

异种焊接关键技术在汽轮机中的研究与应用

宋抵军¹, 闫正军¹, 张磊¹, 张强², 张达³

(1. 国能中卫热电有限公司, 宁夏中卫 755099; 2. 哈尔滨汽轮机厂有限责任公司, 黑龙江哈尔滨 150090;
3. 佳木斯大学材料科学与工程学院, 黑龙江佳木斯 154000)

摘要: 620 ℃及以上等级超(超)临界汽轮机转子等部件主要采用异种焊接方式连接, 但异种金属化学成分不同, 焊接性能存在明显差异, 易产生裂纹等缺陷, 而汽轮机在燃煤发电机组中起着至关重要的作用, 因此异种焊接技术成为制约燃煤发电汽轮机快速发展的主要因素之一。随着我国从传统工业化模式向生态文明的绿色发展模式加速转变, 提高汽轮机能量转化效率成为最重要的途径之一, 特别是异种焊接技术的快速进步, 使我国超(超)临界汽轮机的应用迎来新的发展机遇。本文概述了汽轮机异种部件焊接技术发展现状, 分析了异种焊接技术的优劣、应用及发展趋势。通过对高温先进汽轮机关键部件异种焊接技术的总结和展望, 可加深对异种材料结构及性能变化规律的理解, 促进汽轮机部件异种焊接技术的开发及进步。

关键词: 汽轮机; 异种焊接; 超(超)临界; 燃煤发电机组

中图分类号: TG407 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 02-0103-10

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0016

作者简介:

宋抵军(1990-), 男, 学士, 助理工程师, 研究方向为汽轮机不同材质部件焊接应力与变形控制。E-mail: 354260305@qq.com

通信作者:

张达, 男, 硕士, 讲师。E-mail: 1790323529@qq.com

基金项目:

黑龙江省省属高等学校基本科研业务费项目(2022-KYYWF-0584)。

收稿日期:

2025-09-18 收到初稿,
2025-10-10 收到修订稿。

引用格式:

宋抵军, 闫正军, 张磊, 等. 异种焊接关键技术在汽轮机中的研究与应用[J]. 铸造, 2026, 75(2): 103-112.

SONG Zhijun, YAN Zhengjun, ZHANG Lei, et al. Research and application of key technologies for heterogeneous welding in steam turbines [J]. Foundry, 2026, 75(2): 103-112.

力争于2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和是我国为加快经济绿色转型而对国际社会所做的庄严承诺, 同时世界各国着力调整能源结构、提升效率, 这已成为实现“双碳”愿景的主要方式^[1-3]。由于工业化和人类生活的改善, 能源消耗不断增加, 尽管风能和生物能源非常有前景, 但还不足以满足社会的巨大需求, 燃烧化石燃料仍是目前全球最主要的发电方式之一^[4-6]。

减少燃煤电厂对环境最主要的影响措施是优化蒸汽条件^[7-8]。当高温高压汽轮机进汽温度约为620~700 ℃时, 铁素体、奥氏体耐热钢汽轮机转子的力学性能和抗氧化性能已经达到极限, 不能满足使用要求, 因此镍基高温合金成为超(超)临界汽轮机转子材料的主要选择, 但镍基高温合金的熔炼和锻造受到吨位的限制。目前采用的方法是在不同工作环境下选择不同材料, 然后通过焊接连接形成异种焊接转子^[9-13]。然而, 异种焊接汽轮机转子仍存在技术挑战, 如焊接接头组织不均匀、两侧材料蠕变强度匹配度差等, 易造成失效。此外, 由于部件尺寸大, 通常条件下采用多层多道焊, 这会在焊缝区域形成柱状晶区和等轴晶区, 进一步增加焊缝界面的组织不均匀性, 使得异种焊接接头更加脆弱, 进而增大汽轮机转子焊接接头高温性能的评估难度^[14-16]。

目前, 对汽轮机转子异种焊接结构断裂韧性的研究越来越受到重视, 因此, 本课题开展汽轮机异种焊接技术分析, 以期在该领域已有研究基础上进一步总结并对以上问题, 为我国超(超)临界汽轮机转子设计和开发提供坚实的理论支撑。

1 汽轮机异种焊接的必要性与挑战

汽轮机从开始应用发展至今, 其蒸汽参数不断提高, 机组容量不断增大, 同时级数逐渐增多, 结构愈发复杂。作为蒸汽条件改善的延伸, 700 ℃级先进超(超)临界(A-USC)机组的实用化需求在全球范围内不断增加, 其温度较600 ℃级超(超)

临界机组提高了100℃。如果A-USC能够实现,汽轮机效率将超过50%,发电机组效率(以高位发热量为基准)也有望达到46%以上^[17-19]。这有赖于新型耐热钢及焊接技术的不断发展,目前汽轮机异种焊接技术主要应用在缸体与蒸汽管道、高中低压联合转子连接和叶片修复等方面^[20]。

2 汽轮机组异种焊接技术应用

2.1 缸体及蒸汽管道

精确制造蒸汽通道对于汽轮机效率至关重要^[21],一种可行的方法是优化蒸汽路径,减少旋转部件和静止部件的空气动力损失和泄漏损失。在先进的超(超)临界机组中,奥氏体耐热钢和镍基超级合金等耐热材料成为加热器管、厚壁管道(蒸汽管道、壳体)的候选材料^[6, 22-24]。目前,出于经济考虑,运行温度低于650℃的部件主要采用铁素体/马氏体等级的P91和P92钢,这些组件通常需要进行铁素体/马氏体钢与镍基合金之间的异种焊接^[25-27],但高温下镍元素易夺氧形成NiO,在结晶时会形成气孔等缺陷,给焊接带来一定困难。

