加氢裂化反应器堆焊层裂纹合于使用评价

邵东亮　吴肖

（江苏省特种设备安全监督检验研究院 南京 211178）

[摘　要] 加氢裂化反应器是加氢裂化装置的关键设备。某厂加氢裂化反应器于2014年2月投入运行， 2017年6月首次检验时在内表面堆焊层发现腐蚀坑和5处裂纹，裂纹最长8mm。2022年第二次检验时发现裂纹尺寸没有变化。压力容器中存在的焊缝缺陷或裂纹尖端存在局部结构应力集中、削弱承载能力，甚至产生脆性断裂。为此，我们采用断裂力学方法对加氢反应器焊缝缺陷开展合于使用性评价[1]，确定缺陷是否满足合于使用要求。

[关键词] 加氢裂化反应器　裂纹　腐蚀坑　合于使用评价

前言

某厂DC-201102加氢裂化反应器规格为内径为4000mm，厚度为220+6.5mm，高度为31166mm，容积292m^3。基本参数如表1，反应器结构图见图1。

表1 设备基本参数

壳程设计压力（PD）	17.22MPa	壳程设计温度(TD)	454℃
壳程操作压力（PW）	16.4MPa	壳程操作温度(TW)	440℃
介质	油气 油 H2 H2S	封头厚度	130+6.5mm
筒体封头材质	2.25Cr-1Mo-0.25V+TP309L+TP347	筒体厚度	220+6.5mm
堆焊层材料	TP309L+TP347	堆焊层厚度	6.5mm

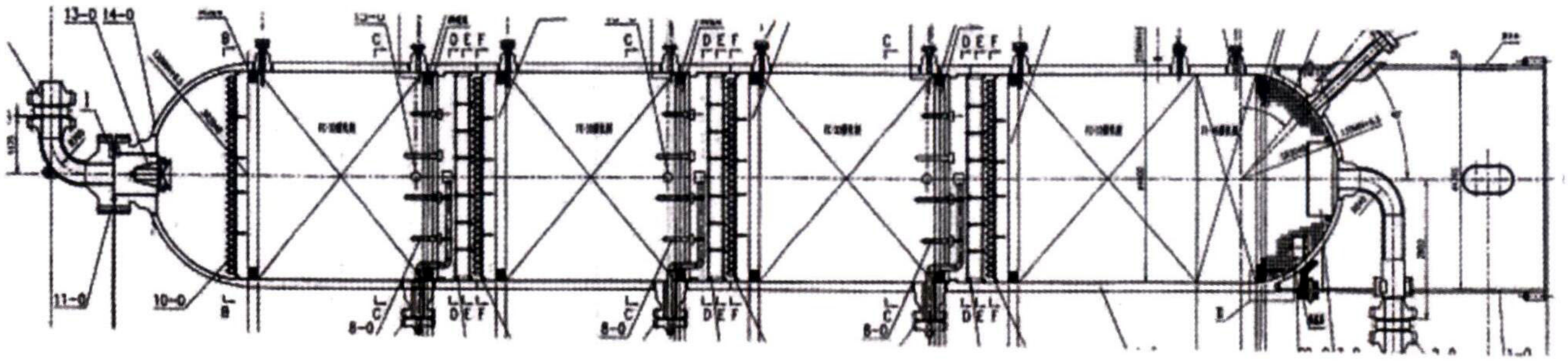


图1　反应器结构图

1 设备检验情况

2022年6月采用超声、磁粉、渗透、TOFD进行检验，发现该台设备在上侧壁卸料口管座法兰密封槽堆焊层[2]表面发现 5处纵向裂纹，位于槽的底部(靠内侧)，具体尺寸见表2缺陷检测结果。裂纹宏观形貌如图2-图6。堆焊层表面存在1处腐蚀坑（Φ6mm、深3mm）；2处堆焊层剥离，面积分别为7400×70mm^2、2300×60mm^2，缺陷具体位置见图7。

