重大工程装备

某超临界汽轮机主汽阀杆断裂原因分析

张健¹, 缪春辉², 秦小龙³, 王若民¹, 陈国宏², 汤文明³

(1.安徽新力电业科技咨询有限责任公司,合肥 230601;2.国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230601;3.合肥工业大学 材料科学与工程学院,合肥 230009)

摘要:目的 某热电厂超临界机组汽轮机发生主蒸汽阀阀杆(标称材质为 22Cr12NiMoWV(C422)钢)断裂事 故,对发电安全造成不良影响。为此,分析该阀杆断裂失效的原因,提出改进措施,以避免类似事故的发 生。方法 从外观检查、成分测定、金相检验以及断口观察等方面入手,结合硬度和冲击性能测试,探讨阀 杆断裂的主要原因。结果 该断裂阀杆材质符合 22Cr12NiMoWV 钢的成分标准,但其内部存在网状分布的 组织偏析,导致其力学性能达不到标准要求。此外,该断裂阀杆还存在零件设计、加工及热处理工艺不合 理等问题。结论 该阀杆变径处采用直角过渡,十字贯穿孔加工刀痕明显,易造成应力集中,诱发裂纹,裂 纹选择性地沿力学性能薄弱的组织偏析区失稳扩展,最终导致阀杆断裂失效。据此,从质量控制、工艺规 范化等方面提出改进建议。

关键词: 22Cr12NiMoWV(C422)钢; 阀杆; 应力集中; 组织偏析; 力学性能; 断裂失效 中图分类号: TG115; TK14 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)06-0130-06 DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.06.020

Failure Analysis on Main Steam Valve Stem of An Ultra-supercritical Turbine

ZHANG Jian¹, MIAO Chun-hui², QIN Xiao-long³, WANG Ruo-min¹, CHEN Guo-hong², TANG Wen-ming³

(1.Anhui Xinli Power Technology Consulting Co. Ltd., Hefei 230601, China; 2.Electric Power Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Co. Ltd., Hefei 230601, China; 3.School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

ABSTRACT: Fracture of the nominal 22Cr12NiMoWV (C422) steel main steam valve stem of the ultra-supercritical turbine took place, which brought about an adverse influence on power generation security of the thermal power station. Based on the failure analysis of the valve stem, improvement approaches should be put forward in order to avoid the occurrence of similar accidents. Appearance inspection, composition and metallography tests and fracture surface observation, combining with hardness and impact toughness tests, were employed to investigate the fracture causes of the main steam valve stem. The results show that

收稿日期: 2021-01-04; 修订日期: 2021-01-12

Received: 2021-01-04; Revised: 2021-01-12

基金项目:安徽新力电业科技咨询有限责任公司科研项目(2016 答-CL-02)

Fund: Science and Technology Foundation of Anhui Xinli Power Technology Consulting Co. Ltd (2016 Zi-CL-02)

作者简介:张健(1991—),男,工学硕士,工程师,主要从事电站材料监督及失效分析工作。

Biography: ZHANG Jian (1991—), Male, Master in Engineering, Engineer, Research focus: supervision and failure analysis of the materials in power station.

通讯作者:汤文明(1969-),男,博士,教授,主要从事材料失效分析及先进电子封装材料研究工作。

Corresponding author: TANG Wen-ming (1969—), Male, Doctor, Professor, Research focus: materials failure analysis and advanced electronic packaging materials.

引文格式:张健,缪春辉,秦小龙,等.某超临界汽轮机主汽阀杆断裂原因分析[J].装备环境工程,2021,18(6):130-135.

ZHANG Jian, MIAO Chun-hui, QIN Xiao-long, et al. Failure analysis on main steam valve stem of an ultra-supercritical turbine[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(6): 130-135.