王强等^[28]针对联合循环汽轮机关键铸钢机中低压部分IL30再热阀壳本体与连接段,采用手工电弧焊对G17CrMoV5-10与F91进行焊接,并结合焊前及焊后热处理工艺进行了研究。结果表明:两种材料焊接性能均较差,焊接过程中合理控制焊接预热温度和层间温度,以及制定适当的焊后热处理工艺是保证焊接性能的重要方式;焊材T Phoenix 3KC具有良好的焊接性,各项性能指标均能满足G17CrMoV5-10/F91异种材料的焊接性能要求。赵健等^[29]针对百万级核电汽缸本体Cr-Mo低合金铸钢件与不锈钢接管锻件两者在焊接过程中经历热循环时,焊缝及其附近区域会呈现明显的温度场梯度而产生残余应力、焊缝开裂等问题进行研究。利用钨极惰性气体保护焊(TIG焊)打底和手工电弧焊填充剩余部分相结合的技术,将衬环焊接到不锈钢接管一侧,再将衬环插入汽缸管接头进行手工电弧焊。焊接过程中衬环不会完全熔透,克服了背面氩气保护效果不好的问题,规范了汽轮机中接管位置焊接工艺过程。付强等^[30]探讨了超(超)临界汽轮机铸钢件、管材和锻件用钢异种焊接中的主要技术问题。结果表明:选用焊接材料既要考虑焊接接头的工作环境及要求,又要能够降低熔合区碳的扩散迁移和熔合线附近焊缝区马氏体脆化层的宽度,同时合理控制焊接热输入,降低焊接残余应力,力求获得理想的焊缝组织;1Cr9Mo1VNbN与CrMo(V)异种焊接选择匹配

焊接材料时,合理制定焊接工艺可以满足工作要求,也有利于降低企业生产成本。药芯电弧焊(FCAW)是一种高效焊接工艺,适用于厚壁部件的焊接。Baumgartner等^[31]评估了药芯焊丝在新型硼合金铸钢CB2(9Cr-1.5Mo-1Co)与P92钢制管道进行异种焊接时的适用性。研究表明:CB2铸件与P92管的异种焊接可以使用CB2和P92药芯焊丝进行;比较P92全焊金属与CB2药芯电弧焊金属发现,P92药芯焊丝在625℃时具有更高的蠕变强度。

IN617合金是一种固溶体和有序 γ 相强化的镍、铬、钴、钼合金,在980℃以上表现出优异的蠕变强度和抗氧化性能。P92钢(9Cr-1.8W-0.5Mo-V-Nb)是一种铁素体/马氏体耐热钢,其在高温下具有优异的力学性能^[32]、良好的焊接性能^[33]和高应力腐蚀裂纹抗性^[34],因此被广泛用于澳大利亚核电站的低温(低于650℃)运行部件。P92钢和IN617合金异种焊接的关键在于选择合适的填充金属,因为这两种基材在化学成分、显微组织、力学性能和热膨胀系数(TEC)方面都表现出不均匀性^[35-36]。

Kumar等^[37-38]研究了IN617合金与P92钢异种焊接的可焊性,采用镍基高温合金ERNiCrMo-3作为填充材料,通过钨极惰性气体保护焊(GTAW)工艺进行常规V型槽和窄槽设计的异种连接。表1为P92钢、IN617合金基体和ERNiCrMo-3填料的化学成分^[37],图1为V型和窄槽的凹槽细节^[37]。研究表明:Nb和Mo颗粒在枝晶间偏析,形成了富Nb的NbC相、Laves相以及富Mo相;从P92基体到焊缝,Cr、Mo和Ni浓度急剧增加,而Fe浓度则大幅下降;填充焊缝与IN617间的界面上几乎没有相互扩散;P92熔合线附近硬度值急剧上升,这是由于形成了低硬度的未混合区和高硬度的P92粗晶热影响区(HAZ)。

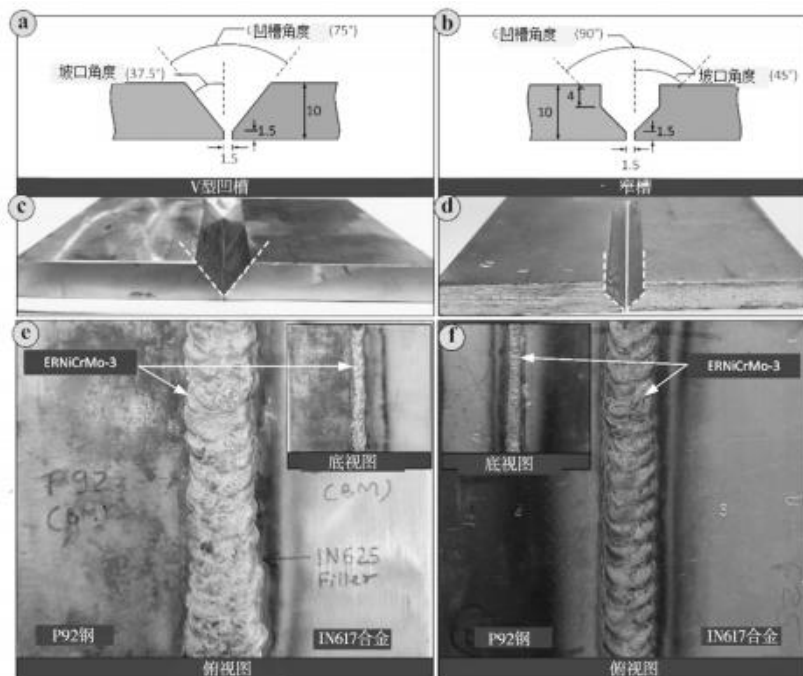
Khan等^[39]以奥氏体不锈钢AISI316L和镍基高温合金IN617为研究对象,采用激光束焊接(LBW)和电子束焊接(EBW)后,对焊件进行电化学极化研究和材料表征。结果表明:电子束焊接在腐蚀电位和腐蚀速率方面优于激光束焊接;氯离子活化使激光束焊接试样比电子束焊接试样更容易发生严重腐蚀;该研究中电子束焊接工艺明显优于激光束焊接技术。Bhaduri等^[40]通过窄间隙TIG焊接工艺,对汽轮机转子用617M合金与10%Cr钢锻件进行异种金属焊接,同时研究了617M合金管对管和管对端盖的异种金属焊接,焊料采用617合金填充金属(ERNiCrCoMo-1)焊丝。他们开发出两种10%Cr钢与617M合金焊接工艺:一是采用ERNiCrCoMo-1填充金属直接焊接10%Cr钢与617M合金,随后进行焊后热处理(PWHT);二是先用

表1 P92钢、IN617合金基体和ERNiCrMo-3填料的化学成分
Tab. 1 Chemical compositions of P92 steel, IN617 alloy matrix, and ERNiCrMo-3 filler

