

文章编号：0258-0926(2016)S1-0056-03；doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S1.0056

反应堆压力容器用大型低合金钢锻件评定技术

杨 敏，罗 英，李长香，马姝丽，付 强

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室，成都，610213

摘要：为固化核电反应堆压力容器（RPV）用大型低合金钢锻件的全流程制造工艺和关键工艺参数，基于 RCC-M M140 规范要求，提出一整套评定技术方案。该技术方案可对 RPV 低合金钢锻件化学成分、机械性能、金相组织的均匀性进行全面验证，已在 RPV 用低合金钢锻件制造过程中成功应用。

关键词：反应堆压力容器（RPV）；锻件；低合金钢；评定

中图分类号：TL341 文献标志码：A

Qualification of Low Alloy Steel Forgings for Reactor Power Vessel

Yang Min, Luo Ying, Li Changxiang, Ma Shuli, Fu Qiang

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: In order to solidify the manufacture process and associated key parameters of large low alloy steel forgings for reactor pressure vessel (RPV), an integrated technical qualification plan is established according to the RCC-M M140. This plan can evaluate the uniformity of the chemical composition, mechanical properties and metallographic structure of low alloy steel forgings for RPV. The plan has been implemented successfully during RPV manufacturing.

Key words: Reactor pressure vessel (RPV), Forging, Low alloy steel, Qualification

0 引 言

反应堆压力容器（RPV）长期在高温、高压、高中子辐照的运行环境下工作，是反应堆冷却剂压力边界的重要组成部分，是防止放射性物质泄漏的第二道屏障。因此，RPV 本体材料必须具有良好的强度和韧性，良好的抗中子辐照能力。为了确保可以制造出合格的 RPV 主体锻件，本文提出了一整套针对 RPV 用低合金钢锻件评定的技术方案，通过对锻件各方面性能的检验，验证制造工艺的合理性。

1 评定的依据和目的

按照法国压水堆核岛机械设备设计和建造规则（2007 版）规范体系设计的 RPV，采用牌号为 16MND5 的低合金钢锻件作为容器制造的主体材料。对于 RPV 用低合金钢锻件材料，按照 RCC-M

M 篇的要求进行设计和制造。

根据 RCC-M M140 规范要求，对于 RPV 的所有部件，包括：上封头、顶盖法兰、筒体法兰、接管筒体、堆芯筒体、过渡段、下封头和进出口接管均应进行锻件评定，从而验证按照制定的部件制造大纲，是否可以获得可控且满足使用要求的产品质量。

2 评定要求

根据 RCC-M M140 的相关规定，通过锻件的制品评定，最终必须满足下列要求：

（1）通过对锻件试料化学成分试验测量结果的分析，确认锻件的化学成分分布均匀。

（2）通过对锻件试料的拉伸性能、冲击性能等试验结果的对比分析，确认锻件的力学性能的均匀程度良好。

(3) 通过无损检测、夹杂物以及晶粒度的分析, 确认锻件的内部组织、夹杂物和缺陷等满足标准要求。

(4) 通过最终结果, 证明锻件制造所采用的制造工艺能够制造出满足要求的合格产品。

3 评定内容

按照 RCC-M M140 相关要求, 锻件评定应该考虑如下评定内容:

- (1) 原材料。
- (2) 冶炼工艺。
- (3) 化学成分要求值。
- (4) 钢锭的重量(及类型)。
- (5) 最小头尾切除率。
- (6) 部件在钢锭中的位置。

(7) 按时间先后排列的各个工序: 冶炼工艺; 锻造; 机械加工; 热处理; 取样; 无损检测。

(8) 每次锻造后的部件外形尺寸图, 包括按 M380 确定的锻造比或总锻造比。

(9) 部件锻造毛坯外形图、热处理外形图和交货外形图。

(10) 中间热处理和最终热处理(性能热处理)。

- (11) 验收试验试料在部件上的位置。
- (12) 试样在试料上的位置图。

针对制品评定, 应按照评定内容, 制定专门的评定试验大纲, 所有试验项目及内容均应按照评定试验大纲要求进行。

4 评定技术方案

RPV 低合金钢锻件一般的制造工艺流程为: 炼钢、铸锭(浇包分析)→锻造→锻后热处理→粗加工(探伤)→评定项目检验→精加工后的无损检测和尺寸检验→标识。基于第 3 节的评定内容, 结合工艺流程, 为了充分验证工艺的合理性, 首先必须确认属于影响锻件质量的关键工艺; 其次, 为了验证按照特定工艺制造完成的产品是否能满足第 2 节的评定要求, 则必须提出特殊的验收要求。

4.1 关键工艺

4.1.1 冶炼 锻件的制造从钢的冶炼开始。RPV 低合金钢锻件用钢的冶炼采用电炉粗炼钢水, 精

炼炉真空冶炼, 然后采用真空浇注而成。

RPV 用钢对元素, 特别是对杂质元素的控制要求异常苛刻。良好的原材料可以提高钢的纯净度, 降低有害元素, 气体元素以及非金属夹杂物的含量。制造过程中, 应对锻件用原材料的杂质元素进行严格控制, 有效地保证锻件中的杂质元素满足设计要求。

