doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2026.03.007

安全分析

1 000 MW超超临界机组高压旁路阀减温水喷嘴焊缝开裂失效机理与设计优化

殷兆广[1],董　勤[1],徐以伟[1],赵炜炜[2,3],王云庆[1],顾　渊[1],陈秉怡[2,3],
崔益民[2,3],赵宁宁[2,3],闾川阳[4]

(1.浙江浙能中煤舟山煤电有限责任公司,浙江舟山 316135;2.浙江浙能技术研究院有限公司,杭州 311121;3.浙江省火力发电高效节能与污染物控制技术研究重点实验室,杭州 311121;4.浙江工业大学 化工机械设计研究所,杭州 310023)

摘　要:针对某1 000 MW超超临界机组高压旁路阀减温水喷嘴角焊缝频繁开裂问题,通过金相组织分析、显微硬度测试等理化检验手段,并结合有限元数值模拟技术,揭示了焊缝失效机理并提出结构优化方案。结果表明,减温水进水管与喷嘴之间焊缝的硬度偏高,以及结构约束引发的低周应变疲劳,两种因素相互叠加,共同促使角焊缝裂纹快速萌生与扩展,进而导致减温水管出现泄漏现象。通过加长减温水立管以增强管道柔性的优化方案,有限元分析显示立管长度增至380 mm时,角焊缝处应力显著降至65 MPa,有效避免了应力集中。研究结果可为同类高压旁路阀结构设计与安全运行提供参考。

关键词:超超临界机组;高压旁路阀门;失效分析;有限元分析;应力计算

中图分类号:TH137.52;TG111.91;TH123　　**文献标志码:**A

Cracking failure mechanism and design optimization of the desuperheating water spray nozzle weld of a high-pressure bypass valve in a 1 000 MW ultra-supercritical unit

YIN Zhaoguang[1],DONG Qin[1],XU Yiwei[1],ZHAO Weiwei[2,3],WANG Yunqing[1],GU Yuan[1],
CHEN Bingyi[2,3],CUI Yimin[2,3],ZHAO Ningning[2,3],LÜ Chuanyang[4]

(1.Zhejiang Zheneng Zhongmei Zhoushan Coal & Electricity Co.,Ltd.,Zhoushan 316135,China;
2.Zhejiang Energy Technology Research Institute Co.,Ltd.,Hangzhou 311121,China;
3.Zhejiang Key Laboratory of Thermal Power Generation Energy Efficiency and Pollutant Control Technology,Hangzhou 311121,China;
4.Institute of Process Equipment and Control Engineering,Zhejiang University of Technology,Hangzhou 310023,China)

Abstract: To address the issue of frequent cracking in the weld of the desuperheating water spray nozzle of a high-pressure bypass valve in a 1 000 MW ultra-supercritical unit,the failure mechanism of the weld was revealed and a structural optimization scheme was proposed by means of metallographic structure analysis,microhardness testing,and other physical and chemical inspection methods combined with finite element numerical simulation technology.The results show that the high hardness of the weld between the desuperheating water inlet pipe and the nozzle,together with the low-cycle strain fatigue induced by structural constraints,mutually superimposed to promote the rapid initiation and propagation of cracks in the fillet weld,thereby leading to leakage of the desuperheating water pipe.For the optimization scheme of lengthening the vertical desuperheating water pipe to enhance pipeline flexibility,finite element analysis shows that when the vertical pipe length is increased to 380 mm,the stress at the fillet weld significantly decreases to 65 MPa,effectively avoiding stress concentration.The research results can provide reference for the structural design and safe operation of similar high-pressure bypass valves.

Key words:ultra-supercritical unit;high-pressure bypass valves;failure anasysis;finite element analysis;stress calculation

收稿日期:2025-05-14　**修回日期:**2026-02-26

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52105162);浙能集团科技项目(ZNKJ-2024-027)

0 引言

火电机组作为我国能源安全供应的“压舱石”，在当前能源转型关键期仍发挥着不可替代的支柱作用，其稳定可靠的基荷特性，可有效弥补风电、光伏等间歇性电源的出力波动，因此，火电机组的安全、稳定、可靠运行，对能源安全供应起到了至关重要的支撑作用[1-2]。在新一代煤电升级大背景下[3]，对火电机组提出了更高的安全要求。机组的深度调峰及减温水的频繁投用，使承压设备处于更为复杂的应力状态，因此对其承压能力提出了更高的要求。