Composition of the valve stem meets the requirement of the 22Cr12NiMoWV steel. However, there are net-like distributed segregation microstructures in the steel, leading to that the mechanical properties of the steel cannot meet the standard requirement. Moreover, other disadvantages such as unreasonable mechanical design and manufacturing and unreasonable heat treatment of the valve stem were also found. Both right-angle transition at the location of reducing diameter and apparent machining tool mark through the cross-holes result in stress concentration in the valve stem, even induce microcracks over there. The microcracks preferentially propagate through the segregation microstructures of low mechanical properties, leading to fracture failure of the valve stem. Accordingly, reasonable proposals were put forward from quality control, process normalization and so on. **KEY WORDS:** 22Cr12NiMoWV (C422) steel; valve stem; stress concentration; segregation; mechanical property; fracture failure

火电机组金属部件在高温、高压等恶劣的工作条件 下经常出现爆管、泄露、断裂、磨损等失效及损伤, 轻则影响发电设备的发电效率,重则造成发电设备非 计划停运,从而影响到发电效率与效益。为此,除需 加强金属部件制造环节的管控外,还需强化设备维护 及金属监督各方面的工作。及时、准确地发现各类金 属部件的缺陷,并加以消除,以提升金属部件的使用寿 命,缩短非计划停机时间,具有重要经济与社会价值。

近日,某火电站发生1号超超临界机组2号阀阀杆(标称材质为22Cr12NiMoWV(C422)钢)断裂事故。汽轮机阀杆断裂,会导致阀门不能及时关闭,切断汽轮机进气,不仅会损坏汽轮机,还会诱发安全事故,造成严重的经济损失,影响发电安全。文献检索表明,造成汽轮机主汽阀阀杆断裂失效的原因很多,主要有错用材料、结构设计不合理和存在偏析组织等^[1-3]。因此,需对不同的阀杆断裂事件进行分析,确定具体的失效原因。文中综合阀杆外观检查、成分测定、金相检验、硬度和冲击检验及断口形貌分析的结果,确定造成该阀杆断裂失效的主要原因,并有针对性地对阀杆零件制造与服役状态下的金属监督提出合理化建议。

1 试验

1.1 外观检查与断口分析

如图 1a 所示,该阀杆断裂位置大致位于十字交 叉贯穿孔最大径水平截面处,断口表面粗糙,呈颗粒 状,整体呈脆性断裂特征。直径 5 mm 十字交叉贯穿 孔最大径水平截面处的有效承载面积(707 mm²)明 显小于未开孔处(957 mm²),因而,此处的应力水平 显著提高。加之该阀杆中心孔的加工刀痕非常明显 (如图 1b 所示),极易造成应力集中。此外,在图 1 的阀杆断裂面上有明显不同的 2 个区域,断面中部呈 暗灰色,占整个断口面积的绝大部分,存在明显的氧 化和腐蚀现象,说明主裂纹在缓慢扩展过程中不断被 氧化,腐蚀形成。阀杆外侧断口区域呈亮白色,新鲜, 为最终瞬断区,在阀杆边缘处形成剪切唇。采用 JSM-6490 型扫描电镜(SEM)观察阀杆断口(图 1a 上方框区域)形貌。可以看出,虽然阀杆内部形成的 微裂纹经受高温蒸汽的氧化作用,断口表面被氧化皮 覆盖,但仍分辨出冰糖状的断面特征(图 2),呈现 典型的应力腐蚀开裂特征^[4-5]。



图 1 阀杆断裂面形貌及加工刀痕 Fig.1 Morphologies of the fracture surface and machining tool marks of the valve stem



图 2 阀杆断口的扫描电镜像 Fig.2 SEM image showing fracture surface of the valve stem

对照零件图(图 3a),测量该断裂阀杆 4 个十字 交叉贯穿孔边缘至变径处的距离 d,分别为 1.19、 1.26、1.61、1.69 mm,最大与最小值相差 0.5 mm。 该零件的设计要求 d 应为(1±0.1) mm,而尺寸公差最 高达 69%,不符合设计要求。此外,该阀杆零件 B 处有 *R*=0.8 mm 的圆弧过渡,而断裂阀杆该处则是直 角过渡(如图 2b 所示)。变径处本身存在应力突变, 采用直角过渡更加剧了应力集中,易在邻近的十字交 叉贯穿孔最大径水平截面上诱发裂纹,并失稳扩展, 最终导致阀杆的断裂。



图 3 主汽阀阀杆零件图及贯穿孔边缘至变径处局部形貌 Fig.3 Part diagram of the valve stem (a) and (b) partial morphology showing the hole edge to the reducing diameter site

