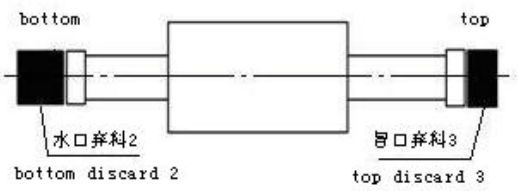
4.1.2 锻造工艺

总切除量(占钢锭重):

冒口 (钢锭顶部) 切除量=冒口弃料 1+冒口弃料 2+冒口弃料 3 \geq 21%

水口 (底部) 切除量=水口弃料 1+水口弃料 2 \geq 9%

表 2 1000MW 核电整锻低压转子锻件锻造过程

过程	草图	注释
压钳把		
拔长		拔比为: 1.6
镦粗		镦比: 2
拔长		拔比为: 1.6
镦粗		镦比: 2
拔长		拔比为: 1.6
预拔长		
拔长出成品		锻件重: 约 390 吨

4.1.3 热处理工艺

①预备热处理，目的是为了细化材料组织晶粒，锻件预备热处理工艺形式为多次正火+回火。锻件锻后热处理工艺示意图如下图 1 所示。

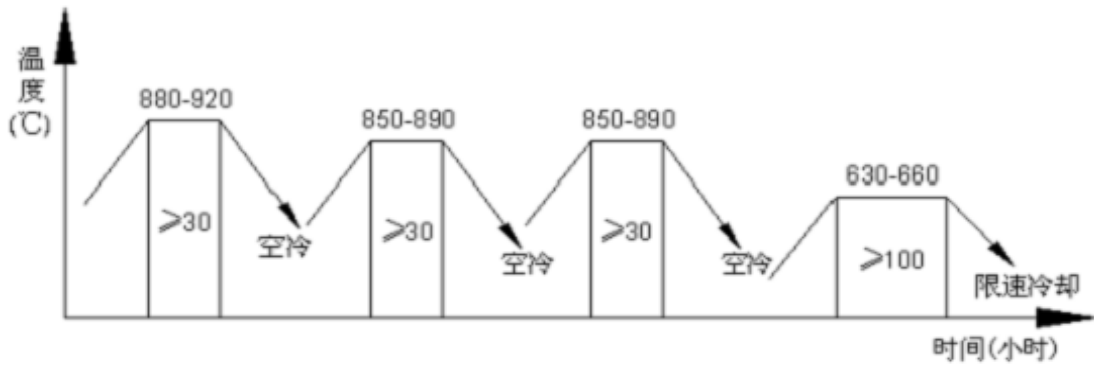


图 1 锻后热处理工艺示意图

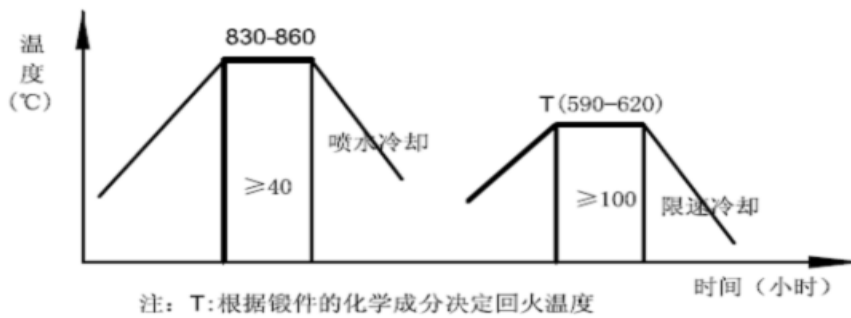


图 2 性能热处理工艺示意图

②性能热处理为淬火加回火，淬火和回火均在垂直状态下进行。按炉温执行性能热处理工艺。锻件在炉中以静止状态加热，以旋转方式进行喷水冷却。图 6 为性能热处理工艺示意图。

