

# 火力发电厂蒸汽管道 ZG15Cr1Mo1V 铸造水压堵阀裂纹缺陷成因分析

夏霁雯

(中国大唐集团科学技术研究总院有限公司西北电力试验研究院, 陕西西安 710021)

**摘要:** 铸造水压堵阀裂纹缺陷已是火电金属监督检验典型问题之一, 为探究裂纹缺陷成因, 指导现场检验和缺陷处理, 本文以ZG15Cr1Mo1V主汽和再热热段堵阀大规模裂纹缺陷为研究对象, 从材料特性、水压堵阀结构特征、制造工艺、服役特点等方面展开分析。结果表明: 堵阀制造阶段已存在微小原始缺陷, 运行服役后扩展形成裂纹缺陷; 材料特性和制造工艺决定其存在原始缺陷的倾向较大; 分型铸造方式导致阀体两侧缺陷差异明显; 水压试验时堵阀仅前侧受力的状况造成阀体前后侧裂纹缺陷差异; 相贯线过渡区域、口环连接区域易形成疏松、微裂纹等缺陷, 且过渡区域多为应力集中区, 导致裂纹缺陷易在此富集与扩展; 制造热处理和运行服役阶段温度、压力的作用, 促使裂纹缺陷的生成与扩展。

**关键词:** 水压堵阀; ZG15Cr1Mo1V; 铸造; 裂纹缺陷; 成因分析

## 作者简介:

夏霁雯(1992-), 女, 工程师, 工学硕士, 主要从事火电厂耐热钢劣化机理、性能表征、失效分析、检验检测等相关研究工作。E-mail: 316991716@qq.com

中图分类号: TG245

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

05-0710-05

## 基金项目:

中国大唐集团科学技术研究总院有限公司2022年科技计划项目(CDTKYZY2022XB014)。

## 收稿日期:

2023-04-25 收到初稿,

2023-08-24 收到修订稿。

水压堵阀是火力发电厂蒸汽管道上的重要附件, 在电厂运维阶段, 尤其是水压试验时起到重要作用。铸造堵阀因其突出的性价比成为很多电厂的选择, 但随着机组运行时间增长, 铸造水压堵阀开裂问题成为金属部件检验中的典型问题之一, 大有“逢检必裂”的势头<sup>[1-2]</sup>。某330 MW热电厂机组首次A级检修期间发现, 其主蒸汽管道和再热热段蒸汽管道水压堵阀表面存在大量、严重裂纹缺陷, 共计77条, 最长裂纹达400 mm, 经查证, 安装前检测结果符合标准要求, 因此可判定表面裂纹缺陷是在机组正式投运之后产生扩展的。目前堵阀裂纹缺陷分析的公开文献[3-5]多停留在铸造质量差这一较粗放解释状态, 对细节研究较少, 加之此次检测项目中出现的数量之多、长度之长的严重问题尚不多见, 且同时具备同类型、同材质水压堵阀在两种运行参数条件下产生裂纹的情况。故本文尝试通过对该典型案例的分析, 探寻铸造堵阀裂纹缺陷形成规律, 为今后铸造水压堵阀的检验、开裂原因分析、处理措施等方面提供一定的参考。

## 1 水压堵阀概况

主汽堵阀和再热热段堵阀均系铸钢阀门, 材质均为ZG15Cr1Mo1V, 型号分别为SD61HY-P54 200V DN550和SD61HY-P54 100V DN700, 质量分别约为2 150 kg和4 060 kg, 与其相连的入口、出口侧管道均为12Cr1MoV材质, 规格不同, 主汽堵阀两侧尺寸规格为 $\Phi 559$  mm $\times$ 85 mm, 再热热段堵阀尺寸规格为ID(内径)679 mm $\times$ 39 mm。