2 安全评价

材料高温性能劣化包含材料球化与石墨化[3]、高温氢损伤[4]和回火脆化[5]，分别对高温氢损伤和回火脆化进行评价[6]。

2.1 高温氢损伤

加氢裂化反应器材质为2.25Cr-1Mo-0.25V+

作者简介：邵东亮，男，（1973-），高级工程师。主要工作方向是承压设备检验检测及风险评估。

表2 缺陷检测结果

区段编号	序号	缺陷位置	缺陷痕迹尺寸（mm）	缺陷性质	备 注
F-1	1	法兰凹槽	4.5	裂纹	与上次检测相比未见扩展
F-1	2	法兰凹槽	8	裂纹	与上次检测相比未见扩展
F-1	3	法兰凹槽	8	裂纹	本次新增裂纹
F-1	4	法兰凹槽	5	裂纹	与上次检测相比未见扩展
F-1	5	法兰凹槽	2	裂纹	与上次检测相比未见扩展



图2 裂纹1宏观形貌

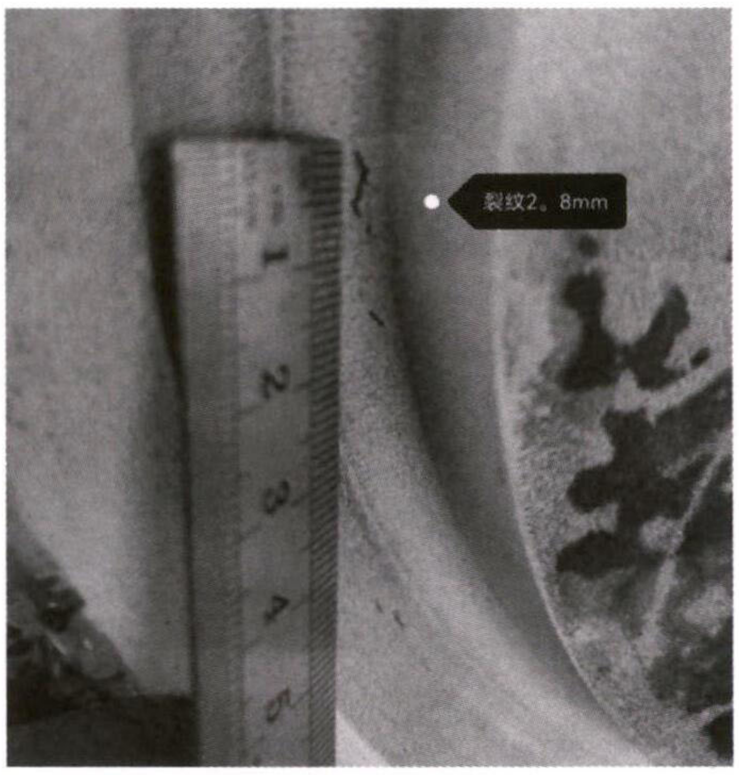


图3 裂纹2宏观形貌