4.2 产品的技术指标完成情况

4.2.1 化学成分

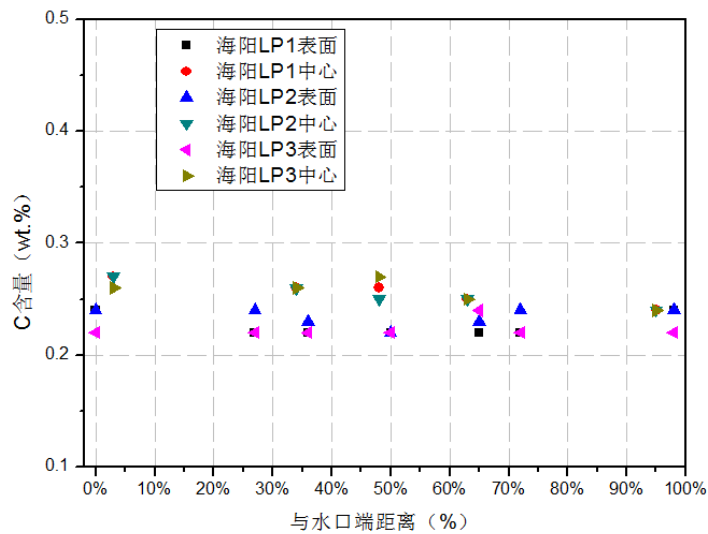


图3 海阳三支转子表面和中心不同位置 C 含量分布

图3列示了转子从表面到中心不同取样部位的C含量分布情况，可以看出，三支转子整体的C含量控制在0.22-0.27%范围，表面C含量范围控制在0.22-0.24%，中心C含量范围控制在0.24-0.27%，说明钢锭横向从表面向中心C含量有微升的趋势，而沿着钢锭纵向分布均匀，没有呈现固定的变化趋势，说明大截面转子的成分偏析控制良好。