某1 000 MW机组高压旁路系统是蒸汽旁通汽轮机高压缸，经高压旁路阀门（以下简称高旁阀）减压、减温后直接引入高压缸排汽管道的汽轮机旁路系统。减温水取自给水泵，经高温旁路阀减温器降温后流向低温再热蒸汽管道，实现减温、减压。在机组深度调峰至30%负荷以下时，高旁阀用于灵活调节主汽压力，适应负荷快速变化，因此，其结构设计薄弱位置易造成应力集中，从而产生裂纹，甚至泄漏，造成机组非计划停机。

角焊缝广泛应用于压力容器、建筑钢结构、管道系统及各类机械设备中，某1 000 MW机组高旁阀减温水管角焊缝为承插式结构。近年来，有关角焊缝开裂的报道屡见不鲜[4-10]，角焊缝开裂的复杂性在于其形成原因多样，既可能源于焊接工艺不当导致的冶金缺陷，也可能由服役环境中的交变应力或腐蚀因素共同作用诱发。闻家欢[11]研究认为，管接座角焊缝失效原因为阀门承插焊缝未焊透而导致应力集中，从而产生疲劳裂纹。服役工况对角焊缝的安全性也具有重要的影响，热循环和温度梯度在锅炉等设备中是导致角焊缝开裂的重要因素。频繁的温度变化会产生热应力，导致超超临界锅炉水冷壁吹灰器密封盒角焊缝最先开裂[12]。WADA等[13]针对高热输入埋弧焊箱形柱角接头的热影响区（HAZ）开裂问题展开研究，结合焊缝微观结构、氢浓度和开裂位置残余应力分析得出，裂纹的产生与扩展和裂纹位置处氢浓度的变化密切相关，而残余应力对裂纹的影响较小。姜运建等[14]利用Abaqus软件计算了不同角焊缝型式的应力，发现开坡口全焊透的角接头筒体内壁所受应力最小，对于分析结构应力及结构型式优化具有重要的指导意义。BADRKHANI AJAEI等[15]通过有限元建模和微观裂纹萌生模型，验证了加强角焊缝对延缓局部熔透焊缝根部开裂的有效性，研究结果表明，增大角焊缝尺寸可将裂纹起始位置从焊缝根部转移至法兰，显著提升抗裂性能。

某1 000 MW机组在启动过程中，其高旁阀减温水喷嘴角焊缝多次发生裂纹而泄漏，且泄漏往往发生在机组启机并网阶段，即高旁阀开启减温水投用时。减温水管开裂、泄漏，不仅会降低高旁阀减温能力，而且严重影响机组的安全稳定运行。在深度调峰背景下，基于高旁阀角焊缝的有限元应力计算评估，对高旁阀进行结构优化，目前还缺乏相关研究。因此，有必要对高旁阀减温水喷嘴开裂原因及预防措施开展研究，以消除减温器失效的安全隐患，增强减温器与高压旁路系统的整体运行安全性与可靠性。本文利用有限元应力计算方法，对角焊缝的应力水平进行评估，结合材料理化分析方法，分析角焊缝开裂原因，并提出针对性结构设计改进方案，为同类型设备改进提供参考。

1 材料与方法

1.1 材质分析

采用VANTA-VCA/840463半定量光谱仪对高旁阀减温水管进行了成分测试，结果如表1所示。高旁阀角焊缝、插入管及喷嘴材料均为P22钢，其主要元素含量满足GB/T 5310—2023《高压锅炉用无缝钢管》要求。

表1 高旁阀角焊缝、插入管及喷嘴材料P22化学成分

Tab.1 Chemical composition of P22 material for high-pressure bypass valve fillet weld, insert pipe and nozzle

%

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo
角焊缝	—	0.302	0.634	2.262	0.955
插入管	—	0.308	0.506	2.119	0.921
喷嘴	—	0.108	0.464	2.100	0.926
P22标准值	0.08~0.15	≤0.5	0.4~0.6	2.0~2.5	0.9~1.13

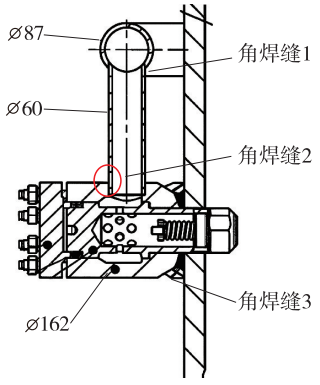
1.2 宏观形貌分析

图1为某1 000MW高旁阀照片。该高旁阀减温水由环向管进水后，经垂直进水立管的7个喷嘴进入高旁阀。减温水立管、喷嘴及环向管之间连接位置为3道角焊缝。进水管规格为∅87 mm×7.5 mm和∅60 mm×6 mm，喷嘴规格为∅162 mm×30 mm，立管长度约180 mm，其材料均为P22钢。