$w_B/\%$

元素	P92 钢名义成分	P92 钢基体成分	IN617 名义成分	IN617 基体成分	ERNiCrMo-3 填料名义成分	ERNiCrMo-3填 料成分	ERNiCrMo-3填 料接头成分
C	≤0.1	0.093	0.05~0.15	0.06	≤0.1	0.01	0.02
Si	≤0.5	0.21	≤1	0.001	≤0.5	0.09	0.04
Mn	0.3~0.6	0.41	≤1	0.07	≤0.5	0.37	0.05
Cr	8.5~9.5	8.60	20~24	22.30	20~23	20.67	21.80
Mo	0.3~0.6	0.45	8~10	9.11	8~10	9.23	8.80
W	1.5~2	1.98	—	0.05	—	—	0.08
Ti	≤0.01	0.001	≤0.6	0.33	≤0.40	0.12	0.29
Ni	≤0.4	0.31	≥44.5	52.96	≥58	64.89	58.38
Nb	0.04~0.09	0.05	—	0.02	3.15~4.15	3.96	3.02
V	0.15~0.25	0.18	—	0.11	—	—	0.03
Co	—	—	10~15	11.40	—	—	1.25
Al	≤0.02	0.001	0.8~1.5	1.46	≤0.40	0.08	0.38
Cu	—	—	≤0.5	0.02	≤0.5	0.01	0.02
B	0.001~0.006	0.002	≤0.006	—	—	—	—
N	0.03~0.07	0.06	—	—	—	—	—
Fe	余量	87.63	≤3	2.110	≤5	0.36	5.82
S	≤0.01	0.004	≤0.015	0.005	≤0.015	0.001	0.004
P	≤0.02	0.02	—	0.002	≤0.02	0.02	0.004
Cr _{eq}		9.39		32.08		32.26	32.75
Ni _{eq}		5.11		54.73		65.44	59.06
预测组织		马氏体		奥氏体		奥氏体	奥氏体

注: $Ni_{eq}=w(Ni)+0.5w(Mn)+30w(C)+30w(N)$; $Cr_{eq}=w(Cr)+w(Mo)+1.5w(Si)+0.5w(Nb)+2w(Ti)$ 。



(a-b) V型和窄槽的凹槽细节; (c-d) 带凹槽的型板; (e-f) 焊接板

图1 基体凹槽及焊缝示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the substrate grooves and weld seams

ERNiCrCoMo-1填充金属涂覆/焊接覆盖层, 再进行焊后热处理, 最后将覆盖层与617M合金部件焊接。焊后热处理的温度和时间由10% Cr钢决定, 温度范围为670~720 ℃。这两种方法得到的窄间隙TIG焊缝在射线照相检查中未发现显著缺陷。

以马氏体耐热钢为主的钢材抗蠕变性能和抗氧化性能较好, 在实际工业生产过程中应选择合适的异种焊接工艺, 从而使这些耐热钢及合金材料的优越性充分发挥出来。

2.2 高、中、低压联合转子异种焊接

转子是汽轮机的“心脏”, 在发电机组中起着重要作用, 通过先进的制造技术提高其性能是必要的^[41-42]。对于高、中、低压一体化转子, 高、中压转子工作温度高、压力大, 工作环境差, 并且温度变化剧烈, 对材料性能要求更高, 而低压缸亚临界以上机组进汽温度低于高、中压缸进汽温度, 其对转子材料的要求也相对较低。因此, 不同部位的汽轮机转子可采用不同等级材料, 以最大限度地发挥材料的特性^[43-45]。

窄间隙埋弧焊(NG-SAW)和多层多道焊的直接焊接技术已广泛应用于转子异种焊接, 可提高焊接接头的韧性^[2, 4, 9, 13, 46]。朱波等^[47]利用窄间隙TIG焊与NG-SAW组合焊接技术制造了带有过渡层的12Cr/30Cr2Ni4MoV异种转子钢焊接接头, 表2为TIG焊接工艺参数, 表3为SAW焊接工艺参数, 图2为模拟焊接汽轮机转子件与接头宏观形貌。结果表明: 焊接接头的硬度和剪切强度分布特征基本一致, 12Cr/30Cr2Ni4MoV异种转子钢焊接接头的组织不均匀性使得焊接接头冲击韧性呈梯度分布, 回火板条马氏体和回火粒状贝氏体的混合物具有良好的韧性。

郑琦亚等^[48]对大型汽轮机低合金高强度钢

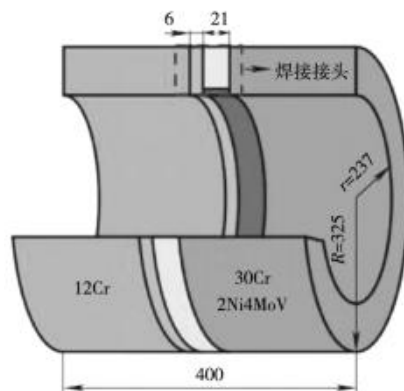
表2 NG-TIG 焊接工艺参数
Tab. 2 NG-TIG welding process parameters

焊接 电流/A	焊接速度 /(mm·s ⁻¹)	预热 温度/℃	层间 温度/℃	焊丝 直径/mm
240	2.5	200	200~250	1.0

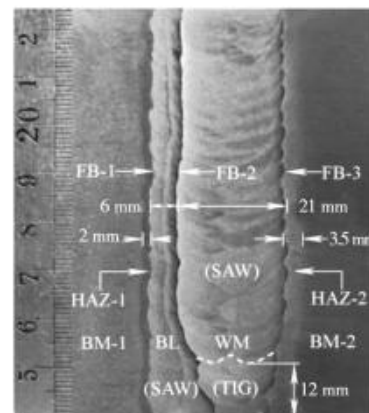
表3 NG-SAW 焊接工艺参数
Tab. 3 NG-SAW welding process parameters

焊接 电流/A	电弧 电压/V	焊接速度 /(mm·s ⁻¹)	预热 温度/℃	层间 温度/℃	焊丝 直径/mm
410~450	26~28	8~9	200	200~250	3.0