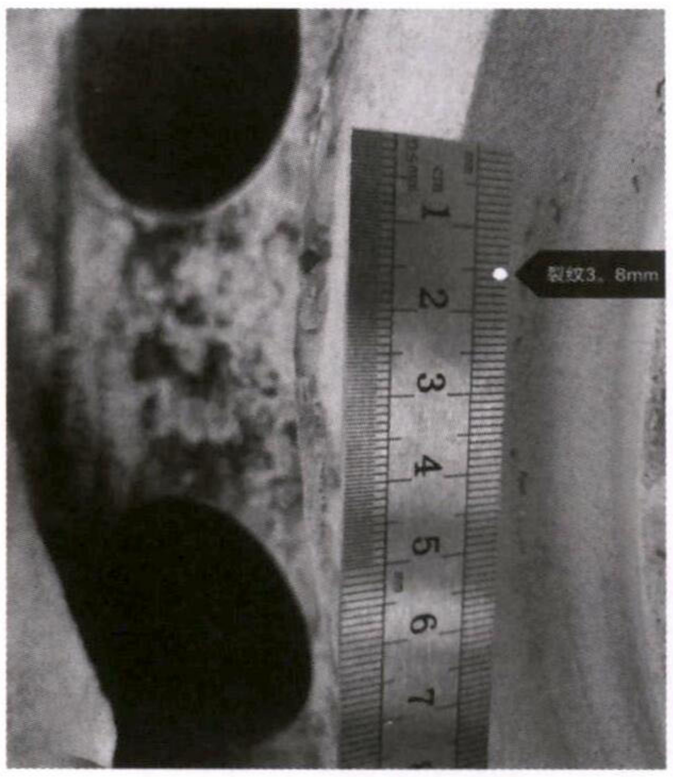


图4 裂纹3宏观形貌

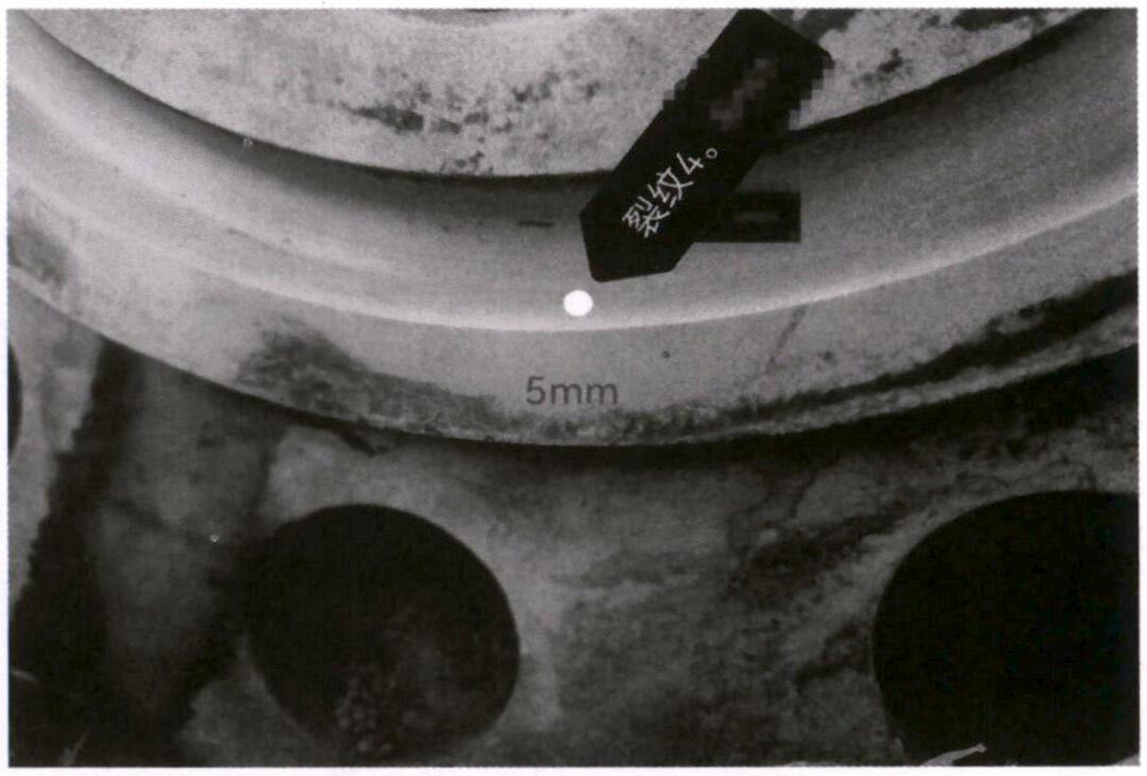


图5 裂纹4宏观形貌

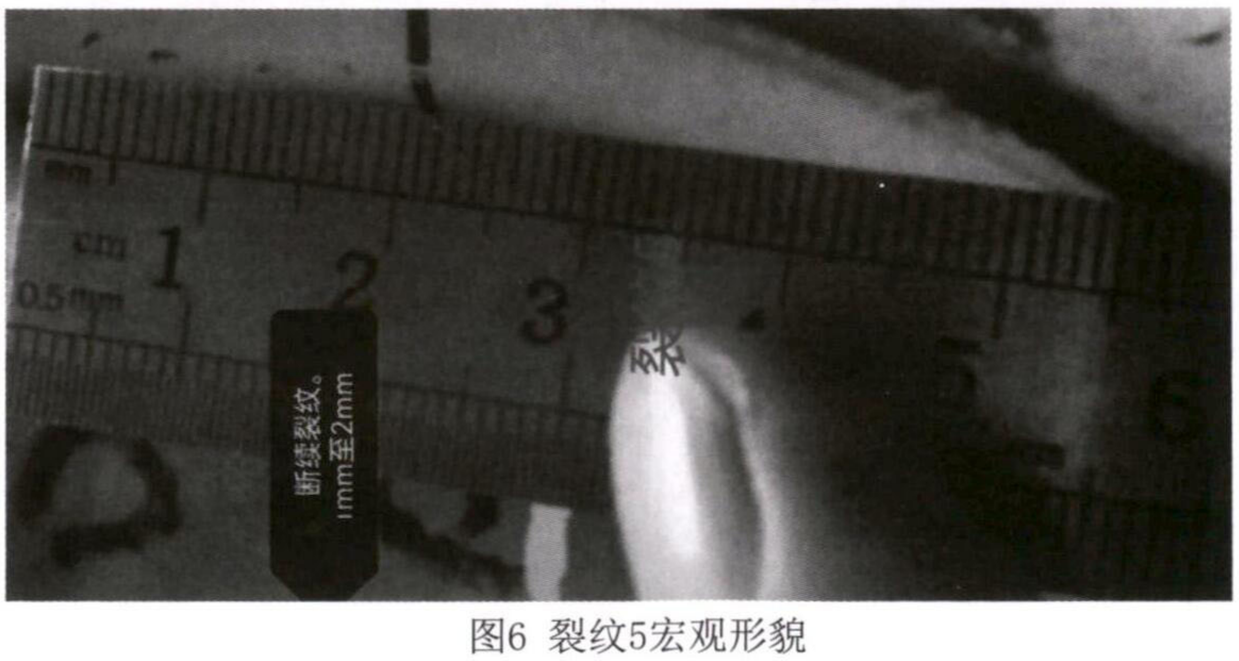


图6 裂纹5宏观形貌

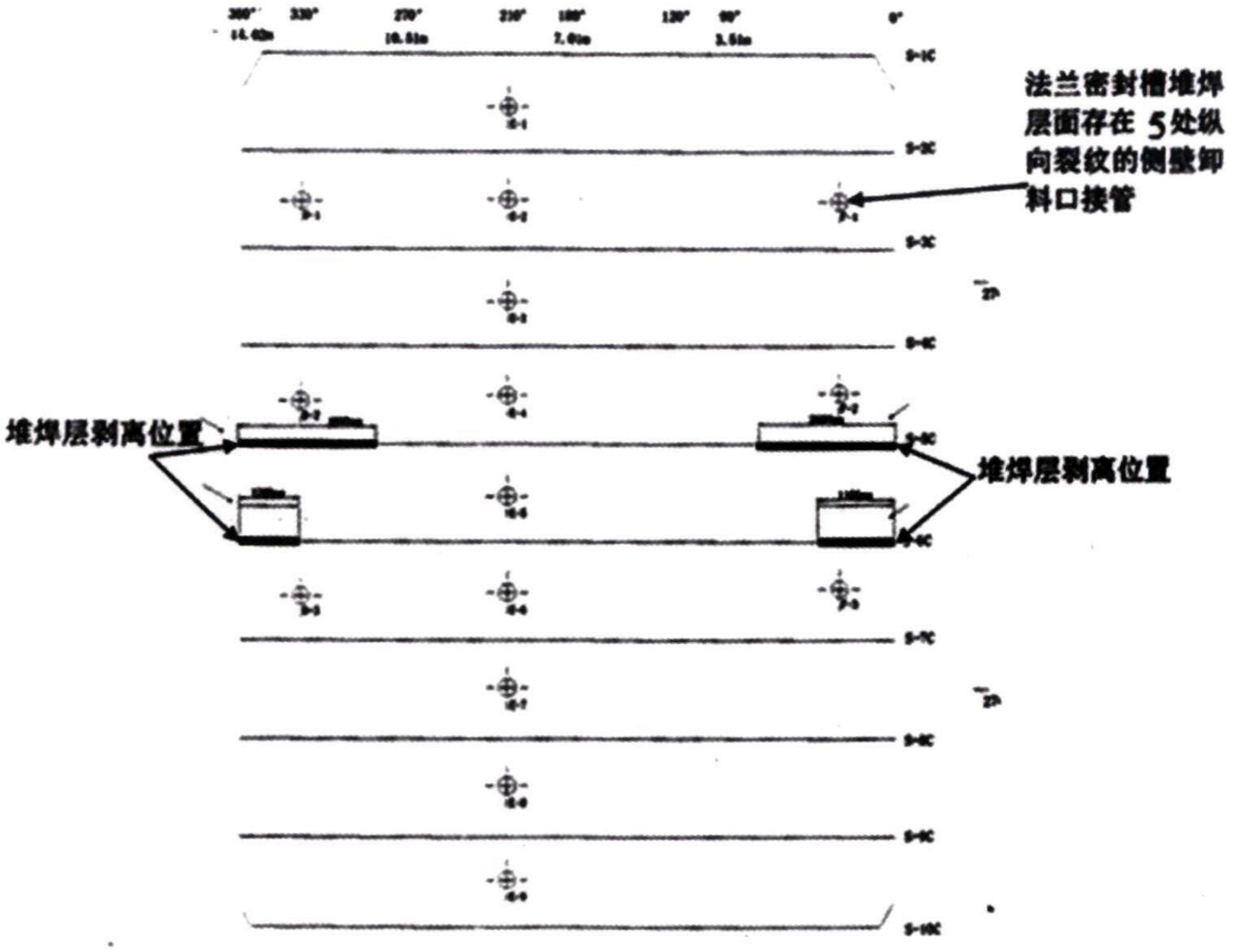


图7　反应器缺陷位置示意图

TP309L+TP347，为铬钼钢材料，其操作温度为440℃，其操作温度和氢分压位于图8的操作极限曲线之下，可判定为与预期寿命低相关[7]。

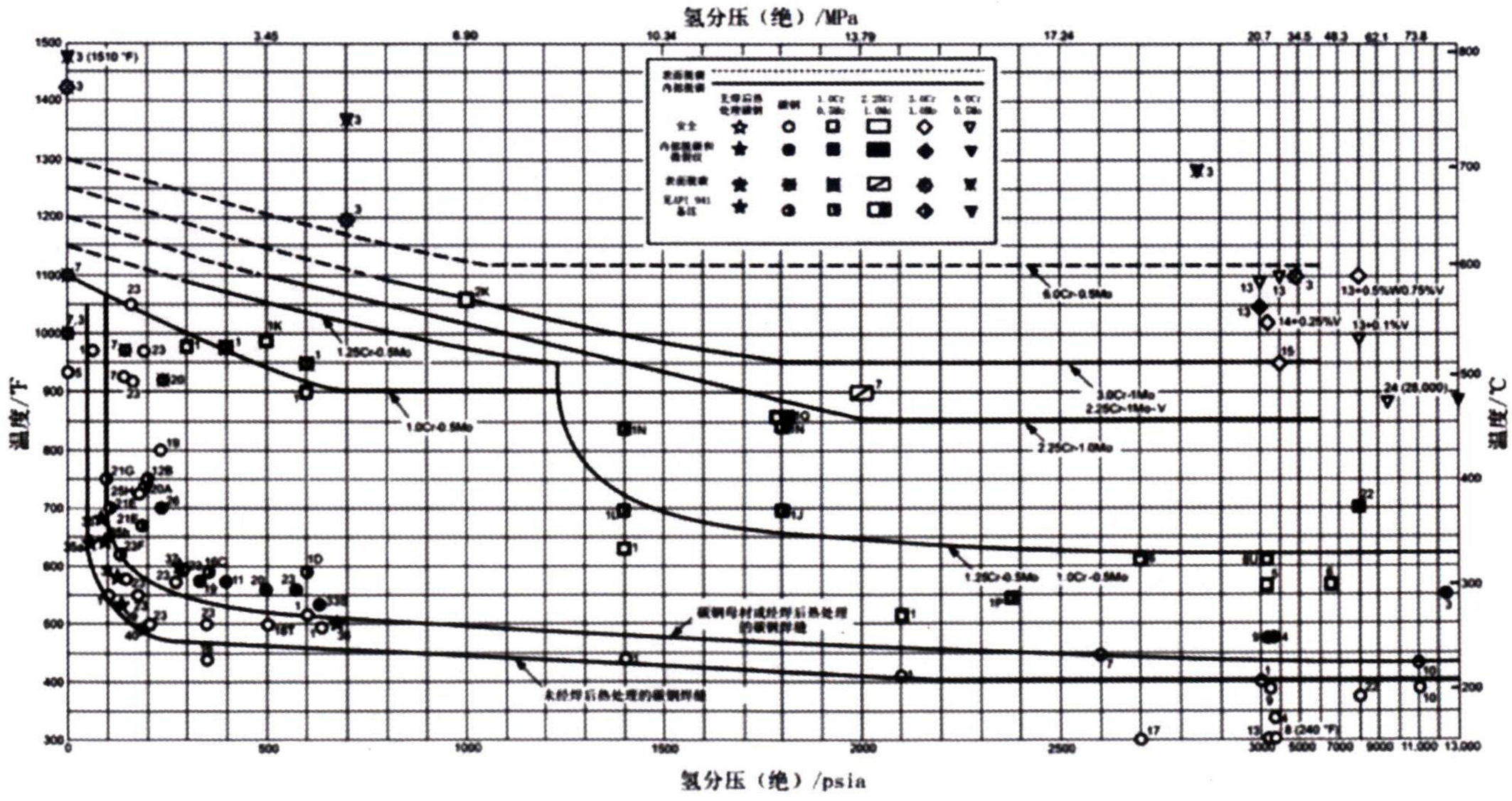


图8 高温氢损伤的操作极限曲线

2.2 回火脆化

该加氢裂化反应器于2012年设计，投用日期为2014年，已服役8年。

依据厂方提供的数据，J系数实测值为55.8<150