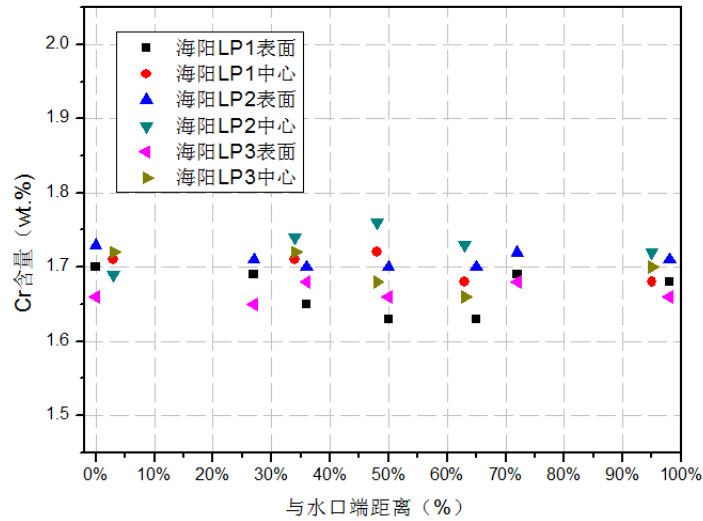


图4 海阳三支转子表面和中心不同位置 Cr 含量分布

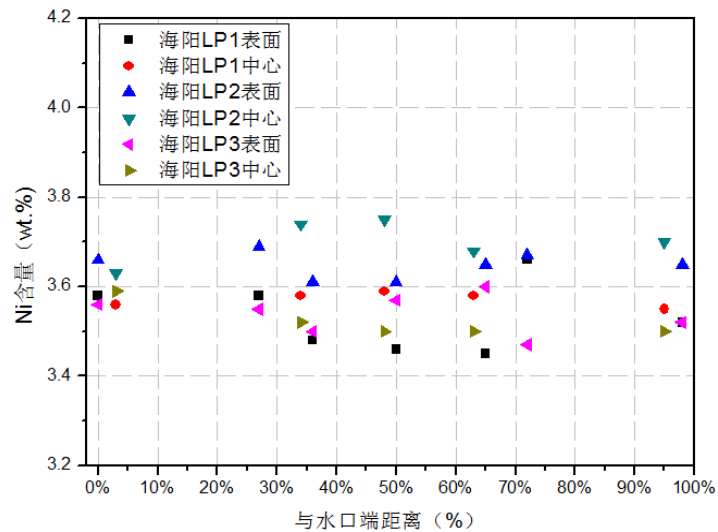


图5 海阳三支转子表面和中心不同位置 Ni 含量分布

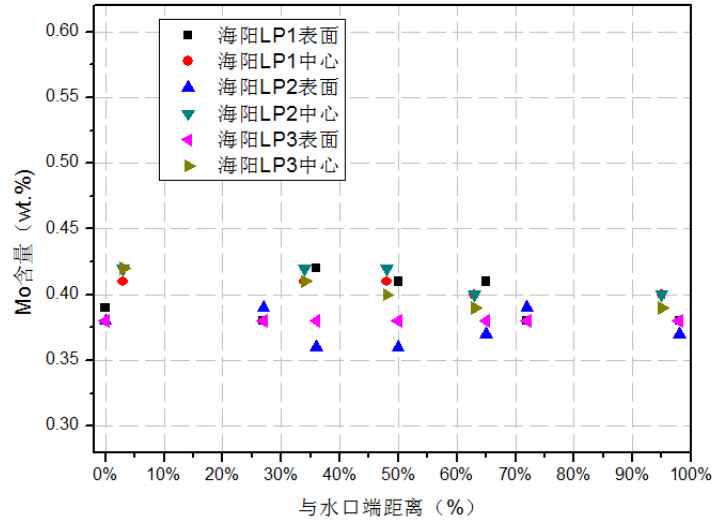


图 6 海阳三支转子表面和中心不同位置 Mo 含量分布

图 4、图 5 和图 6 列示了转子从表面到中心不同取样部位的 Cr、Ni、Mo 含量分布情况，三支转子整体的 Cr、Ni、Mo 含量控制在 1.63-1.76%、3.45-3.75%、0.36-0.42% 范围。

4.2.2 机械性能

硬度检测

产品完工后对转子四条母线的 10 个部位进行了硬度均匀性检查，分别标记为 H1-H10，每个检测部位沿圆周方向互成 90 度检测 4 个点，共计 40 个点。检测位置如图 7 所示。