(NiCrMoV) 异种焊接转子时效后是否产生脆性进行研究, 接头采用窄间隙坡口、氩弧焊打底和深窄间隙埋弧焊方法及2%Ni专用焊丝, 多层多道焊接而成。研究表明: M₃C碳化物沿晶界析出、溶质原子N在晶界偏聚和时效过程中残余奥氏体的热失稳分解是导致NiCrMoV钢异种接头时效后性能下降的主要原因。Ding等^[49]采用NG-SAW法及钨极惰性气体(TIG)覆盖+NG-SAW法两种技术制备了9% Cr和CrMoV异种焊接接头。研究发现, 碳迁移仅在使用NG-SAW方法时出现在试样中, 通过在NG-SAW前添加TIG覆盖层可以有效防止碳迁移。NG-SAW中的碳迁移是由于强碳化物形成元素Cr在焊缝和基体金属之间存在浓度突变引起的, 应用TIG覆盖层可以促进Cr元素的扩散, 从而使其浓度梯度大幅减小, 也就是说, 可以在SAW焊缝、TIG覆盖层和基体金属之间形成一个平缓的Cr元素过渡区, 有效防止碳迁移, 从而降低熔合线附近的碳浓度。因此, 选择合适的焊接技术和填充金属以防止9% Cr/CrMoV异种焊接接头中的碳迁移至关重要。Li等^[50]采用TIG焊接方法研究了焊接电流对G115/CB2焊接接



(a) 焊接转子模拟件示意图



(b) 焊接接头宏观形貌

图2 模拟焊接汽轮机转子件与接头宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic morphology of simulated welded turbine rotor components and joints

头显微组织和拉伸性能的影响,随着电流从130 A增加到150 A,室温和650 °C下接头抗拉强度均有所提高,拉应力分别为673 MPa和309 MPa,而进一步增加电流时强度没有明显变化。130 A和150 A条件下,接头的室温断裂模式分别为解理断裂和韧性断裂,150 A下接头高温断裂面由深且小的韧窝组成。聂甫恒等^[51]利用氩弧焊将转子用4762高温合金与耐热钢(12Cr钢)进行了异种焊接,该焊接接头的室温抗拉强度可达到827 MPa,显微硬度范围为HV218~371,硬度最小值出现在焊缝顶层位置,最大值出现在4762高温合金一侧的热影响区。较小的焊接热输入及严格限制层间温度,能够降低熔合区及部分熔融区形成液化裂纹的趋势。Wiednig等^[52]研究了A625镍基合金与9%铬钢CB2电子束焊接(EBW)接头的蠕变行为。结果表明:与传统焊接技术相比,对A625/CB2钢进行电子束焊接是可能实现的,并且在前期准备、焊接时间和后处理方面具有优势。与焊条电弧焊(SMAW)相比,EBW焊缝的热影响区更窄。在热影响区中发现沿相变边界(PAGB)分布的圆形小晶粒,其容易引发蠕变损伤。EBW和SMAW试样FL(熔池边界)附近均存在 δ -铁素体,且前者 δ -铁素体区域的宽度小于后者的一半。EBW接头在靠近FL的富 δ -铁素体区域没有出现蠕变破裂。EBW接头在625 °C下暴露时,断裂温度低于150 MPa,在距离熔合线约450~650 μm 处可观察到沿原奥氏体晶界的细晶粒。EBW试样的蠕变断裂时间高于熔化极气体保护焊(GMAW)试样。电子束焊接接头的性能及其显微组织特性远优于传统电弧焊工艺。蔡雄军等^[53]采用埋弧焊(SAW)堆焊过渡层,

通过窄间隙钨极氩弧焊和窄间隙埋弧焊组合焊接方法将28CrMoNiV(BM-1)和25Cr2Ni4MoV(BM-2)进行连接以满足汽轮机转子工况的需求。图3为焊接接头示意图,研究表明:焊缝区域的抗拉强度低于两种母材,断裂位置位于复合层,复合层为焊缝最薄弱环节;焊缝区域最低显微硬度值出现在复合层,其均值为HV236,最高出现在HAZ-2,其均值为HV375;在-40 °C、0 °C和40 °C条件下,焊缝区域韧性依次为BM-2>HAZ-1>HAZ-2>SAW焊缝>BM-1,韧性最低位置位于28CrMoNiV和埋弧焊焊缝处。

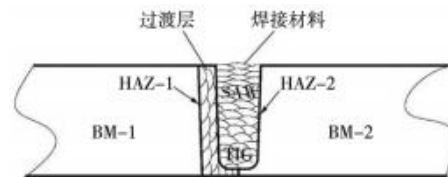


图3 焊接接头示意图

Fig. 3 Schematic diagram of welding joint

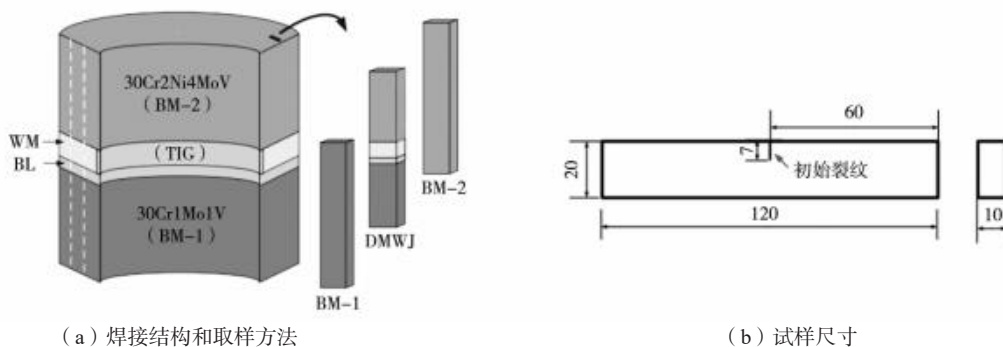
此外,润滑层技术也应用于蒸汽轮机转子的异种金属焊接接头(DMWJ)中,其有助于减少残余应力,控制碳扩散,并获得与未使用润滑层的焊缝相当的疲劳性能^[11, 54-57]。Wang等^[58-62]采用堆焊隔离层对汽轮机转子异种焊接接头断裂韧性进行研究,通过多层多道埋弧焊和钨极惰性气体保护焊制备30Cr1Mo1V和30Cr2Ni4MoV焊接接头,基体金属和填充焊丝化学成分见表4^[58],焊接结构、取样方法和疲劳试验试样尺寸见图4^[58]。焊缝区表现出循环软化特性,在低周疲劳测试后,显微组织演变为胞状结构,焊缝区的疲劳裂

表4 基体金属和填充焊丝化学成分

Tab. 4 Chemical compositions of the base metal and filler weld wire

 $w_B/\%$

材料	C	Mn	Ni	Cr	Mo	V
30Cr1Mo1V	0.25~0.36	0.66~1.04	≤ 0.53	1.00~1.40	0.98~1.32	0.20~0.30
30Cr2Ni4MoV	≤ 0.37	0.17~0.43	3.18~3.82	1.45~2.05	0.22~0.62	0.06~0.16
隔离层及焊缝金属丝	≤ 0.10	1.30~2.25	2.00~2.80	≤ 0.08	0.30~0.80	—



