



第九届全国压力容器学术会议

压力容器先进技术

中国机械工程学会压力容器分会 编
合肥通用机械研究院



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

压力容器先进技术

——第九届全国压力容器学术会议

中国机械工程学会压力容器分会 合肥通用机械研究院 编

图书在版编目(CIP)数据

压力容器先进技术:第九届全国压力容器学术会议/中国机械工程学会压力容器分会,合肥通用机械研究院编. —合肥:合肥工业大学出版社,2017.9

ISBN 978-7-5650-3559-3

I. ①压… II. ①中…②合… III. ①压力容器—学术会议—文集 IV. ①TH49-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 231195 号

压力容器先进技术

——第九届全国压力容器学术会议

中国机械工程学会压力容器分会 合肥通用机械研究院 编

责任编辑 张择瑞

出版 合肥工业大学出版社
地址 合肥市屯溪路 193 号
邮编 230009
电话 理工编辑部:0551-62903204
市场营销部:0551-62903198
网址 www.hfutpress.com.cn
E-mail hfutpress@163.com

版次 2017 年 9 月第 1 版
印次 2017 年 10 月第 1 次印刷
开本 889 毫米×1194 毫米 1/16
印张 77.75
字数 2408 千字
印刷 安徽联众印刷有限公司
发行 全国新华书店

ISBN 978-7-5650-3559-3

定价:500.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换

前 言

在举国上下热烈庆祝党的十九大胜利召开之际，我们隆重集会举办第九届全国压力容器学术会议。此次会议是我国压力容器技术工作者传播先进技术、交流科技成果、引导学科发展、培养造就人才的一次盛会。

本次会议由中国机械工程学会压力容器分会及其挂靠单位合肥通用机械研究院共同主办，由中国特检院、华东理工大学、南京工业大学、浙江大学、江苏特检院、兰州兰石重型机械有限公司共同承办。

第九届全国压力容器学术会议定于2017年11月19—22日在安徽合肥举行。本次大会的论文征集工作从2016年12月发出征文通知至2017年5月31日截止共收到论文300余篇，学会在6月下旬和7月中旬组织专家进行了论文初审和复审，因受论文交流时间限制，会议共录用182篇在会上宣读。这些论文从各个方面反映了近年来我国压力容器技术发展的新动向和取得的成果，内容丰富，资料翔实，具有很强的实用性，它也必将对今后的压力容器技术创新和行业整体水平提高具有借鉴和指导意义。

第九届压力容器学术会议论文征集工作，得到了学会领导、第八届全体理事、材料、设计、制造、使用管理、换热器、管道、膨胀节等分委员会委员、广大团体会员单位、个人会员、全国压力容器工作者的积极响应和大力支持，尤其要指出的是广大青年压力容器工作者和高等院校在读学生表现出很高的积极性和热情，共撰写了近170篇论文。为了鼓励和表彰青年学者投身压力容器技术事业，本届会议继续设立“中国压力容器优秀青年论文奖”。通过专家初选评出28篇论文作为候选论文，再通过答辩，评选出20篇优秀青年论文，其中一等奖二篇、二等奖六篇、三等奖十二篇，并在第九届大会上向获奖者颁发证书和奖金。

本届大会设有主旨报告，报告者是国际、国内的专家，主旨报告反映了国内外压力容器技术最新进展和研究成果，也指出了压力容器技术的发展方向，这将对我国压力容器技术的发展具有促进引领作用。