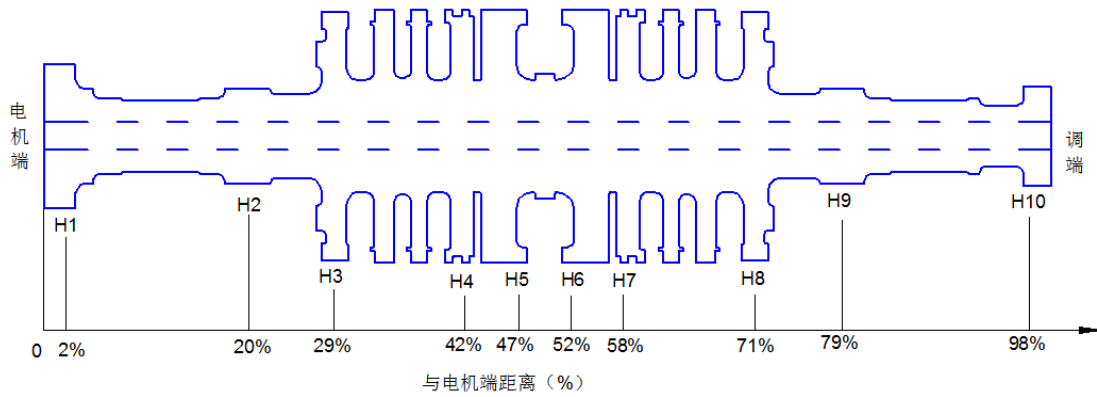


图 7 硬度检测位置示意图

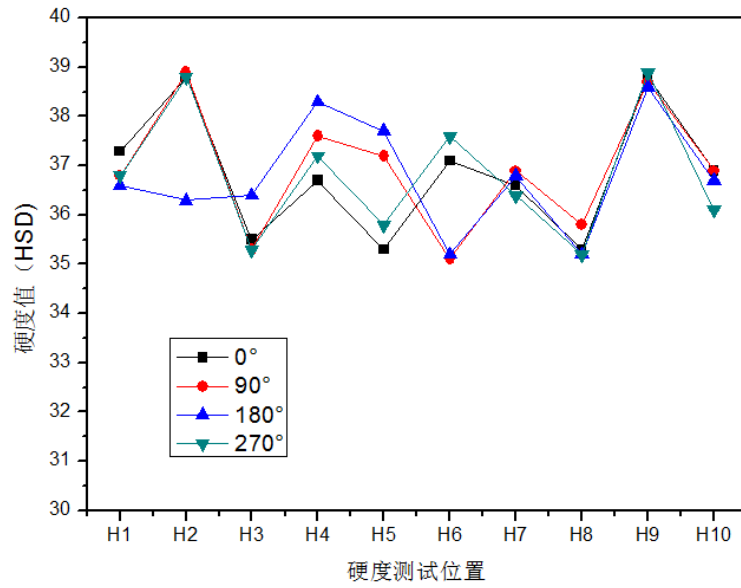


图 8 海阳 LP2 低压转子硬度分布

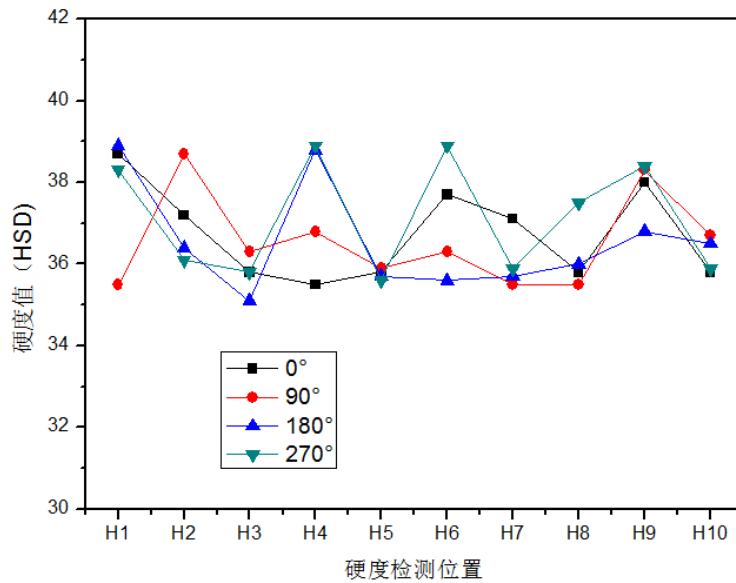


图 9 海阳 LP3 低压转子硬度分布

从图 8 和图 9 的硬度结果可以看出，两支转子整体硬度波动范围分别为 35.1-38.9、35.1-38.9HSD，均匀性 ≤ 3.8 HSD。

机械强度检测

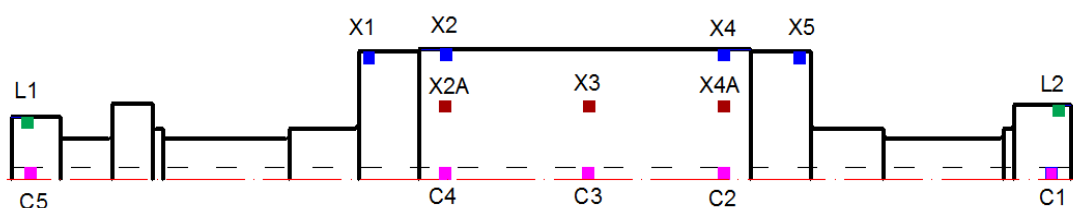


图 10 海阳低压转子性能检测部位示意图

强度检测位置如图 10 所示，分别在转子两轴端表面 L1 和 L2，轴身表面 X1、X2、X4、X5，轴身次表面（距离表面 620mm 深）的 X2A、X3、X4A，中心 C1-C5 的 14 个位置进行强度检测，每个位置检测 4 个点。