(a) 焊接结构和取样方法

(b) 试样尺寸

图4 焊接结构、取样方法和试样尺寸

Fig. 4 Welding structure, sampling method, and sample size

纹主要通过粗碳化物扩展。由于铁素体层和强度不匹配,堆焊隔离层附近界面是DMWJ中最薄弱的环节。对于大厚度转子材料的焊接,多层多道电弧焊工艺通常高效且质量稳定^[58]。

Wang等^[63]还采用多道堆焊技术制造得到30Cr1Mo1V和30Cr2Ni4MoV异种金属焊接接头,研究发现焊缝区域的显微组织与焊后热处理(PWHT)有关,而热影响区中的显微组织变化则与焊接热流有关;在边界区域,显微组织变化与铬、钼含量及碳迁移有关。异种金属焊接接头的复杂显微组织是导致局部力学性能不均匀的主要因素,因此获得准确有效的局部力学性能可以提高整体性能。

近年来,三菱重工株式会社(MHI)^[11]通过开发钨极电弧焊方法,实现了12% Cr钢与低合金钢(NiCrMoV钢)异种焊接转子的制造。这项技术的发展使得高温下高强度、高韧性可靠转子的制造成为可能^[64]。东芝^[65]改良了12% Cr钢和CrMoV钢的异种焊接技术,采用窄间隙热丝TIG焊接方法,开发了对应大容量、高温化汽轮机的焊接转子,测量了焊接后转子材料在常温和高温下的旋转摆动量,并评估了轴中心位置的变化。结果表明:在610℃的高温下,轴心位置与常温相比最大变化为0.008 mm,满足与整体锻造转子相同的参考值;转子轴向振动值远低于允许值,振动稳定;运行后焊缝超声波探伤结果表明其与生产时相比无变化。为了满足近年来汽轮机高温、大容量、短交货期的市场需求,在开发焊接工艺、评估接头强度、验证实际尺寸后,该焊接转子在日本三川发电厂进行了运行验证,确认了转子的可靠性,未来将逐渐实现12% Cr钢异种材料焊接转子的实际应用,并将其应用于下一代A-USC转子。

综上,不同化学成分汽轮机转子焊接导致的显微组织变化,是影响异种金属焊接接头断裂韧性的微观因素。因此,要开发能够满足较高蒸汽参数的异种焊接转子必须首先选择合理的焊接工艺,其次要制定科学的焊后热处理工艺规范。同时在使用前需对汽轮机转子各区域断裂韧性进行系统评估,建立焊接接头微区显微组织与断裂韧性的关联机制,这对确保异种焊接转子的使用性能具有决定性作用。

2.3 叶片修复

叶片是汽轮机最重要的部件之一,服役时会受到高温高压蒸汽的影响,同时要承受较大的弯矩,高速运转叶片还要承受高离心力,特别是叶片末级,要经受电化学腐蚀、水滴冲蚀及复杂的激振力^[66-68]。随着我国电站汽轮机大容量化,确保叶片的安全可靠性和高

效率显得愈发重要。即使叶片发生轻微损伤,对汽轮机和整台火电机组的热经济性和安全性的影响也不容忽视^[69-70]。

已有研究表明,采用焊接工艺可以有效消除汽轮机叶片水蚀缺陷^[71-73]。马氏体不锈钢含9%~12%铬,其在高温下具有良好的蠕变和耐腐蚀性能以及出色的加工性,被广泛用于制造汽轮机部件^[74-76]。对于汽轮机叶片非关键受力部位缺陷的控制,国内开始采用Ni基焊材及免做焊后热处理的异种钢焊接工艺^[77-79]。任延明等^[80]研究利用焊接修复消除汽轮机低压叶片存在的水蚀缺陷,采用Ni基焊材进行异种钢焊接。结果表明:焊态异种钢接头的抗拉强度可以达到20Cr13钢母材的90%以上;焊缝和熔合线附近的热影响区中晶粒严重粗化,韧性降低,热影响区脆化,成为此接头的薄弱部位;采用多层多道焊接工艺并补加焊接回火焊道可改善20Cr13钢热影响区的性能。谢龙等^[81]利用TIG焊和手工电弧焊对汽轮机静叶环1Cr13钢与Q235A钢进行异种焊接,TIG焊作为焊接收弧弧坑的补焊来防止弧坑处下凹。结果显示1Cr13钢与Q235A钢焊接成形良好,焊接接头焊后检验和机加工结束后的入库检验未发现缺陷。Guo等^[82]评估了Stellite6异种合金层对低压末级叶片水蚀区域的影响。结果表明,虽然熔覆叶片经过应力消除热处理,但Stellite6层中的残余拉应力为200~300 MPa,基体中的残余压应力为100~150 MPa。由于熔覆层与衬底之间的微观结构和性能不匹配,Stellite6合金层和基体界面处存在很大的残余应力梯度。在叶片的凹面上增加熔覆道次,可将另一侧熔覆层的峰值拉应力增加至374 MPa,但会显著降低Stellite6合金层和基体界面处的残余应力梯度,这说明增加熔覆层有利于提高叶片使用安全性。Garcia-Garcia等^[83]研究了焊接膨胀收缩现象以及12Cr-1Mo钢带-叶片组件密封焊接中的残余应力分布。结果表明,由装配温度梯度产生的横向残余应力的复杂分布是焊接过程中发生膨胀收缩现象的原因;12Cr-1Mo钢相变引起的体积膨胀是一个局部现象;热机械模型计算结果与试验结果具有良好的一致性。

综上所述,异种焊接修复技术比整体再制造叶片零部件要经济得多,并且还能提高使用性能,降低成本。因此,采用焊接方法修复因高温高压蒸汽作用及高速运转而损坏的汽轮机叶片具有新的意义,随着焊接技术的不断提升,修复后的汽轮机叶片使用寿命在许多情况下已接近甚至超过新产品。

3 结束语

620℃及以上等级超(超)临界汽轮机技术是

当前最具广阔发展前景的洁净发电技术之一。我国目前掌握的620℃超（超）临界汽轮机FB2高/中压异种转子焊接制造技术，对于我国能源装备发展及产业链升级，进而保障国家能源安全具有深远意义。但与欧美等发达国家和地区相比，目前我国超（超）临界机组的关键材料或部件几乎完全依赖进口，现阶段国内对超（超）临界机组所需焊接工艺和服役特性的研究经