电弧炉(EF)粗炼加钢包精炼是 RPV 用钢最常用的制钢工艺。为了防止钢锭中 C、Mo 元素的偏析, 必须采用反偏析法对 C、Mo 元素进行控制。

4.1.2 锻造 锻造工艺关系到锻件的微观组织、力学性能、致密性等技术指标。锻造工艺主要包括钢锭的锻压和锻后热处理。

(1) 锻压: 锻压的基本目的是得到锻件产品的毛坯形状, 同时通过加热中的均热及锻压中的热变形, 减小或消除钢锭中的各种缺陷, 如偏析带、夹渣、裂纹、疏松、粗晶等。锻压时应保证有足够的锻造压力, 使钢锭深层变形, 并在合理应力状态下完成塑性变形, 使多数缺陷或则是弥合, 或被分散开, 或则在高温高压发生焊合, 使组织致密。

(2) 锻后热处理: 锻后热处理包括正火处理和回火处理。锻后的正火和回火处理是作为锻件性能热处理的预处理。正火处理可以进一步降低锻件中氢的含量, 避免微裂纹产生; 同时, 使晶粒细化、均匀化, 为后续的锻件超声波探伤提供条件。另外, 通过正火处理, 可以消除锻造产生的内应力。回火处理的主要目的是提高锻件的韧性和塑性, 获得硬度、强度、塑性和韧性的适当配合, 为后续锻件的性能热处理提供条件。

4.1.3 性能热处理 锻件的性能热处理(又称调质热处理)包括正火、淬火和回火处理, 关系到锻件的晶粒度以及综合力学性能。正火和回火处理的作用与锻后热处理中的正火处理和回火处理相同。性能热处理的淬火处理过程中, 将锻件材料加热使其全部奥氏体化, 然后在一定速度下冷却, 获得贝氏体组织。结合后续的回火处理, 获得强度和韧性合理匹配的材料性能。

4.2 特殊要求

根据评定要求, 锻件的制品评定首先要验证锻件性能的均匀。为了使试样检测结果能代表整个被评定的锻件, 评定对取样位置有特殊要求。特殊要求应结合锻件的具体结构和尺寸, 确保在

进行性能均匀性验证的前提下,满足评定件转产品的要求,使评定技术有较好的工业适用性。

(1) 化学成分:化学成分的均匀性主要受钢锭大小影响。除常规的浇包和产品化学分析外,为了验证整个锻件中化学成分的均匀性,可根据锻件结构,选择多部位进行化学元素的分析。常见的 RPV 的锻件均为筒体结构,可考虑在内外表面,沿着筒体高度方向进行化学成分分析。

(2) 力学性能:锻件力学性能除受钢锭大小影响外,还受锻压工艺和热处理工艺影响;而锻压工艺和热处理工艺与锻件壁厚和性能试样方向有关。因此,为了验证锻件力学性能的均匀,除了可在锻件的高度方向取样进行力学性能试验外,还可在壁厚方向,在 $T/4$ 、 $T/2$ 和 $3T/4$ (T 为锻件壁厚) 壁厚进行取样。同时,考虑锻件的主锻方向,对于拉伸试样和冲击试样,其试样长度方向可分别沿主锻方向和垂直主锻方向。

5 评定实例

以 RPV 堆芯筒体锻件为例,根据锻件制品的化学成分检验、力学性能检验、金相检验和无损检验等结果,验证评定技术是否能够充分验证锻件制品的制造工艺。

5.1 化学成分

化学成分分别在浇包阶段和产品阶段(锻件状态)取样。

锻件化学成分试样分别取自水口端和冒口端,并沿堆芯筒体锻件周向 4 处位置。同时,沿着筒体锻件的 3 条母线,分别进行 C、Mn 和 S 含量的分析。

5.2 机械性能

机械性能包括拉伸性能和冲击性能,性能试样取自水口端和冒口端,并沿堆芯筒体锻件周向

和壁厚方向均进行取样。

5.3 金相检验

堆芯筒体锻件金相检验主要包括微观组织、晶粒度和非金属夹杂物。金相检验试样取自水口端和冒口端,并沿堆芯筒体锻件周向和壁厚方向均进行取样。

5.4 无损检验

堆芯筒体锻件在评定过程中,在粗加工状态(锻后热处理)进行了超声波探伤(属于锻件制造方内控探伤);在半精加工状态(性能热处理后,并加工至接近交货尺寸)进行超声波探伤;在精加工状态(交货尺寸)进行了磁粉检验和液体渗透检验。

超声波探伤采用端面和内外表面的扫查方式,对锻件进行全体积百分百的扫查。磁粉检验针对锻件非堆焊表面进行检验,液体渗透检验针对锻件堆焊表面进行检验。所有无损检验均合格,证明锻件内部质量均匀。

6 结束语

针对 RPV 低合金钢大型锻件,为实现 RCC-M 规范规定的制品评定目标,结合大型锻件的制造特点和工艺流程,制定了一套评定技术方案。评定技术方案对低合金钢锻件从冶炼、锻造、热处理、无损检测等各关键工序都提出了控制要求,可全面验证锻件的化学成分、机械性能、金相组织、内部质量满足设计要求且各项性能的均匀性。

利用该评定技术,可固化工程化 RPV 低合金钢大型锻件制造的关键工艺过程及参数,保证产品质量的可靠性和性能的均匀性。该技术方案已在国内多个核电工程中得到了成功应用。

(责任编辑:张明军)