（1）$J=(Si+Mn)(P+Sn)*10^4(\%)$

（2）$=(10P+5Sb+4Sn+As)*10^{-2}(wppm)$

依据超设计使用年限压力容器评估与检验导则，存在回火脆化[8]损伤模式的压力容器，应该根据压力容器的服役条件、服役历史、材料的化学成分以及工艺控制措施进行归类[9]。

满足以下任何一个情况，压力容器可归类为与预期使用寿命高相关：

（a）压力容器母材的 J 大于等于 150，或者焊缝 X 系数大于等于 15

（b）压力容器整个服役过程中材料累积脆化当量$\triangle FATT_{cum}>1$

依据超设计使用年限压力容器评估与检验导则，还需要计算确定压力容器整个服役过程中材料累积脆化当量$\triangle FATT_{cum}$：

根据公式（1）计算整个服役过程中相对与步冷实验的材料累计脆化当量 $\triangle FATT_{cum}$:

$$\Delta FATT_{cum-sc}=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{t_i}{t(T_i)}\times\Delta FATT(Ti)\right) \quad (1)$$

其中：

$$t(T_i)=10^{19.0134-0.0316T_i}$$

$$\Delta FATT(T_i)=10.4333-0.0188\times T_i$$

根据公式（2）计算整个服役过程中材料累计脆化当量$\triangle FATT_{cum}$：

$$\Delta FATT_{cum}=\frac{\Delta FATT(J)}{75.5793}\times\Delta FATT_{cum-sc} \quad (2)$$

$$\Delta FATT(J)=-15.416+0.7267\times J-8.00043\times10^{-4}J^2$$

计算可得材料累积脆化当量$\triangle FATT_{cum}=0.35<1$，可认为与预期寿命低相关。

综上，可认为加氢裂化反应器可归为与预期寿命低相关。

2.3 堆焊层剥离及裂纹评估

加氢裂化反应器检出两处堆焊层剥离[9]，面积分别为$7400\times70mm^2$、$2300\times60\ mm^2$，林建鸿、柳曾典指出“堆焊层的剥离问题，对加氢反应器的运行安全不会构成致命的威胁”，“若在反应器的内件支撑凸台的母材中，可能出现由手支撑凸台的破坏而造成内件脱离等事故”。检测单位提供信息表明这台反应器目前检出的堆焊层剥离区域内未发现层下裂纹，也无堆焊层表面裂纹，且用户指出这些剥离区域均没有内件。国内某石化企业一台上世纪 80年代投用的反应器2003年检验就发现有多处堆焊层剥离，其中最大一处面积为$2050\times1600\ mm^2$，一直安全使用至今。所以，这些堆焊层剥离目前不影响容器安全使用。