验尚不足，为保证超（超）临界汽轮机组的异种焊接质量和长期安全可靠运行，还需要进行大量的探索和实践。通过异种焊接技术能够开发出各具特点的汽轮机焊接结构，取长补短，为下一代高效、环保、长寿命的能源装备提供可靠连接解决方案。未来，生产能够承受高温高压的特殊材料及突破异种焊接技术壁垒是我国在超（超）临界技术领域的两大发展方向。

参考文献:

- [1] NOMOTO H, KUROKI Y, FUKUDA M, et al. Recent development of steam turbines with high steam temperatures [J]. JSME International Journal Series B: Fluids and Thermal Engineering, 2006, 49 (2): 218-223.
- [2] SUN Y J, LIU X Q, HU L S, et al. Online life estimation for steam turbine rotor [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26 (1): 272-279.
- [3] U.S. Energy Information Administration. International energy outlook 2013: with projections to 2040 [R/OL]. (2013-08-31) [2025-05-04]. <https://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo13/>.
- [4] NOWAK G, RUSIN A. Shape and operation optimisation of a supercritical steam turbine rotor [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 417-425.
- [5] HUO W H, LI J, YAN X. Effects of coolant flow rates on cooling performance of the intermediate pressure stages for an ultra-supercritical steam turbine [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62 (2): 723-731.
- [6] SORRENTINO S. Welding technologies for ultra-supercritical power plant materials [M]// GIANFRANCESCO A D. Materials for ultra-supercritical and advanced ultra-supercritical power plants. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017: 247-319.
- [7] 苗莉莉, 吴智泉, 崔玉舸, 等. 电站高中压导汽管异种钢焊接开裂失效分析 [J]. 焊接技术, 2017, 46 (10): 76-81.
- [8] 张坤, 蔡文河, 王智春, 等. T91/TP347H异种钢焊接接头性能分析 [J]. 华北电力技术, 2016 (8): 34-41.
- [9] LIU X G, MENG D N, WANG Y H, et al. Influences of high-temperature diffusion on the homogenization and high-temperature fracture behavior of 30Cr1Mo1V [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24 (2): 1079-1085.
- [10] MAGOSHI R, TANAKA Y, NAKANO T, et al. Development of welded rotors for high-temperature steam turbines [C]// Proceedings of the ASME 2005 Power Conference. Chicago, IL, USA, 2005: 617-623.
- [11] SHIGE T, MAGOSHI R, ITOU S, et al. Development of large-capacity highly efficient welded rotor for steam turbines [J]. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review, 2001, 38: 6-11.
- [12] MALEDI N, OLADIJO O P, BALOYI N, et al. Microstructure and mechanical properties of dissimilar metal weld joint between VM12-SHC and X20 martensitic steels [J]. Procedia Manufacturing, 2017, 7: 246-252.
- [13] WU Q J, LU F G, CUI H C, et al. Role of butter layer in low-cycle fatigue behavior of modified 9Cr and CrMoV dissimilar rotor welded joint [J]. Materials & Design, 2014, 59: 165-175.
- [14] RATHOD D W, PANDEY S, SINGH P K, et al. Experimental analysis of dissimilar metal weld joint: ferritic to austenitic stainless steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 639: 259-268.
- [15] 聂刚, 张超, 裕晓峰. 某大型汽轮机末级叶片裂纹焊接修复 [J]. 金属热处理, 2007, 32 (增刊1): 221-223.
- [16] 刘俊清. 超壁厚异种钢焊接工艺分析与研究 [J]. 焊接技术, 2014, 43 (8): 31-33.
- [17] VISWANATHAN R, HENRY J F, TANZOSH J, et al. US program on materials technology for ultra-supercritical coal power plants [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14 (3): 281-292.
- [18] ABE F. Research and development of heat-resistant materials for advanced USC power plants with steam temperatures of 700℃ and above [J]. Engineering, 2015, 1 (2): 211-224.
- [19] LEE J, HWANG J, BAE D. Welding residual stress analysis and fatigue strength assessment at elevated temperature for multi-pass dissimilar material weld between alloy 617 and P92 steel [J]. Metals and Materials International, 2018, 24 (4): 877-885.
- [20] HODIS Z, SOPOUŠEK J. Carbon and nitrogen activities of materials of weld joints [J]. Defect and Diffusion Forum, 2007, 263: 225-230.
- [21] MAGESHKUMAR K, VELMURUGAN P, RAJKUMAR S, et al. Alloy 617 welding of similar and dissimilar materials: a review [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 59: 1561-1565.
- [22] MOOSAVY H N, ABOUTALEBI M R, SEYEDEIN S H, et al. Microstructural, mechanical and weldability assessments of the dissimilar welds between γ' - and γ'' -strengthened nickel-base superalloys [J]. Materials Characterization, 2013, 82: 41-49.
- [23] FUKUDA M. Advanced USC technology development in Japan [M]// GIANFRANCESCO A D. Materials for ultra-supercritical and advanced ultra-supercritical power plants. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017: 733-754.
- [24] HOSSEINI H S, SHAMANIAN M, KERMANPUR A. Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310