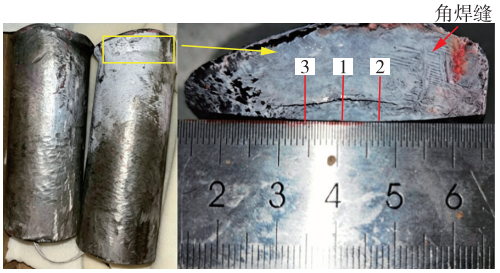
在机组启动过程中，发现角焊缝2频繁发生泄漏，严重影响了机组运行安全稳定性。利用机组检修时间，将泄漏的减温水立管取出，进行理化检验，以分析其裂纹产生原因。沿图1(c)中位置1纵向剖开，可见裂纹垂直于管壁从外往里扩展，深度约5 mm〔见图1(d)〕，裂纹近乎贯穿壁厚。图1(e)为图1(c)中位置2纵剖面裂纹照片，裂纹表面长度约3 mm，裂纹呈约45°从外往里扩展。



(a)高旁阀结构



(b)减温水喷嘴角焊缝位置示意



(c)减温水立管取样



(d)位置1局部纵剖图



(e)位置2局部纵剖图

图1 高旁阀及减温器结构

Fig.1 Structure of high-pressure bypass valve and desuperheater

1.3 显微组织与力学性能

利用金相试样切割机将高旁阀减温水进水立管沿1(c)中位置1，2，3纵向切开，同时将金相样品在300#~2000#金相砂纸上逐道次研磨，并用机械抛光后，用4%硝酸酒精溶液对金相样品进行浸蚀。制备好金相样品后，利用ZEISS Axio型金相显微镜观察高旁阀减温水管角焊缝的金相组织。为研究其断裂机理，将减温水进水立管断口用2 g柠檬酸+10 g柠檬酸铵+100 ml水溶液浸泡清洗后，用ZEISS SUPRA 55型扫描电镜观察断口形貌，加速电压20 kV，工作距离12 mm。利用FALCON 511型维氏硬度计对角焊缝裂纹附近区域进行了维氏硬度测试，测试力值为1 kg。

1.4 服役温度测量

在高旁阀减温段安装壁温测点后，对机组启动工况下高旁阀门减温段的壁温进行了测量，获得阀体减温段、环向进水管、立管和减温水喷嘴的壁温在启机过程中温度变化数据，如图2所示。可以看出，减温水管温度在高旁阀开启前温差相对稳定，而减温水投用时测点温度变化剧烈，阀体壁温快速上升，环形管、立管与喷嘴温度快速下降。在机组稳定运行阶段，减温水各个温度测点之间温度相差不大。

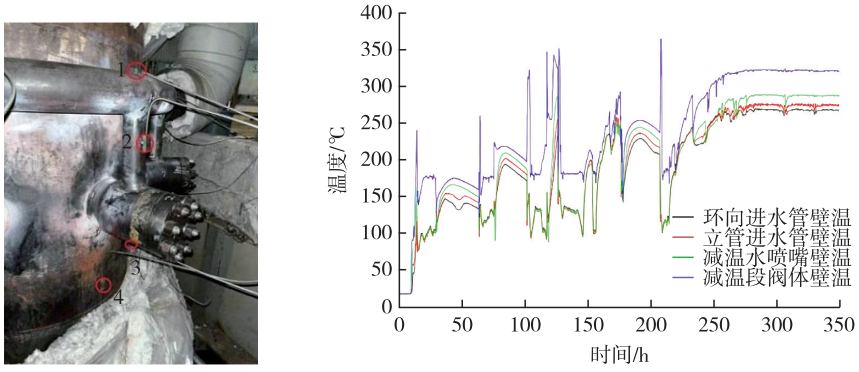
1.5 有限元应力计算

采用Ansys有限元分析软件对高旁阀减温段进行了建模和结构应力分析。环向进水管和喷嘴材料均为P22，相关力学性能和物理性能数据参照GB/T 5310—2023《高压锅炉用无缝钢管》、DL/T 5366—2014《发电厂汽水管道应力计算技术规程》。根据高旁阀运行工况，设置如下边界条件(见图3)。