本论文集出版得到了合肥工业大学出版社的积极配合和帮助，在此表示衷心的感谢！

编 者

2017年9月

目 录

A 材料、断裂力学、腐蚀

- A1 大型原油及燃料油储罐用高强钢 12MnNiVR 的研制 丁庆丰 杨宏伟 (2)
- A2 舞钢临氢 14Cr1MoR 钢板的研制开发 吴艳阳 赵文忠 李祥兵 牛红星 (6)
- A3 290mm 超厚 Cr - Mo 钢板的开发 车金锋 庞辉勇 (11)
- A4 核电承压边界压力容器用 Mn - Mo - Ni 钢板的开发 刘慧斌 张汉谦 (17)
- A5 武钢 630MPa 级移动压力容器钢 WH630E 的研制 刘文斌 王宪军 李书瑞 (22)
- A6 VN 微合金化压力容器用钢板 WH630E 的应变时效性能研究 王宪军 杜 涛 刘 冬 (31)
- A7 钒氮微合金化高强韧性 P460NL1 钢板的开发与应用
..... 高 雅 赵文忠 谷蒙森 张海军 徐腾飞 耿宽宽 (37)
- A8 低温压力容器用含氮奥氏体不锈钢 304N 宽幅热轧卷板的开发 李 筱 王志斌 李国平 (43)
- A9 LNG 储罐用 06Ni9DR 钢板的开发及焊接试验研究 车金锋 庞辉勇 (49)
- A10 大厚度预脱甲烷塔和乙烯精馏塔用 08Ni3DR 钢板的研制开发
..... 庞辉勇 车金锋 罗应明 龙 杰 赵文忠 (59)
- A11 3.5%Ni 型低温厚壁大锻件研制 杜军毅 郑建能 贾新胜 鞠庆红 (65)
- A12 正火温度对 -70℃ 低温钢低温韧性及屈强比的影响 战国锋 刘文斌 李书瑞 (75)
- A13 预疲劳载荷对 P92 钢蠕变性能的影响 张 威 王小威 巩建鸣 姜 勇 黄 鑫 (80)
- A14 Q345R 钢不同应变过程磁记忆信号特征规律研究 杨 超 李晓阳 张亦良 (86)
- A15 16MnDR 钢冲击功与断裂韧性经验关系式的研究 陈 增 潘建华 (93)
- A16 钕对 12Cr2Mo1R 厚板组织和性能的影响 刘自立 刘春明 张汉谦 (98)
- A17 CAP1400 项目核电高加用 TP439 铁素体不锈钢焊接钢管的国产化试验研究
..... 车鹏程 颜 鹏 谭舒平 (104)
- A18 外径 1422mm X80 管线钢管应用关键技术研究进展
..... 赵新伟 池 强 张伟卫 李丽锋 齐丽华 许春江 (115)
- A19 超长 (300 米以上) 无缝换热铝管国产化研制与应用 ... 鹿来运 陈 杰 糜丽燕 史俊强 (124)
- A20 高腐蚀性油气集输环境用双金属复合管 李发根 (131)
- A21 锅炉汽包用钢板冷卷开裂原因分析 侯 洪 张汉谦 (136)