- stainless steel dissimilar welds [J]. *Materials Characterization*, 2011, 62 (4) : 425–431.
- [25] GIANFRANCESCO A D. The fossil fuel power plants technology [M]// GIANFRANCESCO A D. *Materials for ultra-supercritical and advanced ultra-supercritical power plants*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017: 1–49.
- [26] ZHANG Y, LI K J, CAI Z P, et al. Creep rupture properties of dissimilar metal weld between Inconel 617B and modified 9% Cr martensitic steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 764: 138185.
- [27] GRONG Ø, SANDNES L, BERGH T, et al. An analytical framework for modelling intermetallic compound (IMC) formation and optimising bond strength in aluminium steel welds [J]. *Material Design & Processing Communications*, 2019, 1: 57.
- [28] 王强, 马宁博, 吴铁明. 汽轮机铸件异种材料的焊接工艺研究 [C]//中国机械工程学会. 2012中国铸造活动周论文集. 沈阳: 中国机械工程学会铸造分会, 2012: 136–141.
- [29] 赵健, 刘霞, 乔尚飞, 等. 百万级核电汽轮机高压外缸汽封接管焊接工艺的研究 [J]. *热力透平*, 2012, 41 (1) : 76–78.
- [30] 付强, 党丽丽, 刘宝贵. 1Cr9Mo1VNbN钢异种钢焊接 [J]. *机械工程师*, 2009 (9) : 150–151.
- [31] BAUMGARTNER S, SCHULER M, HOLY A, et al. Dissimilar welding of the creep resistant steels CB2 and P92 with flux cored wires [J]. *Welding in the World*, 2015, 59 (5) : 655–665.
- [32] ABE F. Creep rates and strengthening mechanisms in tungsten-strengthened 9Cr steels [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 319: 770–773.
- [33] MOHYLA P, KUBON Z, CEP R, et al. Evaluation of creep properties of steel P92 and its welded joint [J]. *Metallurgija*, 2014, 53 (2) : 175–178.
- [34] PANDEY C, MAHAPATRA M M, KUMAR P, et al. Some studies on P91 steel and their weldments [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 743: 332–364.
- [35] VAILLANT J C, VANDENBERGHE B, HAHN B, et al. T/P23, 24, 911 and 92: new grades for advanced coal-fired power plants—properties and experience [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 85 (1–2) : 38–46.
- [36] YAN W, WANG W, SHAN Y Y, et al. Microstructural stability of 9–12% Cr ferrite/martensite heat-resistant steels [J]. *Frontiers of Materials Science*, 2013, 7 (1) : 1–27.
- [37] KUMAR A, PANDEY S M, PANDEY C. Dissimilar weldments of ferritic/martensitic grade P92 steel and Inconel 617 alloy: role of groove geometry on mechanical properties and residual stresses [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2022, 23 (1) : 54.
- [38] KUMAR A, PANDEY C. Creep rupture and microstructural analysis of dissimilar welded joints of P92 steel and alloy 617 [J]. *Welding International*, 2025, 39 (1) : 23–31.
- [39] KHAN M A, CHELLAGANESH D, UTHAYAKUMAR M, et al. Electrochemical behaviour and surface studies on austenitic stainless steel and nickel-based superalloy dissimilar weld joints [M]// GUPTA K. *Materials forming, machining and post processing*. Cham: Springer International Publishing, 2019: 251–266.
- [40] BHADURI A K. Development and deployment of welding technologies for the indian sodium-cooled fast reactor and advanced ultra-supercritical thermal power programmes [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2021, 74 (5) : 1035–1053.
- [41] 杨根盛, 李忠, 杨定华, 等. 700 °C先进超超临界发电技术的开发与进展 [J]. *锅炉制造*, 2013 (4) : 1–4.
- [42] 郑亮亮, 杨林, 熊建坤, 等. 高参数汽轮机材料焊接裂纹的形成机理与控制 [J]. *材料导报*, 2018, 32 (增刊1) : 329–331.
- [43] LIU X, LU F G, YANG R J, et al. Investigation on mechanical properties of 9%Cr/CrMoV dissimilar steels welded joint [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24 (4) : 1434–1440.
- [44] LU F G, LIU P, JI H J, et al. Dramatically enhanced impact toughness in welded 10%Cr rotor steel by high temperature post-weld heat treatment [J]. *Materials Characterization*, 2014, 92: 149–158.
- [45] DUAN C F, MIZUMI S, TABATA S, et al. Patent issued for stationary blade and steam turbine: US2023167746A1 [P]. 2023-06-01.
- [46] DAVID S A, SIEFERT J A, FENG Z. Welding and weldability of candidate ferritic alloys for future advanced ultrasupercritical fossil power plants [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, 18 (8) : 631–651.
- [47] 朱波, 王文科, 郭洋, 等. 12Cr/30Cr2Ni4MoV异种转子钢焊接接头微区冲击韧性研究 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57 (2) : 53–61.
- [48] 郑琦亚, 唐新华, 刘霞, 等. 长时效后的NiCrMoV异种钢接头焊缝性能和组织的研究 [J]. *热加工工艺*, 2012, 41 (3) : 25–27.
- [49] DING K, JI H J, LIU X, et al. Prevention of carbon migration in 9% Cr/CrMoV dissimilar welded joint by adding tungsten inert gas overlaying layer [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2018, 25 (8) : 847–853.
- [50] LI T, YUAN X J, LI R, et al. Microstructure and mechanical characteristics of dissimilar TIG welded 9% Cr heat-resistant steels joints [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2021, 22 (6) : 1007–1019.
- [51] 聂甫恒, 熊建坤, 杨林, 等. 汽轮机转子用镍基合金/耐热钢异种焊接接头组织及性能研究 [J]. *东方汽轮机*, 2022 (1) : 33–38.
- [52] WIEDNIG C, PLESITSCHNIG E, MITSCHE S, et al. Dissimilar electron beam welds of nickel base alloy A625 with a 9% Cr-steel for high temperature applications [J]. *Materials Science Forum*, 2016, 879 (3) : 2100–2106.
- [53] 蔡雄军, 冷进明, 熊建坤. 28CrMoNiV与25Cr2Ni4MoV异种转子钢焊接接头性能研究 [J]. *电焊机*, 2018, 48 (8) : 114–120.
- [54] 谭龙, 张从平, 张建勋. 焊接转子窄间隙焊接接头冲击韧性数值研究 [J]. *焊管*, 2013, 36 (9) : 5–10.