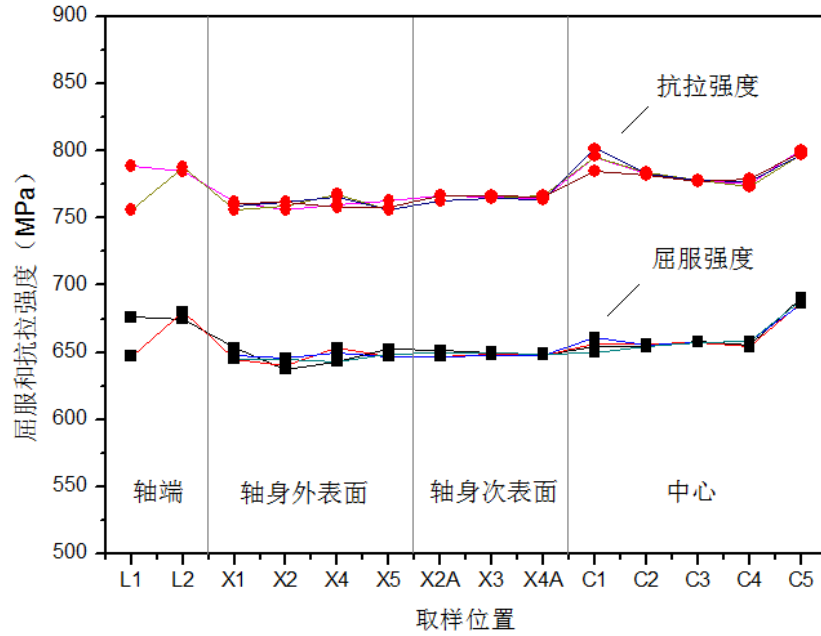


图 11 海阳 LP1 低压转子强度指标

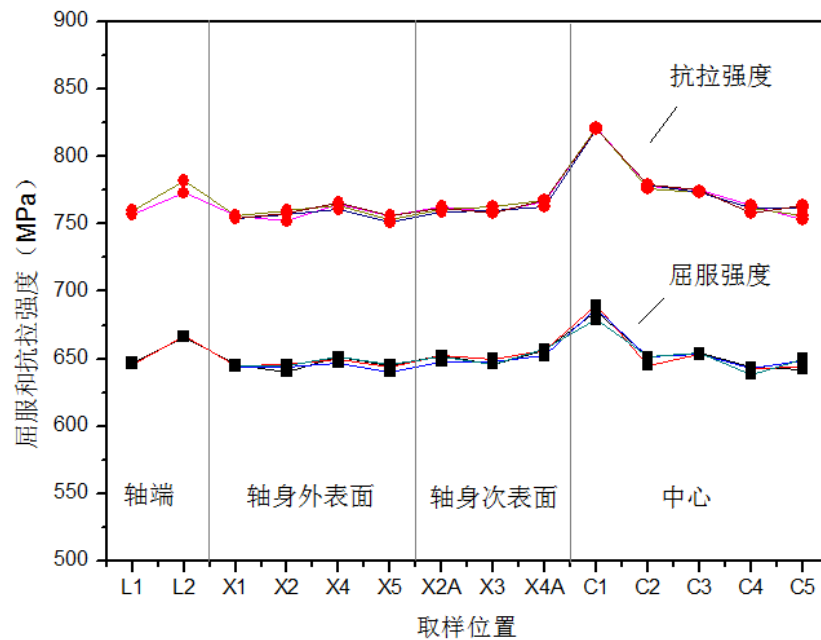


图 12 海阳 LP2 低压转子强度指标

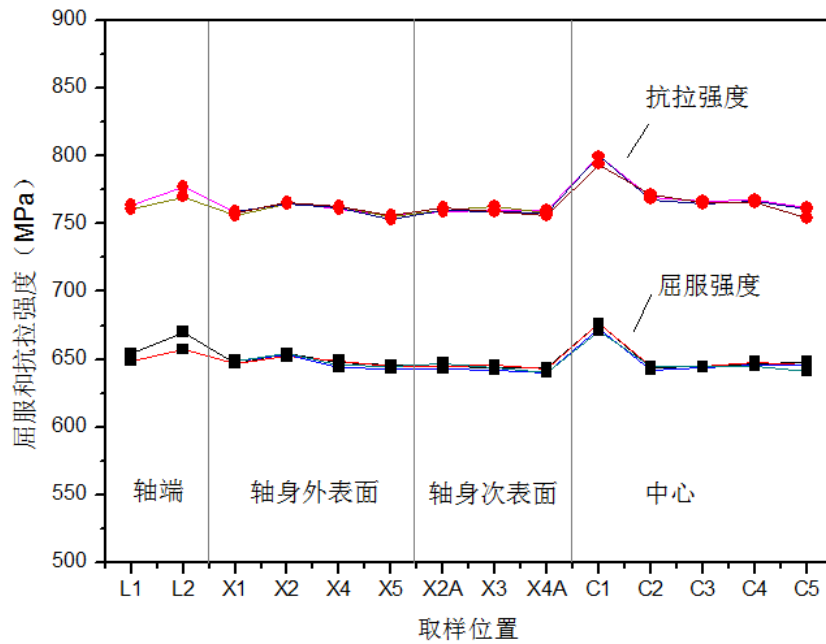


图 13 海阳 LP3 低压转子强度指标

三支转子都存在冒口端 C1 位置强度较其他位置略高的情况，由于不存在明显的元素偏析情况，分析原因可能热处理过程中，C1 位置均处于井式炉底部，回火加热过程中炉底热气氛上浮，该部位所处炉温偏低导致强度略高于其他部位。

总结三支转子在屈服强度均匀性方面的结果，波动性如表 3 所示。

表 3 三支转子屈服强度波动值

	整体波动范围 MPa	整体波动值 Δ MPa	轴身波动范围 MPa	轴身波动值 Δ MPa
海阳 LP1	637-691	54	637-653	16
海阳 LP2	638-690	52	640-657	17
海阳 LP3	640-676	36	640-654	14

从机械性能均匀性可以表明热处理工艺方法和参数合理，同时表明井式炉的加热均匀性和立式喷淬的淬火效果均较理想。

韧性和回火脆化

冲击性能结果

三支转子所有检测结果均落在 181-291J 范围内，达到良好的韧性指标。表面 FATT 低于 -100℃，中心 FATT 相对于表面略高，但与标准要求比较还有很大富余量。

金相检测

根据海阳三支转子金相检测分析报告的结果，所有检测部位的组织均为回火索氏体；

LP1 转子夹杂物级别 ≤ 0.5 ，LP2 和 LP3 夹杂物级别 ≤ 1 ；表面晶粒度级别 6-7 级，距离表面 620mm 深度晶粒度与中心部位晶粒度均在 5-6.5 级范围。