1.2 成分测定

鉴于有因错选材料导致阀杆断裂的先例^[6],采用 MAX07-F型直读光谱仪测定该阀杆的化学成分,见 表 1。与 GB/T 20410—2006《涡轮机高温螺栓用钢》 中规定的 22Cr12NiMoWV 钢的成分进行对比,确定 该阀杆的选材符合标准要求。22Cr12NiMoWV 钢属 12%Cr 马氏体耐热不锈钢,常温和高温力学性能优 良,缺口敏感性小,减震性及抗松弛性能良好^[6-7]。

1.3 金相检验

依据 DL/T 884—2019《火电厂金相检验与评定技

术导则》对该断裂阀杆进行金相检验。在断裂面附近 取样,研磨抛光,采用三氯化铁-硝酸的水溶液 (V(FeCl₃):V(HCl):V(H₂O)=1:2:4)腐蚀。将腐 蚀前后的试样分别置于 MR3000 型研究级倒置式金 相显微镜下观察。在该阀杆试样抛光面上,可见颗粒 状夹杂物的黑色斑点。根据 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方 法》,判定该 D 类夹杂物的等级为细 0.5 级(如图 4a 所示)。该阀杆显微组织为板条状的回火马氏体,阀 杆组织中有较为严重的组织偏析,呈网状分布,如图 4b 上箭头所示。

Tab.1 Chemical composition of the valve stem								
	Si	V	Cr	Mn	Ni	Мо	W	
标准值	≤0.5	0.20~0.50	11.0~13.0	0.50~1.00	0.50~1.00	0.75~1.25	0.70~1.25	
实测值	0.49	0.34	11.24	0.56	0.72	1.12	1.12	

刻河杠的化学式公



图 4 阀杆的金相照片 Fig.4 Optical cross-sectional images of the valve stem (a) before and (b) after etching

将该阀杆的断面打磨抛光,再经腐蚀后,观察其 显微组织形貌。如图 5 中箭头所示,在阀杆断裂面附 近区域内可见大量的微裂纹(二次裂纹),且二次裂 纹多沿偏析处扩展。这是因为网状偏析为力学性能的



图 5 阀杆断裂部位的显微组织 Fig.5 Optical images showing fracture area microstructure of the valve stem

弱化区域,为裂纹扩展的择优路径。二次裂纹前端尖锐,持续扩展,并互相合并连接。该二次裂纹表面已 发生氧化,说明在阀杆最终断裂前,高温高压蒸汽已 经通过主裂纹,进入阀杆内部的二次裂纹中,造成后 者的表面氧化。

根据该阀杆加工工艺规范要求,除变径处外,阀 杆表面都进行渗氮处理,渗氮层深度要求为 250~ 350 µm, 以提高阀杆表面的硬度和耐磨性^[8-9]。采用 线切割截取含渗氮层的阀杆表面试样,研磨、抛光, 经 4%硝酸酒精溶液腐蚀后,观察其显微组织。如图 6a 所示, 渗氮层和 22Cr12NiMoWV 钢基体被区分开, 测得渗氮层厚度为 319 µm,符合渗氮层厚度要求。 渗氮层最外层组织呈灰白色,半连续状,厚度为20~ 30 µm,为 Fe2~3N 相和 Fe4N 相的混合组织^[10]。在其 内侧为回火马氏体组织的扩散层,厚度约为280 um, 占整个渗层组织的 80%左右。其中可见半连续状、 沿晶间分布的网状偏析,周围包围着白亮的第二相 (如图 6b 所示)。采用 Oxford INCA 型能谱分析仪 (EDS)测试图 6b 组织偏析区附近不同位置的成分, 偏析组织周围白亮的第二相(图 6b、7 中的点 3)较 渗氮层基体(图 6b、7 中的点 1)及偏析组织(图 6b、7 中的点 2) 含有更高的 N、Cr 元素含量,为 CrN^[11]。这种脆性氮化物沿偏析组织外围连续分布 的结构特征,加剧了阀杆组织不均匀性,导致其力 学性能降低。



图 6 阀杆渗氮层截面形貌及图 a 局部放大像 Fig.6 Optical cross-sectional image of the nitrided layer of the valve stem (a) and (b) high-magnification image of the partial area in Fig.a