A22	304 不锈钢不同应变路径下的循环行为研究	李亚晶	于敦吉	陈旭	(142)			
A23	热老化对核级用钢 316LN 机械性能影响的试验研究	史丽婷	于敦吉	石守稳	张喆	陈旭	(147)	
A24	大型 LNG 储罐用国产 9%Ni 钢板性能状况的抽样检测	姜恒	陆戴丁	钱兵	陈涛	艾志斌	(153)	
A25	不同应力状态及应变速率下 X90 钢断裂行为研究	杨锋平	曹国飞	邹斌	(160)			
A26	基于 Voronoi 图金属微观多晶体三维建模方法与拉伸模拟	史君林	赵建平	(164)				
A27	微载荷球压痕法测量含短屈服平台金属材料应力应变关系的有限元模拟	金柱	王占宇	赵建平	(170)			
A28	材料断裂韧度的压入试验确定方法研究	王尚	张国新	王威强	(178)			
A29	三种离心铸造奥氏体耐热合金材料性能对比	贾献凯	唐建群	巩建鸣	郭晓峰	沈利民	(185)	
A30	改进型的 9Cr-1Mo 马氏体耐热钢高温蠕变行为研究	任发才	汤晓英	(192)				
A31	固支直杆弯曲小试样蠕变变形理论研究	秦宏宇	周帼彦	涂善东	(198)			
A32	电沉积纳米晶体镍涂层的损伤与断裂实验研究	赵彦杰	周剑秋	(205)				
A33	考虑高阶项影响的纯 II 型蠕变裂纹修正 TDFAD 研究	代岩伟	刘应华	(214)				
A34	结构内局部高应力区对裂纹扩展路径的影响	吕斐	缪新婷	周昌玉	(221)			
A35	平面缺陷简化评定与常规评定反转现象的分析与讨论	史君林	赵建平	(230)				
A36	I-II 复合型裂纹 CCP 和 CTS 试样极限载荷研究	王远哲	缪新婷	周昌玉	(236)			
A37	面内和面外约束效应对 3D 紧凑拉伸试样的影响	刘争	孙少南	王昕	陈旭	(243)		
A38	CO ₂ 管道泄漏中减压波速度和断裂控制研究	郭晓璐	闫兴清	喻健良	(250)			
A39	基于失效评定图的含周向缺陷管道简化评定方法	胡靖东	刘长军	轩福贞	(259)			
A40	高温失效评定图技术 (TDFAD) 的应用改进	肖启迪	刘应华	沈鋈	(268)			
A41	体积型腐蚀缺陷压力管道爆破概率的失效窗口法	陈占锋	沈小丽	金志江	(277)			
A42	深海潜水器耐压壳体观察窗的力学性能和损伤分析	李晓康	刘鹏飞	(284)				
A43	基于损伤力学的蒸汽转化炉热壁集气管蠕变损伤有限元分析	郭晓峰	巩建鸣	杨新宇	耿鲁阳	贾献凯	(294)	
A44	基于多尺度模型的复合材料气瓶低速冲击渐进失效分析方法	廖斌斌	郑津洋	顾超华	(299)			
A45	压力边界拓展对高压气瓶内表裂纹应力强度因子的影响	聂德福	陈学东	范志超	吴乔国	薛吉林	(308)	
A46	PE 管材热熔对接接头蠕变裂纹增长规律的研究	高炳军	杜招鑫	董俊华	富阳	(317)		
A47	ASME 规范案例 2605-2 在四种温标下的算法转换及工程应用	沈鋈	刘应华	(322)				
A48	Code Case 2605 用于加氢反应器高温强度评价的案例研究与影响因素分析	刘芳	宫建国	轩福贞	(326)			
A49	ASME 规范案例 2605 中的两种蠕变疲劳寿命评估方法的应用和比较	关凯书	周腾飞	章晓程	(332)			
A50	疲劳寿命评定的结构几何形状相关性研究	杜彦楠	汤晓英	朱明亮	轩福贞	(340)		
A51	XFEM 在压力容器疲劳裂纹扩展分析中的应用研究	王琦玮	涂思浩	周明珏	李曰兵	(347)		
A52	基于质量等级法的含裂纹结构疲劳评定案例分析	郝建松	杨建国	李曰兵	张鹏程	(352)		
A53	高温下结构疲劳强度考核的简化方法研究	张伟昌	朱明亮	轩福贞	(358)			
A54	气相反应器整体应力强度及疲劳分析	陈孙艺	卢学培	(363)				
A55	低温气体渗碳对 304 奥氏体不锈钢应力腐蚀开裂行为的影响	彭亚伟	陈超鸣	李宣逸	巩建鸣	姜勇	刘喆	(372)