无损检测

三支转子均在调质后和打孔后进行了两次外圆 UT 探伤，均未发现超标缺陷。转子内孔

精加工后均利用自动探伤仪进行了中心孔 UT 探伤，均未发现记录缺陷。

转子分别对外圆局部（图 14）和中心孔表面进行了渗透检测，外圆轴颈架口表面及过渡 R 角和中心孔表面进行了磁粉检测，均未发现超标缺陷。

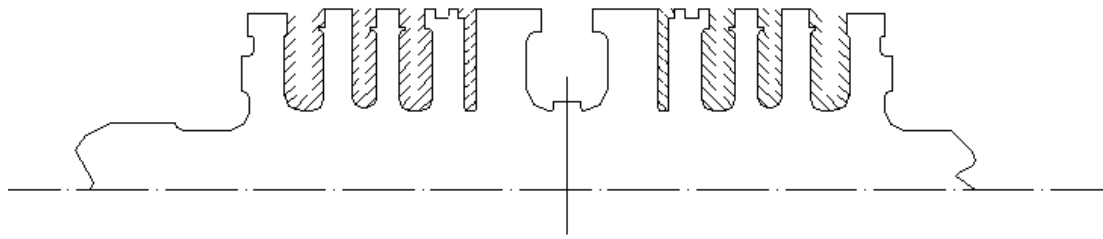


图 14 外圆叶轮槽渗透检测部位

综上所述，在核电常规岛汽轮机整锻低压转子锻件的制造方面，经历了前期的试制和解剖研究，以及后续正式产品的投产，中国一重在超大钢锭的冶炼、锻造、热处理制造技术方面已经解决了大钢锭宏观偏析、大钢锭内部冶金质量的纯净度、锻造心部压实、晶粒度控制和转子性能控制等诸多技术难题。中国一重研制出的 AP1000 常规岛汽轮机整锻低压转子锻件已达到或超过国外同类产品的最高水平。

五、国内外水平对标

目前，国际上只有日本三菱有专门的 1000MW 核电汽轮机组整锻低压转子锻件制造、检验、验收技术标准，国内虽有 JB/T12139-2015《大型核电机组汽轮机整锻低压转子锻件技术条件》，但相当于三菱标准的翻译版，依然存在很多不能判定的条款，离开三菱就很难有操作性。

日本 JSW 能生产制造 1000MW 核电汽轮机组整锻低压转子锻件，因其研制、开发较早，优势明显，制造标准采用三菱原标准，除日本 JSW 以外，国际上只有中国一重能制造并且批量制造 1000MW 核电汽轮机组整锻低压转子锻件，制造标准采用三菱标准（相关要求严于三菱原标准对 JSW 的要求）。

近十年来，三菱针对该类锻件关键技术指标的检测和验收标准多次升版和优化，更具有操作性，而国内转化标准相关内容仍止步于 2010 年以前的三菱标准版本，并且一直应用至今，很大程度上限制了该类产品的制造和应用。亟需形成行业内一致认可的，可执行的制造

技术标准。

六、标准中涉及专利的情况

本标准不涉及专利问题。

七、预期达到的社会效益或经济效果

核电整锻低压转子锻件是代表热加工最高技术水平的产品之一，在一重近 10 年的技术攻关下，完成转子锻件国产化制造，打破 JSW 垄断供货局面。本标准得有应用和实施，对锻件生产制造、检查和验收等方面提供操作纲领，有效推进 1000MW 级核电常规岛整锻低压转子锻件技术自主化，具有很好的社会效益。

在核电装备领域，“积极”的核电发展政策为我国发展核电事业提供了前所未有的机遇和广阔的市场空间。目前，全球核电已进入了一个高速发展时期，为了改善能源结构，各工业发达国家和发展中国家都在积极致力于核电的发展。根据中国核电中长期发展规划，年均核准建设 8~10 台机组，按整锻设计机组占比 1/3 计算，每套机组配备 2~3 支低压转子锻件，订货额达到 1 亿元以上。

八、在标准体系中的位置，与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

本标准与现行相关法律、法规、规章及相关标准协调一致。

九、大分歧意见的处理经过和依据

无。

十、标准性质的建议说明

建议本标准的性质为推荐性标准。

十一、贯彻标准的要求和措施建议

本标准发布实施后，CCMI 将给相关企业寄送标准文本，并通过相关网站、期刊、会议等渠道宣贯本标准，使广大企业了解、掌握、执行本标准。

建议本标准批准发布 2 个月后实施。

十二、废止现行相关标准的建议

无。

十三、其他应予说明的事项

无。

《1000MW 级核电汽轮机组整锻低压转子锻件 技术条件》起草工作组
2022. 8. 4