1.4 力学性能测试

1.4.1 布氏硬度

依据 GB/T 231.1—2002《金属布氏硬度试验第 1

部分试验方法》,采用 HBE-3000A 型布氏硬度计,测试 22Cr12NiMoWV 钢基体的硬度。试验条件:负荷为 1.84 kN,钢球直径为 2.5 mm,负荷保持时间为 15 s。试验测得该钢的平均硬度为 272HB,低于 GB/T 20410—2006 规定的值(277 HB ~331HB)。这可能 与该钢内组织偏析引起合金元素不均匀分布的因素 有关^[12]。

1.4.2 显微硬度

在 1.96 N 载荷下,测得的渗氮阀杆试样从表面 直至基体的 1—5 点(图 8)处的显微硬度及经过换 算后的布氏硬度,见表 2。阀杆试样表面由于经过渗 氮处理,硬度高。试样中钢基体的硬度偏差较大,越 往阀杆中心处,硬度越低,表明该阀杆在渗氮处理前 的调质处理可能存在未淬透的工艺缺陷。



图 8 显微硬度测试点的位置 Fig.8 Microhardness test locations

表 2 显微硬度试验结果 Tab.2 Vickers microhardness test results

	140.2 1101								
	测试点								
	1	2	3	4	5				
$HV_{0.2}$	370	325	284	277	267				
HB	351	309	269	262	254				

1.4.3 冲击韧性

按照 GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击 试验方法》,沿阀杆轴向线切割加工 V 型缺口标准试 样。在 JB-300C 型冲击试验机上测得阀杆试样的平均 冲击韧性为 10 J/cm²,不符合 GB/T 20410—2006 规 定的不低于 11 J/cm²的冲击韧性要求。有文献报道, 正常调质处理的 22Cr12NiMoWV 钢,冲击韧性不低 于 40 J/cm^{2[13-14]}。该阀杆的冲击韧性过低,再次验证 了其显微组织及热处理工艺存在明显缺陷。

2 讨论

22Cr12NiMoWV 钢属 12%Cr 马氏体耐热不锈 钢,性能优良,缺口敏感性低。基于该钢的良好性能, 电站汽轮机阀杆多采用 22Cr12NiMoWV 钢制造。阀 门启闭过程中,阀杆不断承受变载荷,且阀杆服役环 境较为恶劣,处于高温高压蒸汽中。为了提高阀杆的 强度和耐磨性,通常对阀杆表面进行渗氮处理[15-18], 渗氮层厚度要求达到 250~350 µm。该断裂阀杆的化 学成分及渗氮层厚度虽均符合相关要求,但首先,该 阀杆的机加工存在明显不足,十字贯穿孔边缘与变 径处之间的距离误差高达 69%, 变径处采用直角过 渡,十字贯穿孔存在明显的加工刀痕,皆加剧了应 力集中[19-21], 增加了裂纹萌生的几率, 存在明显的加 工缺陷。其次, 该阀杆的冶金质量较差, 导致在渗氮 层及其内部组织中均存在沿晶界分布的网状偏析,且 被白亮的 CrN 第二相质点包围,极大地降低了晶间 结合力,在阀杆断口处的金相照片上也可观察到二次 裂纹多沿网状偏析区扩展的状态。最后,力学性能测 试表明,该断裂阀杆可能还存在调质处理(淬火+高 温回火)工艺不规范的问题。该高合金钢采用较高的 淬火温度以保证其中的合金碳化物(特别是W、Mo、 V等的碳化物)充分溶入奥氏体中,以提高钢的硬度 与冲击韧性。但如果淬火温度过高,也会导致奥氏体 晶粒过大, 淬火后的马氏体板条尺寸大, 致使钢的冲 击韧性降低。同样地, 高的回火温度才能保证该高合 金钢的回火转变充分进行,提高组织稳定性和冲击韧 性。为避免第二类回火脆性,采用高温回火后空冷的 快速冷却方式。参照 GB/T 20410-2006、GB/T 8732—2014《汽轮机叶片用钢》及相关文献^[13,22],一 般选择 1050~1070 ℃油淬+680~710 ℃回火后空冷的 热处理制度,并规范执行,以保证该钢具有优良的综 合力学性能。