水压堵阀主要用于机组定检水压试验, 试验用水温一般为环境温度, 各处金属壁温均保持在15~20℃; 水质是经处理过的冷凝水或除盐水, 加 $10\times 10^{-6}$ 的氨和 $200\times 10^{-6}$ 的联氨, pH值为9~10, 氯含量不超过25 mg/L, 固体粒子含量不超过 $1\times 10^{-6}$ 。过热器系统试验压力为1.25倍过热器设计压力, 即26.15 MPa, 再热器系统试验压力为1.5倍再热器设计压力, 即7.32 MPa。机组运行状态下, 水压堵阀视同管道, 主汽堵阀运行压力为17.5 MPa, 运行温度为543℃, 再热热段堵阀运行压

力为4.25 MPa，运行温度为542 ℃。截止本次检修机组已累计运行42 635 h，此次检修为投运后第一次A级检修。

## 2 缺陷检验与特征分析

考虑到水压堵阀表面形态较复杂，且铸态组织粗大，其内部超声波衰减较大，参考相关标准<sup>[6-8]</sup>，铸造堵阀现场宜采用目视检查和表面检测，铁磁性材料优选磁粉检测<sup>[9]</sup>，必要时局部使用超声检测<sup>[10]</sup>。

经磁粉检测发现，主汽堵阀B侧外表面存在17处表面裂纹，其中最长达400 mm，A侧未见裂纹；再热热段堵阀A侧外表面存在8处表面裂纹，其中最长达35 mm，B侧外表面存在52处表面裂纹，其中最长达70 mm。