加氢裂化反应器上侧壁卸料口管座法兰密封槽堆焊层面发现5处纵向裂纹，均位于槽的底部(靠内侧)，长度分别为 4.5mm、8mm、8mm、2mm、6mm。该法兰采用的是八角垫片密封，密封主要靠垫片与梯形槽内外侧的面(线)接触，因此这5处槽底部的纵向裂纹目前暂不影响法兰的密封性。但在今后检验中，应对该法兰密封槽堆焊层表面缺陷加强检测。

3 安全评价结论

（1）加氢裂化反应器本次检出的堆焊层剥离和堆焊层表面缺陷可以继续保留；位于法兰密封面的裂纹也可以继续保留。

（2）经安全评价，认为加氢裂化反应器回火脆化和高温氢损伤方面与预期寿命低相关。

（3）加氢裂化反应器运行期间，应根据相关法规做好监控，落实监控措施。操作过程中，应严格控制该台加氢反应器的工艺操作参数，不允许在使用过程中超出原设计图纸规定的操作压力和操作温度。应按照相关法规要求，做好应急预案和应急演练，确保该台加氢反应器的安全运行。

◆参考文献

[1] GB/T 19624-2019. 在用含缺陷压力容器安全评定 [S] .
[2] 王雪骄,范阳阳,晏君文,吴成林. 2.25Cr-1Mo-0.25V钢上国产焊材单层带极堆焊工艺研究[J]. 大型铸锻件, 2023(05):32-36.
[3] 李国政,王振江,张爱庆. 特种设备现场金相检验中常见异常组织及原因分析[J]. 中国特种设备安全,2020,36(11):34-39+72.
[4] 陈炜,陈学东,顾望平,周杨,胡久韶. 加氢装置高温氢损伤机理与风险分析[J]. 腐蚀与防护, 2019,40(08):623-626.
[5] 肖旭,董杰,刘长军,章小浒,柳曾典,陈学东.2Cr-1Mo钢加氢反应器长期使用后的脆化预测技术进展[J].压力容器,2021,38(03):54-59.
[6] 姜红超,喻灿,蒋良雄,姜渊.超期服役热壁加氢反应