3 结论

十字贯穿孔内壁明显的加工刀痕是该阀杆断裂的裂纹源,阀杆热处理工艺不规范,力学性能低,且 组织有网状分布的组织偏析,加剧了微裂纹的失稳扩展,组织偏析区为裂纹扩展的优选路径。上述因素综 合作用,导致该超超临界机组汽轮机 22Cr12NiMoWV 钢阀杆在服役过程中发生早期断裂失效。

建议对 22Cr12NiMoWV 钢阀杆、高温螺栓等汽 轮机零部件加强规格、显微组织及硬度检查,督促生 产厂家选用优质材料,规范热处理及机加工工艺。

参考文献:

- 彭以超, 楼玉民, 李望, 等. 亚临界 300 MW 机组高压 主汽阀阀杆断裂原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2016, 52(10): 738-743.
 PENG Yi-chao, LOU Yu-min, LI Wang, et al. Fracture analysis of high pressure main steam valve stem in subcritical 300 MW unit[J]. Physical and chemical analysis (physical testing), 2016, 52(10): 738-743.
- [2] 陆冬磊. 某国产亚临界 660 MW 机组高调阀阀杆松脱

的分析与改进[J]. 中国设备工程, 2019(12): 71-72. LU Dong-lei. Analysis and improvement of high pressure control valve stem loosening of a domestic subcritical 660 MW unit [J]. China plant engineering, 2019(12): 71-72.

- [3] 张洲全, 涂湛, 何可龙, 等. 汽轮机高压主汽阀阀杆断 裂原因分析[J]. 汽轮机技术, 2016, 58(1): 78-80. ZHANG Zhou-quan, TU Zhan, HE Ke-long, et al. Fracture analysis of high pressure main steam valve stem of steam turbine[J]. Turbine technology, 2016, 58(1): 78-80.
- [4] 张小伍, 陈晓宇, 黄亮. 2Cr12NiMo1W1V 钢螺栓表面 裂纹分析[J]. 汽轮机技术, 2020, 62(4): 317-318. ZHANG Xiao-wu, CHEN Xiao-yu, HUANG Liang. Analysis on surface crack of 2Cr12NiMo1W1V steel bolt[J]. Turbine technology, 2020, 62(4): 317-318.
- [5] QIAO L, FANG L. Fracture analysis of the main valve stem in the steam turbine[J]. Materials science and engineering, 2019, 677(3): 032036.
- 王志武, 费勤楠, 梅伟, 等. 300 MW 汽轮机高压主汽 [6] 阀阀杆断裂原因分析[J]. 金属热处理, 2011(8): 21-24. WANG Zhi-wu, FEI Qin-nan, MEI Wei, et al. Fracture analysis of high pressure main steam valve stem of 300 mw steam turbine[J]. Heat treatment of metals, 2011(8): 21-24.
- 张涛、田峰、陈浩、等. 超临界汽轮机中压调速汽阀 [7] 2Cr12NiMo1W1V 钢阀杆断裂原因分析[J]. 理化检验 (物理分册), 2015, 51(4): 278-282. ZHANG Tao, TIAN Feng, CHEN Hao, et al. Fracture analysis of 2Cr12NiMo1W1V steel stem of medium pressure governing valve for supercritical steam turbine[J]. Physical and chemical analysis (physical testing), 2015, 51(4): 278-282.
- [8] 李玉艳, 丁玉明, 刘霞, 等. 2Cr12NiM01W1V 钢补焊 焊缝氮化层性能分析[J]. 热力透平, 2013, 42(1): 62-64. LI Yu-yan, DING Yu-min, LIU Xia, et al. Performance study of repair welding simulation and gas nitriding on 2Cr12NiM01W1V steel[J]. Thermal turbine, 2013, 42(1): 62-64.
- [9] 徐文祥. 某发电厂高压主汽阀阀杆断裂失效分析[J]. 热加工工艺, 2020, 49(14): 157-160. XU Wen-xiang. Fracture failure analysis of valve rod of high pressure main steam valve in a power plant[J]. Hot working technology, 2020, 49(14): 157-160.
- [10] 胡胜天. 1Cr12Ni3MoVN 钢调质与气体渗氮工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. HU Sheng-tian. Study on quenching and tempering and gas nitriding process of 1Cr12Ni3MoVN steel [D]. Haerbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- 王荣滨. 钢氮化质量缺陷分析及对策[J]. 现代制造工 [11] 程,2002(1):52-53. WANG Rong-bin. Analysis and countermeasures of quality defects in steel nitriding[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2002(1): 52-53.
- [12] 齐越,李骥,卢伦,等. 汽轮机叶片用 2Cr12NiMo1W1V 不锈钢偏析缺陷成因分析及改善措施[J]. 理化检验(物 理分册), 2019, 55(9): 602-606. QI Yue, LI Ji, LU Lun, et al. Cause analysis and improvement measures of segregation defect of

2cr12nimo1w1v stainless steel for turbine blade[J].