A56	不同微观结构对抗氢性能影响的试验研究	李文博	王晶	(379)			
A57	Zare 涂层防腐技术有效解决液化石油气球罐低温湿硫化氢应力腐蚀	刘博	张树全	(388)			
A58	金属热喷涂在中高压容器上应用的防腐技术研究	雒定明	张庆春	刘刚	常泽亮	施辉明	(394)
A59	化工过程设备流动腐蚀预测及智能防控技术研究	偶国富	金浩哲	吕文超	何昌春	王宽心	(402)
A60	光热电系统高温熔融盐对金属的腐蚀行为与选材对策	霍中雪	陈永东	吴晓红	(411)		
A61	微区电化学分析技术在管道腐蚀研究中的应用进展	封辉	丁皓	(418)			
A62	环烷酸腐蚀关键影响因素与案例解析	梁春雷	陈学东	艾志斌	吕运容	王刚	(424)

B 设计、传热

B1	高温下闸阀螺栓载荷变化规律研究	张阳	闫兴清	喻健良	(432)			
B2	国内外常用法兰连接设计方法的对比研究	王爱民	王雅	姜峰	(439)			
B3	高压容器新型浮动卡箍连接式快开结构的设计	张杰	朱永有	何治文	王志峰	陈健	卢山	(445)
B4	超高压氢气组合密封的仿真研究	周池楼	陈国华	(450)				
B5	长管拖车气瓶组合泄放装置的研究	于庆伟	惠虎	宫建国	(457)			
B6	液化气体储罐调节阀泄放能力计算及改进	亢海洲	朱建新	方向荣	庄力健	袁文彬	(462)	
B7	线性黏滞阻尼器在侧部框架塔中的应用研究	杜怡安	谭蔚	陈晓宇	樊显涛	(467)		
B8	抛物线方程在重整反应器中锥体对接马鞍形接管法兰高度计算中的应用	郑红果	魏剑平	杨生元	赵志琦	(474)		
B9	基于三维激光扫描的应变强化压力容器形状变化试验研究	江城伟	郑津洋	惠培子	(479)			
B10	基于中厚板的多层大型高压容器设计建造方法的探讨	王志文	王学生	惠虎	周忠强	(486)		
B11	大型金属壁全容式 LNG 储罐结构对比	范海俊	朱金花	张新建	(491)			
B12	船用 LNG 燃料罐传热与结构强度分析	毛红威	陈叔平	(497)				
B13	基于检测数据的在役储罐地基沉降曲线拟合方法	苏文强	唐小雨	范海贵	陈志平	(504)		
B14	大型储罐抗风圈设计的改进模型	张维东	王光龙	罗倩	(510)			
B15	考虑结构与载荷关联性时大型储油罐拱顶稳定性分析	高健富	靳达	高炳军	(517)			
B16	正交各向异性锥壳结构外压设计方法研究	胡嘉琦	贺小华	周昌玉	夏伟伟	(522)		
B17	应变强化圆筒容器外压屈曲试验研究	张泽坤	惠培子	郑津洋	(530)			
B18	薄壁圆柱壳轴压屈曲研究技术进展	陈志平	唐小雨	苏文强	焦鹏	范海贵	(535)	
B19	双鞍座/三鞍座卧式容器临界失稳压力参数影响研究	周博为	贺小华	张燕	(547)			
B20	外压下腐蚀海底管道的屈曲传播分析	颜孙挺	叶皓	金志江	(558)			
B21	组合载荷作用下带接管碟形封头的安定分析	彭恒	刘应华	(566)				
B22	圆筒大开孔补强计算方法比较和分析	任超	(576)					
B23	复合气瓶快速充氢温升过程的二维轴对称数值模拟	许明	江勇	陈学东	范志超	吴乔国	(582)	
B24	碳纤维复合材料高压气瓶缠绕层设计与自紧分析	吴乔国	陈学东	范志超	江勇	张晓强	聂德福	(588)
B25	缠绕气瓶最佳自紧压力分析与缠绕层表面损伤安全评估	宋宇轩	陈海云	丁振宇	高增梁	(594)		
B26	大容积钢制无缝气瓶局部火烧实验及数值研究	古晋斌	赵宝顿	惠虎	刘俊煊	何成	(601)	