(1)温度边界条件。采用Ansys瞬态热分析模型，计算高旁阀减温水投用时的温度场分布，温度边界条件采用第1.4节所述热电偶测量的减温阀体壁温和减温水管壁温。

(2)位移边界条件。根据高压旁路管道及支吊架布置情况，采用支撑约束模拟高旁阀下方刚性吊架约束。

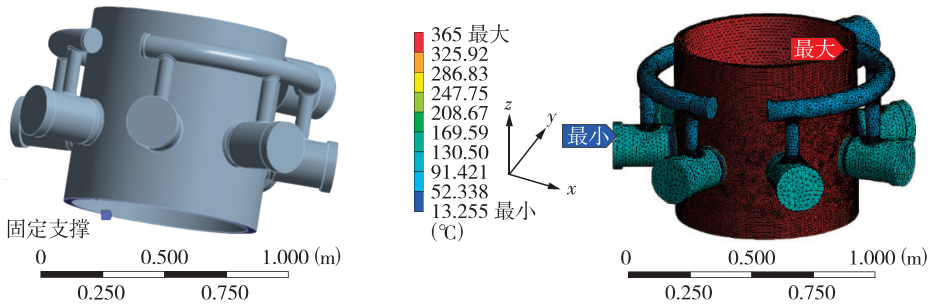
（3）载荷边界条件。根据减温水管道设计图中给出的减温水进口管口推力（+*X*：60 N；+*Y*：1 867 N；−*Z*：1 075 N），作为其载荷边界条件，并输入到有限元模型中，进行应力场计算；根据低温再热蒸汽管道设计压力（4.83 MPa）对高旁阀内壁施加应力，模拟管道受到的内压载荷。



（a）温度测点分布　　（b）机组启机过程中减温段壁温变化曲线

图2　高旁阀温度测点布置及启机阶段减温段壁温变化曲线

Fig.2　Temperature measuring point arrangement of high-pressure bypass valve and wall temperature variation curve of the desuperheating section during startup phase



（a）约束设置　　（b）温度场模拟结果

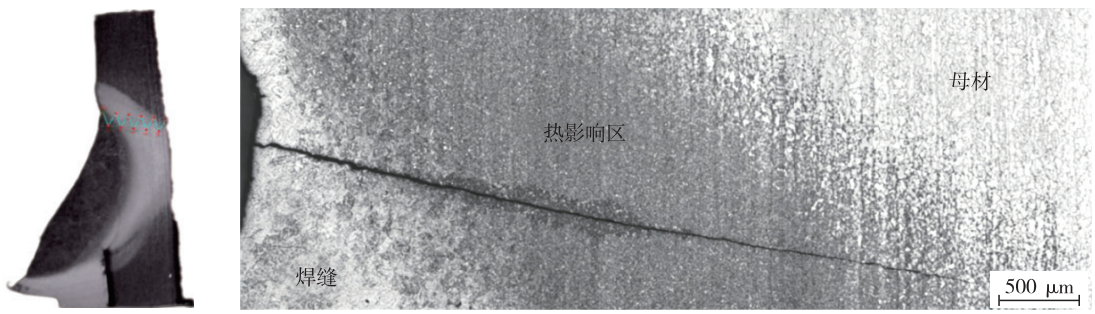
图3　高旁阀应力计算边界条件

Fig.3　Boundary conditions for stress calculation of high-pressure bypass valve

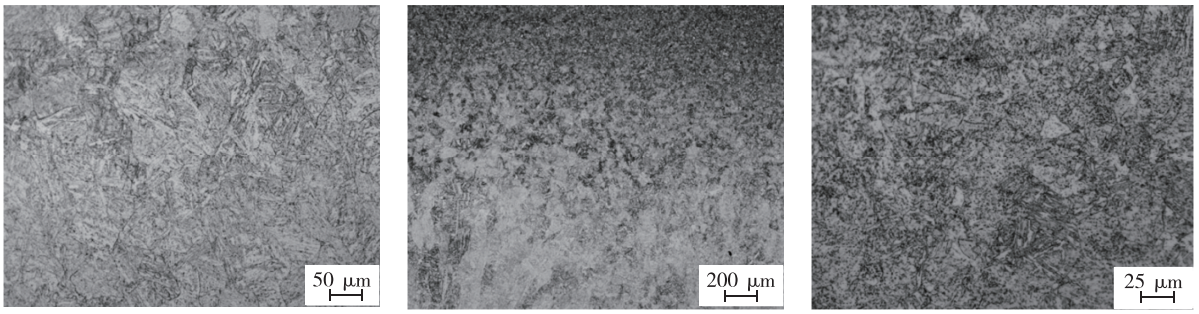
2　结果分析

2.1　金相组织与显微硬度分析

对图1（c）所示角焊缝位置1截面金相样品〔见图4（a）〕进行侵蚀后，其金相组织如图4（b）所示。裂纹从角焊缝与插入管焊趾起裂并笔直往里扩展，裂纹长约5 mm，裂纹呈现穿晶扩展特征，横穿焊缝、粗晶区、细晶区至不完全重结晶区。焊缝金相组织为贝氏体〔见图4（c）〕，熔合区金相组织为铁素体+粒状贝氏体+贝氏体〔见图4（d）〕，减温水管母材金相组织为铁素体+粒状贝氏体〔见图4（e）〕，近内壁区域有较明显脱碳痕迹。