Physical and chemical analysis (physical testing), 2019, 55(9): 602-606.

- [13] 毛磊、李如栋、张道钢、等.热处理制度对 2Cr12NiMoWV 钢组织和力学性能的影响[J]. 钢铁, 1998, 33(11): 50-53. MAO Lei, Li Ru-dong, Zhang Dao-gang, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of steel 2Cr12NiMoWV[J]. Iron & steel, 1998, 33(11): 50-53
- [14] 赵中平,黄维浩.汽轮机高温叶片用钢的最佳性能配 合[J]. 动力工程, 1997, 17(2): 59-63. ZHAO Zhong-ping, HUANG Wei-hao. Optimized property adjustment of steel for high-temperature steam turbine blades[J]. Power engineering, 1997, 17(2): 59-63.
- 杨剑群, 刘勇, 叶铸玉, 等. 2Cr13 钢的表面气体渗氮处 [15] 理[J]. 金属热处理, 2009, 34(7): 16-18. YANG Jian-qun, LIU Yong, YE Zhu-yu, et al. Surface gas nitriding treatment of 2Cr13 steel[J]. Heat treatment of metals, 2009, 34(7): 16-18.
- 刘焕秀. 18Cr2Ni4WA 钢氮化和喷丸强化处理的残余应 [16] 力及性能[J]. 理化检验(物理分册), 2013, 49(10): 661-663. LIU Huan-xiu. Residual stress and properties of 18Cr2Ni4WA steel after nitriding and shot peening[J]. Physical and chemical analysis (physical testing), 2013, 49(10): 661-663.
- [17] GU J F, BEI D H, PAN J S, et al. Improved nitrogen transport in surface nanocrystallized low-carbon steels during gaseous nitridation[J]. Materials letters, 2002, 55(5): 340-343.
- [18] 李万军,李肖霞.1Cr11MoNiW1VNbN钢气体渗氮方法 研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(22): 213-214. LI Wan-jun, LI Xiao-xia. Research on gas nitriding method of 1Cr11MoNiW1VNbN steel[J]. Hot working technology, 2017, 46(22): 213-214.
- [19] 梁恩宝,朱平,王淦刚. 某电站阀门阀杆断裂原因分析 [J]. 电力安全技术, 2020, 22(5): 29-32. LIANG En-bao, ZHU Ping, WANG Gan-gang. Cause analysis for valve stem fracture of power plant valve[J]. Electric safety technology, 2020, 22(5): 29-32.
- 李建军. 国产超临界 600MW 汽轮机再热调节阀阀杆断 [20] 裂原因分析[J]. 黑龙江科技信息, 2014(23): 60. LI Jian-jun. Fracture analysis of reheat control valve stem of domestic supercritical 600 MW steam turbine[J]. Heilongjiang science and technology information, 2014 (23): 60.
- 张林茂, 陈峰, 刘子夫, 等. 300MW 机组高压调节汽阀 [21] 阀杆脱落或断裂的故障分析与处理[J]. 电力技术, 2009(6): 47-50. ZHANG Lin-mao, CHEN Feng, LIU Zi-fu, et al. Failure analysis and treatment of high pressure control steam valve stem falling off or breaking in 300 MW unit[J]. Power technology, 2009(6): 47-50.
- 刘多智, 李延峰. 2Cr12NiMoWV 钢扇形板的热处理[J]. [22] 热处理技术与装备, 2009, 30(1): 53, 54. LIU Duo-zhi, LI Yian-feng. Heat treatment process of 2Cr12NiMoWV fanning strips[J]. Heat treatment technology and equipment, 2009, 30(1): 53, 54.