从磁粉检测结果可知，水压堵阀表面裂纹缺陷分布呈现以下特征：

(1) 主汽堵阀裂纹平均长度更大，再热热段堵阀裂纹更细小、分散，如图1、2所示；

(2) 堵阀裂纹总数量多、阀体两侧数量差异大，阀体前后（以介质流向分）数量差异大，多集中于阀体前侧，如图1、图2所示；

(3) 相贯线过渡区（颈部、腹部与通道结合部）裂纹多，局部有平行多条纹，方向沿相贯线延伸，长裂纹多集中于此，如图1、图3a、图3c所示；

(4) 颈部上沿口环连接部位小裂纹多、个别区域密集，如图1、图2、图3g所示；

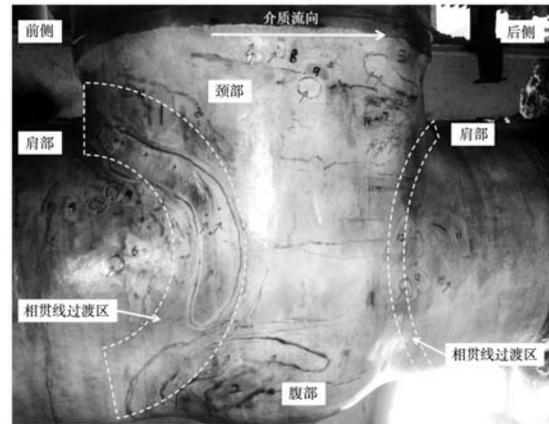


图1 主汽堵阀表面裂纹分布

Fig. 1 Cracks distribution of main steam plug valve

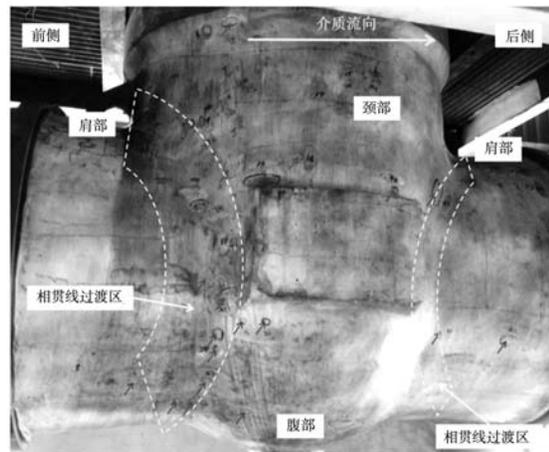
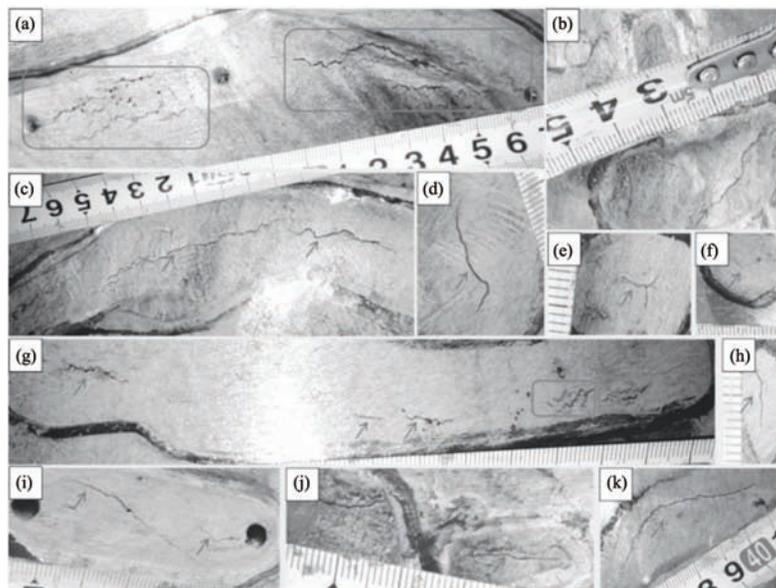


图2 再热热段堵阀裂纹分布

Fig. 2 Cracks distribution of reheating steam plug valve



(a) 平行多条纹和长裂纹；(b) 小裂纹 (c) 长裂纹；(d) 小裂纹；(e) 放射状裂纹；(f) 弯折状裂纹；(g) 口环连接部位单个裂纹；(h-k) 冷裂纹特征裂纹

图3 水压堵阀典型裂纹缺陷形貌

Fig. 3 Typical crack morphology of water pressure plug valve

(5) 其余部位偶发生小缺陷,如图1、图2、图3b、图3d-f、图3h-k所示。

从裂纹形态看,裂纹多为长条状,个别为放射状(如图3e)或弯折状(如图3f),以单个裂纹特征可分为两类,一类蜿蜒曲折呈不规则走势,局部密集区域组织疏松,裂纹相互勾连为网状,为较典型的热疲劳裂纹形态,该种类型裂纹多出现在相贯线过渡区(如图3a、图3c)和口环连接部位(如图3g);另一类则平滑锐利,裂口呈细长直线状,其他位置多为此类裂纹(如图3b、图3d-f、图3h-k)。

### 3 裂纹成因分析

对于裂纹产生的成因需要对材料本身特性、部件结构特征、生产制造工艺、服役运行特点等进行综合

分析,方可从静态和时间两个维度更加全面、透彻地探究原因。

#### 3.1 材料特性

根据相关标准<sup>[8]</sup>,ZG15Cr1Mo1V材料成分如表1所示。

使用JMatPro计算的ZG15Cr1Mo1V材料凝固特性如图4所示,其中成分在标准规定的成分范围内选取,由图可知,ZG15Cr1Mo1V液相线温度为1 510.65 °C,固相线温度为1 447.71 °C,凝固区间较小;凝固速率以相变温度为界呈两段式特征,凝固先由快逐渐趋缓,相变时再次转快,后逐渐趋缓至完全凝固。以上凝固特征导致其流动性总体较差,而且,钢材铸造普遍存在收缩大、易吸气、易氧化的特征,进一步加大了铸造质量控制难度。

表1 ZG15Cr1Mo1V化学成分  
Table 1 Chemical composition of ZG15Cr1Mo1V

	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	S	P	$w_B/\%$
	0.14~0.20	0.40~0.70	0.17~0.37	1.20~1.70	1.00~1.20	0.20~0.40	≤0.03	≤0.03	