- [55] 林腾昌, 王慧, 王成杰, 等. 超临界高中压转子用12%Cr钢的研究现状 [J]. 铸造技术, 2012, 33 (11): 1267-1269.
- [56] ZHANG C G, LU P M, HU X Z. Residual stress and softening in welded high-strength low-alloy steel with a buffering layer [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214 (2): 229-237.
- [57] ZHANG C G, LU P M, HU X Z, et al. Effect of buffer layer and notch location on fatigue behavior in welded high-strength low-alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (10): 2091-2101.
- [58] WANG W K, GUO Y, LI Y B, et al. Fracture toughness of different region materials from a dissimilar metal welded joint in steam turbine rotor [J]. Coatings, 2022, 12 (2): 174-174.
- [59] WANG W K, ZHANG J X, ZHONG J. Comparative evaluation of LCF behavior of dissimilar steels and welds in an ultra-supercritical turbine rotor at 280 °C [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 39: 105771.
- [60] WANG W K, LIU Y, GUO Y, et al. High cycle fatigue and fracture behaviors of CrMoV/NiCrMoV dissimilar rotor welded joint at 280 °C [J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 786: 139473.
- [61] WANG W K, XU Z Z, ZHU B, et al. High cycle fatigue behavior of a dissimilar metal welded joint in ultra-supercritical steam turbine rotor [J]. Materials Research Express, 2020, 7 (1): 016565.
- [62] LONG J, ZHANG L J, ZHANG Q B, et al. Microstructural characteristics and low cycle fatigue properties at 230 °C of different weld zone materials from a 100 mm thick dissimilar weld of ultra-supercritical rotor steel [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 130: 105248.
- [63] WANG W K, LIU Y, ZHANG Q B, et al. Microstructure and local mechanical properties of a dissimilar metal welded joint with buttering layer in steam turbine rotor [J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 747: 244-254.
- [64] KROJER S, ROOS E, KLENK A, et al. Mechanical behavior of dissimilar welds for steam turbine rotors with high application temperature [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137 (3): 032511.
- [65] SATORU A, KAZUHIRO S, ITARU M. Dissimilar welded rotors for large-capacity high-temperature steam turbines [J]. Toshiba Leading Innovation. 2010, 65 (8): 12-15.
- [66] WU H T, AN T C, SUN B H, et al. Research and engineering application of DED laser cladding repair for steam turbine XM-25 alloy LP blades [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2025, 39 (10): 1559-1578.
- [67] KUSHWAHA A D, SONI A, GAREWAL L. Critical review paper of steam turbine blades corrosion and its solutions [J]. International Journal of Scientific Research and Engineering Trends, 2014, 3 (4): 776-784.
- [68] RANI P, AGRAWAL A K. Failure analysis of a low-pressure stage steam turbine blade [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2023, 38 (4): 668-682.
- [69] ALBERT S K, RAMASUBBU V, DAS C R, et al. Experience in in-situ repair welding of steam turbine shrouds and blades [J]. Power Plant: Operation, Maintenance and Materials Issues, 2003, 2 (2): 1-13.
- [70] ORSA Y V, NESTERENKOV V M, ZAGORNIKOV V I, et al. Use of electron beam welding for manufacture of blade packages for cogeneration steam turbines [J]. Prevention of Cold Cracking in Armour Steel Welding, 2023: 29-34.
- [71] 施红辉, 俞茂铮, 蔡颀年. 汽轮机低压级动叶片的水蚀机理及水蚀准则 [J]. 热力发电, 1990 (4): 29-34.
- [72] 李太江, 刘庆伏, 李巍, 等. 汽轮机动叶片水蚀防护技术研究及应用 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (16): 109-113.
- [73] 李巍, 李太江, 王绍东, 等. 汽轮机末级动叶片水蚀损伤修复与防护试验研究 [J]. 热力发电, 2011, 40 (1): 40-44.
- [74] LIN Y C, CHEN S C. Effect of residual stress on thermal fatigue in a type 420 martensitic stainless steel weldment [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 138 (1): 22-27.
- [75] CAI G J, ANDRÉN H O, SVENSSON L E. Effect of cooling after welding on microstructure and mechanical properties of 12 Pct Cr steel weld metals [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1997, 28 (7): 1417-1428.
- [76] WOOLLIN P, CARROUGE D. Heat affected zone microstructures in supermartensitic stainless steels [C]// Conference on Super martensitic Stainless Steels. Bruxelles, Belgique, 2002.
- [77] 宋宏亮, 池俊峰. 100 MW机组低压转子末级叶片焊接 [J]. 华北电力技术, 2008 (10): 49-51.
- [78] 聂刚, 张超, 裕晓峰. 某大型汽轮机末级叶片裂纹焊接修复 [J]. 金属热处理, 2007 (增刊1): 221-223.
- [79] 葛兆祥, 石学军, 李夕强, 等. 300 MW汽轮机低压末级叶片水蚀整级焊接修复 [J]. 江苏电机工程, 2002 (6): 38-40.
- [80] 任延明, 刘福广, 李太江, 等. 汽轮机低压叶片用20Cr13马氏体钢异种钢接头的组织性能分析 [J]. 热力发电, 2014, 43 (5): 75-78.
- [81] 谢龙, 董太宁, 朱致挺. 汽轮机静叶环1Cr13与Q235A焊接工艺技术 [C]// 中国动力工程学会透平专业委员会. 中国动力工程学会透平专业委员会2013年学术研讨会论文集. 青岛: 中国动力工程学会透平专业委员会, 2013: 197-200.
- [82] GUO Y, WANG Z Y, LIU Y, et al. Study on residual stress distribution in stellite-6 cladding layers on 420 steel steam turbine blades [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33 (17): 9214-9225.
- [83] GARCÍA-GARCÍA V, CAMACHO-ARRIAGA J C, REYES-CALDERÓN F, et al. Fluid structure interaction modeling of expansion-contraction deformation during welding in a spacer-band-blade assembly of a HP steam turbine diaphragm [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 33: 203-218.

Research and Application of Key Technologies for Heterogeneous Welding in Steam Turbines

SONG Zhi-jun¹, YAN Zheng-jun¹, ZHANG Lei¹, ZHANG Qiang², ZHANG Da³

(1. Guoneng Zhongwei Thermal Power Co., Ltd., Zhongwei 755099, Ningxia, China; 2. Harbin Turbine Co., Ltd., Harbin 150090, Heilongjiang, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154000, Heilongjiang, China)

Abstract:

For components such as rotors in 620 °C and higher-grade ultra-supercritical steam turbines, heterogeneous welding is primarily employed for connections. However, due to differences in the chemical compositions between dissimilar metals, there are significant variations in welding performances, which can lead to defects like cracks. Given the critical role of steam turbines in coal-fired power units, heterogeneous welding technology has become one of the key factors constraining the rapid development of coal-fired steam turbine units. As China accelerates its transition from traditional industrialization to a green and ecologically sustainable development model, improving the energy conversion efficiency of steam turbine units has emerged as one of the most important approaches. Particularly, rapid advancements in heterogeneous welding technology have ushered in new development opportunities for the promotion and application of ultra-supercritical steam turbine units in China. This paper provides an overview of the welding technology and current status of dissimilar components in steam turbines, analyzing the advantages, disadvantages, applications, and development trends of heterogeneous welding. By summarizing and prospecting the heterogeneous welding technologies for key advanced high-temperature components of steam turbines, it deepens the understanding of structural evolution and performance variation rules in dissimilar materials, thereby promoting the development of heterogeneous welding techniques for steam turbine components.

Key words:

steam turbine; heterogeneous welding; ultra-supercritical; coal-fired power generation unit