（a）角焊缝金相样品　　（b）裂纹宏观形貌

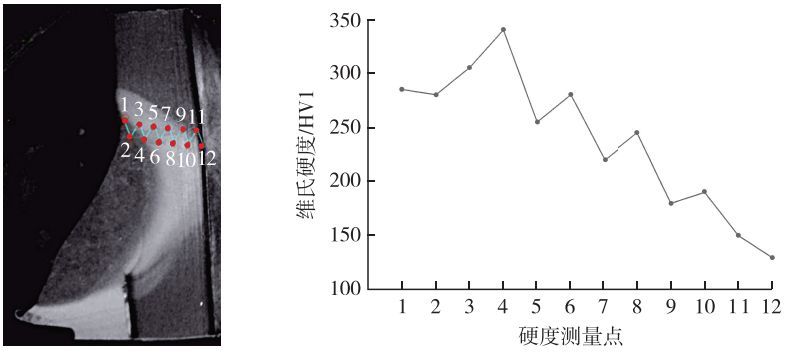


（c）焊缝处金相　（d）熔合线附近金相　（e）母材金相组织

图4　喷嘴角焊缝金相组织

Fig.4　Microtructure of the spray nozzle fillet weld

参照GB/T 4340.1—2024《金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法》对角焊缝裂纹两侧Z字形进行显微硬度检测，硬度测试点见图5。测试点主要包括裂纹两侧的焊缝、母材及热影响区；测试点1~10为焊缝及热影响区硬度测试试验点，其中，测试点4（焊缝）硬度值最高，为338.9 HV1，焊缝硬度值已超过母材（100 HV）；减温水管母材硬度符合标准要求（150.2HV1，硬度测试点11）。



（a）硬度测试点分布　（b）角焊缝硬度测试结果

图5　喷嘴角焊缝维氏硬度测试结果

Fig.5　Vickers hardness test results of the spray nozzle fillet weld

2.2　断口形貌分析

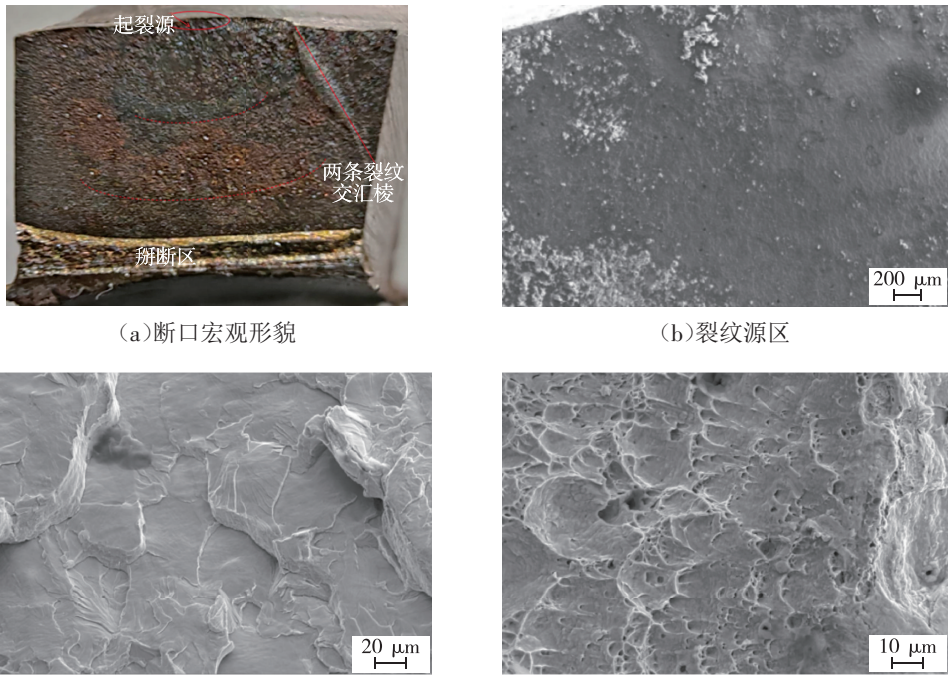
沿图1（d）所示裂纹断开试样，观察断面试样形貌，并将断口进行氧化皮清洗后使用扫描电镜进行断口观察，如图6所示。从图6（a）（b）可以看出，减温水喷嘴中2条裂纹表面形貌类似，2条裂纹交界处撕裂台阶陡峭，裂纹起裂区域有撕裂台阶。断口存在低周疲劳弧线，表明断口形成为低周疲劳失效所致。沿着裂纹扩展方向，断口呈解理断裂形貌特征，如图6（c）所示。最终断开为韧窝形貌，减温水喷嘴角焊缝断口呈现脆性断口特征。