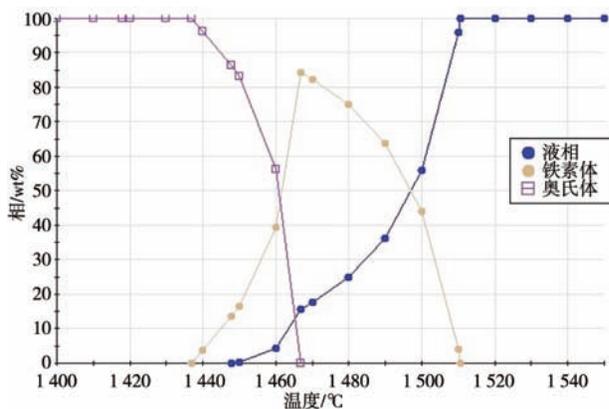


图4 ZG15Cr1Mo1V凝固特性曲线

Fig. 4 Solidification characteristic curve of ZG15Cr1Mo1V

基于上述ZG15Cr1Mo1V材料特性,相比于铸造性能较好的材料,ZG15Cr1Mo1V铸造水压堵阀存在气孔、夹杂(渣)、缩松、缩孔、偏析、微裂纹等缺陷的可能性更高<sup>[11]</sup>,这可能会显著影响其原始品质。这一定程度上解释了铸造水压堵阀总体缺陷数量多,缺陷种类多的特点,但仍无法简单地以铸钢件本身状态差来解释前述所有特征,所以还需要进一步的研究分析。

#### 3.2 结构特征

水压堵阀结构为典型的阀体与管道两种基本形态的正交相贯体,呈“⊥”型,通常阀体“粗大”,

“细长”管道穿阀体而过,在两种几何体交汇处形成相贯线过渡区,此处截面厚度较大,两侧厚度存在差异。这种结构导致堵阀各部位承受的热应力、相变应力、收缩应力等均不相同,其中相贯线过渡区域是凝固后相变区域,易产生拉应力。同时,实际安装后,水压堵阀两侧用支吊架将其悬吊于半空,而其自重集中于阀体中部,不论是静态还是运行中,肩部、腹部的过渡区域均是受力集中的区域。综合来看,相贯线过渡区域是堵阀受力集中部位,更易达到裂纹萌生应力值,这可能是长裂纹集中于此且沿相贯线延伸的原因<sup>[12]</sup>。

#### 3.3 生产制造

一般铸造过程结束后还要进行清理、热处理、机加工、检验、补焊等环节,但其中对阀体本身缺陷情况影响最大的还是铸造和热处理两个阶段。

##### 3.3.1 铸造工艺

参考相关大型阀体铸件工艺特点<sup>[13]</sup>,铸造水压堵阀采用砂型铸造方式,以管道和阀体中心线平面作为分型面,如图5所示,该种分型方式下,阀体两侧恰位于上下型腔之中。

对于下腔阀体,金属液靠重力可迅速填充腔体,在冷铁与型砂共同作用下冷却充分,且下部金属液压力较大,凝固收缩后金属液补缩及时,同时气体、夹

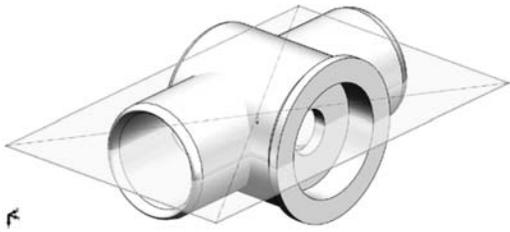


图5 水压堵阀分型面示意图

Fig. 5 Diagram of water pressure plug valve die joint

杂(渣)等向上运动,故下腔阀体往往成型质量较好,缺陷风险小。

对于上腔阀体,凝固过程中气体、夹杂(渣)等上浮至型腔顶部(即阀体外表面),尤其是局部孤立液相区位置(口环部位等),或未溢出而留在铸件内部。同时,金属液充型后,表面和薄壁区域因冷却快,优先结晶形成骨架,但相较于下腔阀体,上腔金属液压力小,补缩能力弱,而且液态收缩、凝固收缩大于固态收缩,凝固不协调更易导致局部缩松、缩孔的产生,尤其是热传导相对较慢的厚截面热节部位(相贯线过渡区等)缺陷更集中。加之铸钢整体收缩率大,后续产生应力和裂纹的趋向也更大。所以,上腔阀体缺陷风险更大。