（下转53页）

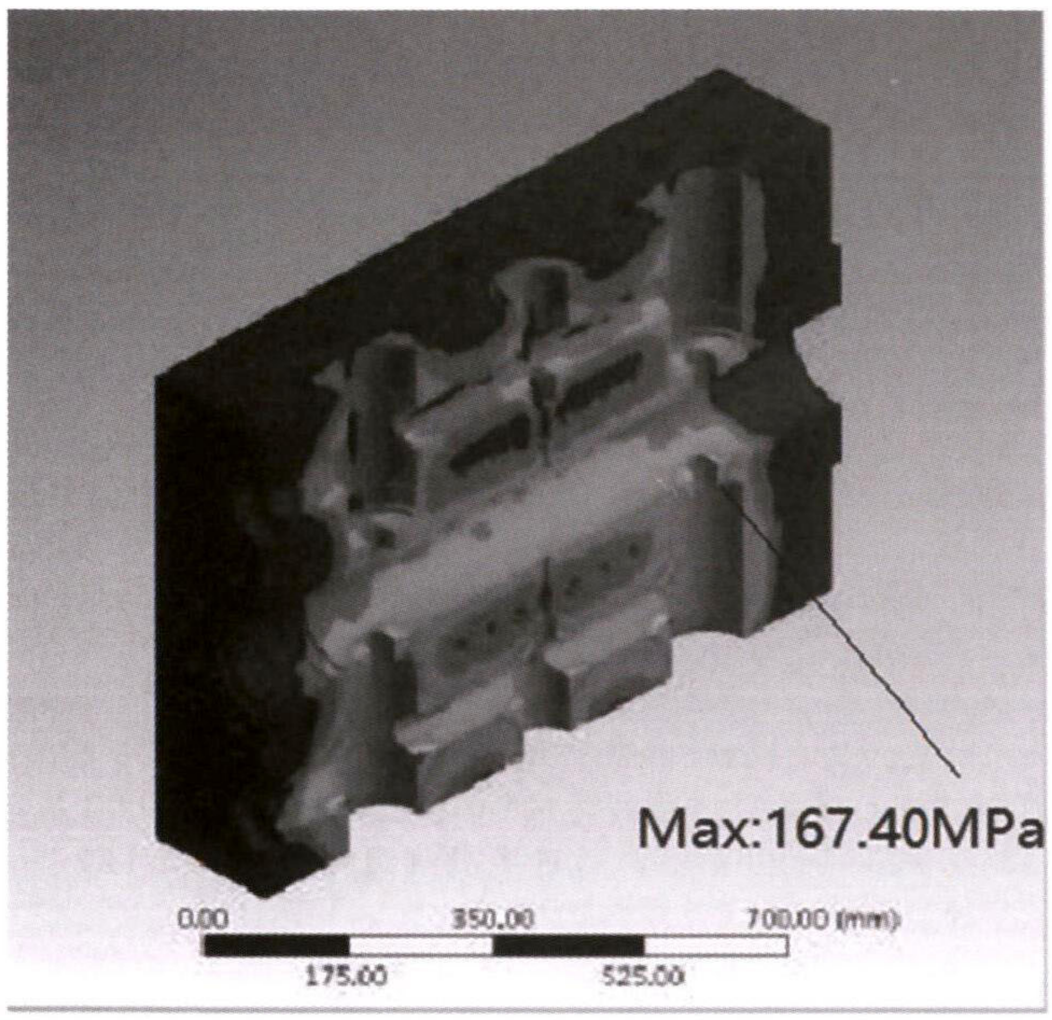


图5 超高压气缸冷却水管束参数优化后最大应力值分布

4 结语

对目前国内船舶 LNG 运输业对超高压天然气压缩机的市场需求越来越大、性能要求越来越高的现状，对压缩机的关键部件——高压气缸进行了基于ANSYS 的有限元计算与分析。超高压天然气气缸壁厚参数优化为12mm，冷却管束孔径优化为30mm。通过两个结构参数的组合，理论上实现了气缸内部最大应力数值下降11.3%的效果。研究成果为LNG超高压天然气气缸的结构优化设计提供了依据。当然在后续工作中，仍需要通过现场实验对优化后的气缸性能做进一步测试，以验证本次研究工作的有效性。

◆参考文献

[1] 贾承造, 张永峰, 赵霞.中国天然气工业发展前景与挑战[J].天然气业,2014,34(02):8-18.
[2] 郭历伦, 陈忠富,罗景润, 陈刚.扩展有限元方法及应用综述[J].力学季刊,2011,04:612-625.
[3] 齐正强,针继标,郭小东.广义虎克定律在弯扭组合中的应用[J].青岛大学学报(工程技
版),1995(04):81-87.
[4] 王建华 .线弹性有限元的自适应加密与多重网格法求解[J].河海大学学报,1994(03):16-22.
[5] 欧阳华江.关于热传导方程的有限元算法[J].工程力学,1993(04):58-61.
[6] 涂敏杰,卢志明.对流边界层湍流特性的数值研究[J].力学季刊,2005(03):354-360.

收稿日期：2024-02-19 修回日期：2024-05-25

（上接61页）

器损伤机理及剩余寿命评价方法[J].石油化工腐蚀与防护,2023,40(02):24-29
[7] GB/T 150-2011. 压力容器[S].
[8] 华丽, 徐宏, 朱奎龙, 王琼琦, 王志文. 2.25Cr-1Mo钢回火脆化对氢脆的影响[J]. 机械工程材料, 2004(02): 17-20+30.
[9] T/CMES-PVP 001-2020 , T/CPASE PT 020-2021. 超设计使用年限压力容器评估与检验导则 [S] .
[10] 朱坤,吴义党,邹国伟. 反应堆压力容器不锈钢堆焊层剥离问题分析及工艺控制[J]. 电焊机,2023,53(10):109-114.

收稿日期：2024-03-12 修回日期：2024-05-29