2.3　有限元分析结果

利用Ansys Mechanical静态力学模块对减温水投用工况下，阀体与减温水管的温度场及应力场分布进行了计算分析。从图3（b）可以看出，在减温水投用的前期较短时间内，高旁阀壁温与减温水喷嘴及立管之间仍存在较大的温差。图7（a）示出该温度场分布情况下高旁阀及喷嘴最大主应力分布。可以看出，高旁阀进水立管角焊缝位置存在应力集中，最大主应力的平均值出现在角焊缝位置处（为212 MPa），已超过了P22材料在350 ℃的许用应力值（114 MPa），应力集中容易导致局部塑性变形。

从图1（a）中可以看出，相比于减温水进水立管独立进水，环形减温水加强了7支减温水进水管路的刚性。利用Ansys有限元应力分析软件，对不同长度的减温水进水立管在上述减温水投用工况下的应力进行了计算，其载荷约束和温度边界条件与第1.5节中原减温器喷嘴运行工况保持一致。

图7（b）~（d）示出了不同长度的立管在典型工况下的应力分布。可以看出，当立管加长到280 mm，立管及角焊缝位置处没有明显的应力集中。表2列出不同尺寸的立管与喷嘴连接处的计算最大应力值。

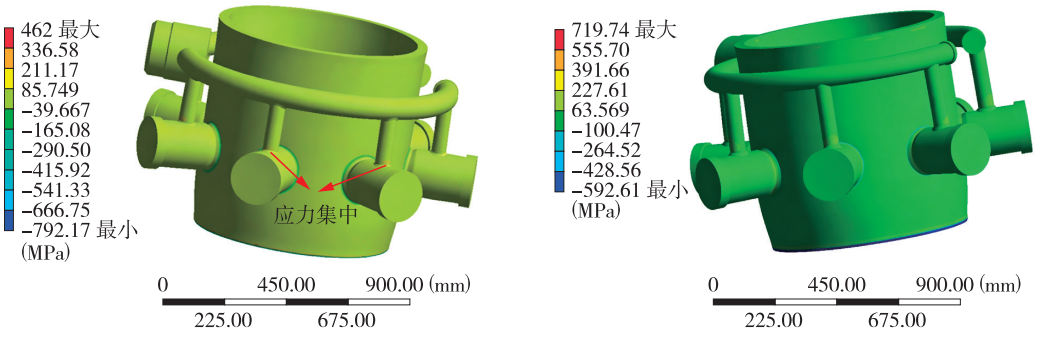


（a）断口宏观形貌　（b）裂纹源区

（c）裂纹扩展区　（d）瞬断区

图6　喷嘴角焊缝断口扫描电镜照片

Fig.6　SEM photograph of the spray nozzle fillet weld fracture



（a）立管长度180 mm　（b）立管长度230 mm

（c）立管长度280 mm　（d）立管长度380 mm

图7　不同立管尺寸的高旁阀有限元应力分析计算结果

Fig.7　Finite element stress analysis calculation results of high-pressure bypass valve with different vertical pipe sizes

从表2中也可以看出，随着立管长度增加，喷嘴与立管角焊缝2处应力水平具有明显的下降趋势。当立管长度增加到380 mm，相比于现有高旁阀结构，角焊缝2处的应力由212 MPa下降至65 MPa，其角焊缝位置的应力已低于服役温度下的许用应力值。

表2 不同尺寸的立管与喷嘴连接处的计算最大应力值

Tab.2 Calculated maximum stress values at the connection between vertical pipes of different sizes and the nozzle

项目	立管长度/mm			
	180	230	280	380
计算最大主应力/MPa	212	113	82	65

3 讨论

3.1 高旁阀角焊缝开裂原因分析

高旁阀减温水进口管路及焊缝在机组启机承受快速温度和压力变化，其断裂行为往往与其结构设计、材料性能及服役工况有关。从断口宏观检查可以发现，裂纹从外表面向内表面扩展，瞬断区面积较小，断口无明显塑性变形，微观断口上呈现解理断裂特征。裂纹为穿晶扩展，可以排除焊接再热裂纹导致[6]。焊缝纵剖面金相组织为贝氏体，焊缝和热影响区未见异常组织，但硬度测试结果显示焊缝显微硬度最高达338.9HV1，根据GB/T 5310—2023要求，P22材料母材显微硬度范围为130HV1~190HV1，高硬度的焊缝材质往往其塑韧性较差，在存在应力集中情况下，可能引起角焊缝的开裂。