综上所述,水压堵阀铸造过程决定了其阀体两侧缺陷风险差异大,这在一定程度上导致了裂纹等缺陷集中于阀体一侧的特征,同时从原始缺陷富集程度来看,相贯线过渡区、口环连接区等部位更易产生夹杂(渣)、气孔、缩松等缺陷。这也说明该种铸造工艺仍有较大的改进空间,工艺优化方案仍需进一步探索<sup>[14]</sup>。

### 3.3.2 热处理

对于大壁厚水压堵阀来说,一般都要进行正火+回火处理<sup>[15-16]</sup>,主要目的在于消除粗大的铸态晶粒和非平衡组织,同时释放铸态内应力,改善阀门组织状态和力学性能。但正是因为堵阀大壁厚、结构复杂的特点,实际热处理过程中并不能容易地达到预定控制要求,易出现温度场不均匀、加热温度偏低、保温时间不足等问题,致使组织、应力、性能的调节达不到预期目标,故研究人员<sup>[16]</sup>提出“两正一回”优化热处理

工艺。但即便如此,也需要严格控制工艺方能保证热处理质量。所以在堵阀热处理过程中,若不能严格控制热处理参数,可能造成局部铸造应力与组织应力、热应力相互复合,导致原始缺陷扩展形成裂纹,同时堵阀表面是温度激变界面,易出现过热或激冷现象,这更易造成表面缺陷的恶化。

### 3.4 服役特点

水压堵阀主要在锅炉定检水压试验时发挥作用,通过插入堵板,隔离出试验管段,堵阀前后两侧受力状态差异极大,锅炉侧承受超运行工况的试验压力,虽然保压时间较短,但这可能是导致阀体前后裂纹数量差异大的原因<sup>[17]</sup>,裂纹集中于锅炉出口侧也印证了这一点。

机组运行状态下,水压堵阀承受蒸汽高温高压作用,或变负荷工况下的交变压力作用,会进一步加剧堵阀表面和内部的缺陷扩展。同一阀体各部位所受温度、压力等外部条件基本相同,不会造成部位间的缺陷差异,而横向对比,主汽运行压力大幅高于再热热段蒸汽压力,这可能导致主汽堵阀裂纹更早扩展形成长裂纹,而再热热段堵阀受力较小,缺陷扩展程度较低,因此,呈现分散、细小裂纹的特征。随着服役时间的增长,堵阀裂纹缺陷问题进一步突出。

## 4 结论

(1) 水压堵阀制造阶段已存在内部原始缺陷,在运行服役阶段主要扩展形成热疲劳裂纹。

(2) ZG15Cr1Mo1V材料特性和堵阀制造工艺决定其存在原始缺陷的倾向较大;分型铸造方式一定程度导致阀体两侧应力差异明显;水压试验时阀体仅前侧受力造成阀体前后侧裂纹缺陷差异。

(3) 夹杂(渣)、气体易富集于阀体表面;相贯线过渡区域、口环连接区域易形成缩松、微裂纹,且过渡区域多为受力集中区域,导致裂纹缺陷易在此富集与扩展。

(4) 制造热处理阶段的高能量输入状态和运行服役阶段温度、压力的长期或交替作用,促使水压堵阀裂纹缺陷的生成与扩展。

## 参考文献:

- [1] 杨婕, 崔强, 韩传高, 等. ZG15Cr1Mo1V铸钢水压堵阀裂纹的焊接修复 [J]. 热力发电, 2011, 40 (7): 90+88.
- [2] 陈炜. 电厂锅炉管道堵阀缺陷分析与检验 [J]. 技术与市场, 2018, 25 (8): 150-151.
- [3] 史海燕, 王永亮, 郝建卫. 应用冷补焊工艺对火电厂主蒸汽管道水压堵阀裂纹的现场修复 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (5): 207-209.
- [4] 郑宏晔, 楼玉民, 杨点中, 等. WC9堵阀补焊裂纹分析及措施 [J]. 焊接技术, 2011, 40 (10): 67-68.
- [5] 吴红涛, 耿德标, 李毅, 等. 高温再热蒸汽管道水压堵阀阀体裂纹的补焊 [J]. 阀门, 2011 (6): 41-42.
- [6] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会 (SAC/TC262). 电站阀门: NB/T 47044—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [7] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会 (SAC/TC262). 电站堵阀: GB/T 29462—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [8] 全国锅炉标准化技术委员会. 锅炉管道附件承压铸钢件技术条件: JB/T 9625—1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [9] 李兴捷, 张钊騫, 刘文锁, 等. 《铸钢铸铁件渗透检测》和《铸钢铸铁件磁粉检测》国家标准修订解读 [J]. 铸造, 2020, 69 (6): 652-655.
- [10] 拓凌玺, 李磊, 项鹏. 铸钢件表层缺陷的超声波检测 [J]. 铸造, 2020, 69 (4): 388-391.
- [11] 赵青松, 李子方, 黄力生, 等. 国内大型铸钢件造型工艺现状 [J]. 铸造, 2022, 71 (5): 551-555.
- [12] 孙丰位, 贺乐全, 陈群, 等. 高温高压金属密封球阀厚壁阀体应力分析 [J]. 阀门, 2018 (2): 11-13.
- [13] 杨会林, 高燕万, 苏万雨, 等. 高压控制阀阀体铸造工艺设计及优化分析 [J]. 冶金设备, 2017 (5): 6-10.
- [14] 章志荣. ZG15Cr1Mo1V阀体铸件工艺的改进 [J]. 铸造, 2009, 58 (12): 1278-1279.
- [15] 贾泽春. 特殊结构大型低合金高压阀体的工艺设计及铸造生产 [J]. 铸造技术, 2007 (10): 1390-1392.
- [16] 李晓宏, 王晓燕, 赵秀峰. ZG15Cr1Mo1V阀室热处理工艺研究 [C]//中国机械工程学会热处理分会. 第十一次全国热处理大会论文集, 2015.
- [17] 张娜, 段永松. 水压试验阀应用分析及结构改进 [J]. 阀门, 2008 (5): 18-20.

---

## Cause Analysis of Crack Defects on ZG15Cr1Mo1V Casting Water Pressure Plug Valve of Steam Pipeline in Thermal Power Plant

XIA Ji-wen

(Northwest Branch, China Datang Corporation Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710021, Shaanxi, China)

**Abstract:**

The crack defect of casting water pressure plug valve is one of the typical problems in the metal supervision and inspection of thermal power. In order to explore the causes of crack defects and guide on-site inspection and defect treatment, the large-scale crack defects of ZG15Cr1Mo1V main steam and reheat hot section plug valve are studied from the aspects of material characteristics, structural characteristics, manufacturing process and service characteristics etc. The analysis shows that small original defects in the manufacturing stage expand to crack defects along with operation and service. The material characteristics and manufacturing process determine the tendency of original defects. Parting casting method leads to obvious difference of defects on both sides of valve body. The difference of crack defects in front and back of the valve body is caused by unilateral force in the hydraulic test. The transition region of the intersecting line and the mouth ring connection are easy to form shrinkage and micro-cracks. In addition, the transition area is mostly the stress concentration area, which leads to the enrichment and propagation of crack defects. The effect of temperature and pressure during manufacturing heat treatment and service stage promotes the formation and expansion of crack defects.

**Key words:**

water pressure plug valve; ZG15Cr1Mo1V; casting; crack defects; cause analysis