根据角焊缝泄漏发生的时机来看，减温投用时的温差工况对裂纹的萌生发展具有重要影响。从图2(b)所示机组启机过程中温度变化曲线可以看出，减温水投用时，环形管与阀体壁温差最高可达260 ℃。机组启停及深度调峰过程中，减温水投用后，高旁阀阀体骤然发生温度变化，由于环形减温水管及高旁阀阀体存在结构约束，高旁阀产生周期性的膨胀与收缩变形，减温水立管受环向进水管约束无法实现自由热膨胀，在局部易产生强制应变。当其局部应力超过材料屈服强度后，局部进入塑性状态。随着启停温度循环次数增加，塑性应变不断累积，形成应变疲劳损伤，最终在减温水立管角焊缝应力集中部位产生裂纹并扩展，导致焊缝开裂失效。

角焊缝焊口断口平整，具有脆性疲劳断裂特征，表明裂纹扩展速率较快，减温水环形管、连接管与喷嘴之间在启停高旁阀开启瞬间产生的应力集中为裂纹的快速扩展提供条件。结合有限元应力计算结果与材料理化检测试验可以发现，在启停等温度剧烈变化工况下，角焊缝位置的应力集中叠加上角焊缝硬度高而脆性倾向大，从而导致减温水角焊缝开裂而泄漏。

3.2 高旁阀结构尺寸优化

根据减温水立管角焊缝裂纹的形成原因可以看出，增加减温水进水管路系统的柔性，减少结构受限产生的局部应变，可以降低减温水管泄漏风险。基于有限元法的应力分析结果也表明，随着减温水立管的加长，减温水立管的变形程度逐渐降低，变形均布于较长的进水立管中，减缓了角焊缝处的应力集中。此时增强的管道柔性能够有效缓解角焊缝区域的应力集中现象，角焊缝处的应力值显著降低，防止角焊缝由于应力集中发生开裂失效。本文采用理化分析结合有限元应力分析方法，分析了高旁阀喷嘴角焊缝开裂原因，明确了高旁阀焊缝开裂与焊接质量、高旁阀结构尺寸密切相关。机组启停、深度调峰工况下，阀体结构尺寸对角焊缝应力状态影响显著，相关结论可为此类结构优化设计提供参考。

4 结论

(1)在机组启停等温度急剧变化的工况下，减温水进水管与喷嘴之间焊缝硬度过高，以及结构约束导致的低周应变疲劳，两种因素叠加共同导致角焊缝的快速萌生和扩展，从而导致减温水管泄漏。

(2)有限元应力分析结果表明，在实测减温水投用下，原高旁阀减温水管设计在减温水进水立管及角焊缝位置处有明显的应力集中，应力超过P22材料在350 ℃时的许用应力值。

(3)减温进水管立管的加长能够显著改善管道柔性，降低角焊缝处的应力集中，改进方案可为同类型设备优化提供参考。

参考文献：

[1] 杨秀勇，田智宇，刘赫川.新形势下创新转型金融工具支持我国煤电绿色低碳发展的思考与建议[J].中国能源，2024，46(12)：39-46.
YANG X Y，TIAN Z Y，LIU H C. Innovative Transformational financial tools in the new situation to support reflections and suggestions on the green and low-carbon development of coal power in China[J]. Energy of China，2024，46(12)：39-46.

[2] 张全斌，周琼芳.基于“双碳”目标的中国火力发电技术发展路径研究[J].发电技术，2023，44(2)：143-154.
ZHANG Q B，ZHOU Q F. Research on the development path of China’s thermal power generation technology based

on the goal of “carbon peak and carbon neutralization”[J]. Power Generation Technology，2023，44(2)：143-154.

[3] 刘吉臻，杜忠明，王庆华，等.新型电力系统下新一代煤电发展路径[J].新型电力系统，2024，2(4)：357-370.
LIU J Z，DU Z M，WANG Q H，et al. Development paths for next-generation coal-fired power generation under new electric power systems[J].New Type Power Systems，2024，2(4)：357-370.

[4] 秦永亮，李勇平，刘云龙.超临界机组低温再热器出口集箱12Cr1MoVG管座角焊缝裂纹原因分析[J].锅炉技术，2020，51(4)：66-70.
QIN Y L，LI Y P，LIU Y L.Analysis of tube fillet weld cracks in outlet container of supercritical unit low temperature reheater [J]. Boiler Technology，2020，51(4)：66-70.

[5] 董鹏，李海阳，赖威龙，等.超超临界锅炉集箱角焊缝开裂分析及优化[J].发电设备，2024，38(3)：177-181.
DONG P，LI H Y，LAI W L，et al. Analysis and optimization on cracking failure of header fillet weld in an ultra-supercritical boiler[J].Power Equipment，2024，38(3)：177-181.

[6] 汪博，周翊航，李望，等.某电厂低温过热器出口集箱接管角焊缝开裂原因[J].理化检验-物理分册，2025，61(1)：62-65.
WANG B，ZHOU Y H，LI W，et al. Causes of fillet weld cracking of low temperature superheater outlet header tube in a power plant[J].Physical Testing and Chemical Analysis(Part A：Physical Testing)，2025，61(1)：62-65.

[7] 王鹏，崔伟，马金龙，等.压力容器小径支管角焊缝相控阵检测埋藏缺陷回波特性研究[J].压力容器，2024，41(4)：72-79.
WANG P，CUI W，MA J L，et al. Study on echo characteristics of fillet weld in small diameter branch pipe of pressure vessel by phased array detection[J]. Pressure Vessel Technology，2024，41(4)：72-79.

[8] 李猛，周顺荣，王克克，等.X80钢级油气管道缺陷修复用B型套筒尺寸优化设计[J].压力容器，2024，41(3)：49-58.
LI M，ZHOU S R，WANG K K，et al.Size optimization design of B-type sleeve for defect repair of X80 steel grade oil and gas pipeline [J]. Pressure Vessel Technology，2024，41(3)：49-58.

[9] 李猛，薛继军，杜喆.压裂泵泵头组件疲劳失效机理及寿命分析[J].机电工程，2025，42(10)：1898-1907.
LI M，XUE J J，DU Z.Fatigue failure mechanism and life analysis of fracturing pump head assembly [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering，2025，42(10)：1898-1907.

[10] 葛涛，王玉，白宇，等.煤化工装备中关键阀内件的失效行为及表面强化技术[J].流体机械，2024，52(2)：1-7.
GE T，WANG Y，BAI Y，et al. The failure behavior and surface strengthening technology of valve trims in coal chemical industry equipment [J]. Fluid Machinery，2024，52(2)：1-7.

[11] 闻家欢.承插焊阀门裂纹失效原因分析[J].化工装备技术，2021，42(4)：22-25.
WEN J H. Failure analysis of socket welding valve crack [J]. Chemical Equipment Technology，2021，42(4)：22-25.

[12] 黄少勋，郑宏伟.储气罐焊缝裂纹成因分析及修复技术研究[J].特种设备安全技术，2025(1)：21-23.
HUANG S X，ZHENG H W.Cause analysis and repair technology of weld cracks in gas storage tanks[J].Safety Technology of Special Equipment，2025(1)：21-23.

[13] WADA T，TERASAKI T，LGI S. Prevention of HAZ cracking in corner joints of high heat input SAW box columns [J]. Welding International，1998，12 (3)：207-214.

[14] 姜运建，李文彬，牛晓光，等.基于ABAQUS液氨储罐管座角接头应力计算[J].压力容器，2011，28(2)：28-32.
JIANG Y J，LI W B，NIU X G，et al. Stress computation on tube socket fillet joint of liquid ammonia tanks based on ABAQUS [J]. Pressure Vessel Technology，2011，28(2)：28-32.

[15] BADRKHANI AJAEI B，GHASSEMIEH M. Reinforcing fillet welds preventing cracks in partial joint penetration welds [J]. International Journal of Steel Structures，2015，15(2)：487-497.

作者简介：殷兆广(1981)，男，工程师，设备管理部主任，主要从事发电厂设备管理工作，通信地址：316135浙江省舟山市普陀区六横镇舟电大道1号浙江浙能中煤舟山煤电有限责任公司，E-mail：354051591@qq.com。

本文引用格式：
殷兆广，董勤，徐以伟，等.1 000 MW超超临界机组高压旁路阀减温水喷嘴焊缝开裂失效机理与设计优化[J].压力容器，2026，43(3)：70-77.
YIN Zhaoguang，DONG Qin，XU Yiwei，et al.Cracking failure mechanism and design optimization of the desuperheating water spray nozzle weld of a high-pressure bypass valve in a 1 000 MW ultra-supercritical unit[J].Pressure Vessel Technology，2026，43(3)：70-77.