B27	苯乙烯装置用膨胀节的热应力分析	杨玉强	张道伟	闫廷来	(606)		
B28	SF ₆ 变压器气箱结构强度分析及优化设计	高明	李庆生	陈邦强	(611)		
B29	关联支持向量回归方法及其传热管爆破压力分析应用	李美艳	何兴	徐贤兴	金伟娅 (618)		
B30	在役聚乙烯超高压反应管极限压力的理论与试验研究	马小明		祝伟华	(623)		
B31	一种大型固定管板换热器有限元分析建模方法	刘斌	董俊华	高炳军	(627)		
B32	腔式吸热器膜式壁稳态热应力及其对寿命影响模拟研究	魏进家		万振杰	(633)		
B33	含不凝气混合蒸汽水平管内冷凝的模型研究	任彬	杜彦楠	鲁红亮	王少军	宋盼	符栋良 (640)
B34	大小孔折流板与波纹管组合换热器的壳程传热与压力降数值模拟	刘琪	李慧芳	钱才富	(645)		
B35	斜方格形板式换热器结构参数对传热效果的影响	赵桐	于洪杰	钱才富	(650)		
B36	真空螺带干燥器内颗粒运动状态分析	杨以刚	周明珏	李曰兵	金伟娅 (656)		
B37	内波外螺纹管轴向刚度参数化分析及实验研究	夏春杰	陈永东	吴晓红	(662)		
B38	扭曲管几何参数对其许用内压的影响	张雨晨	陈永东	吴晓红	(668)		
B39	缩放管在轴向拉伸载荷作用下的应力分析	温士杭	钱才富	赵福臣	秦国民 (673)		
B40	ANSYS 生死单元及预应力文件在急冷器设计中的应用	丘波	徐儒庸	程伟	(680)		
B41	管束效应对中间流体气化器内超临界 LNG 传热过程的影响	徐双庆	陈学东	范志超	(686)		
B42	石墨烯改性聚全氟乙丙烯复合材料应用于换热设备的研究展望	孙振国	费宏伟	邵春雷	(697)		
B43	管板设计统一理论的研究进展			朱红松	(702)		
B44	加厚管板降低浮头式换热器换热管压应力的简便计算方法			石平非	(720)		
B45	高通量管换热器在大芳烃装置中的应用			秦学功	(724)		
B46	非均匀刚度正方形排布管束的流致振动特性研究		郭凯	谭蔚	(728)		
B47	空气-水两相横向流诱发管束弹性不稳定性的实验研究	刘宝庆	张亚楠	陈小阁	程瑞佳	徐子龙 (737)	
B48	基于 Transition SST 模型的横向流下塔设备振动对气动特性影响研究	邱雅柔	唐迪	高增梁	(747)		
B49	大高颈比塔器的诱导振动分析	刘东	魏昕辰	段成红	(754)		
B50	基于 ANSYS 的三维垂直管道动力学分析	马东方	何晨	梁瑞	(760)		
B51	水锤作用下弯管响应的数值模拟	苏文献	郭佳伟	施卿海	(768)		
B52	钢制排气筒流场分析与诱导振动响应研究	徐盛	贺小华	周金彪	(775)		
B53	悬跨高度对海底管道绕流流场特性影响的数值模拟研究	许明	陈学东	王冰	关卫和	范志超	董杰 (791)
B54	波纹管高温疲劳寿命研究	陈友恒	孙磊	李杰	刘岩	段玫 (799)	

C 制造焊接

C1	基于冷成形技术的小直径厚壁筒体卷制			马玉玫	(804)
C2	大型厚壁锥体压制技术			尤秀美	(809)
C3	厚壁高强度钢筒节的冷卷成形		李义龙	陈禹	(814)
C4	大弯曲半径 U 型管冷热成型制造技术对比研究	江克	陈明健	毛之鉴	(819)
C5	新型双金属复合管热液压工艺研究	魏巍	王学生	鄢桂东	张朝 (827)
C6	多层多波 Ω 形波纹管液压成型的数值模拟	叶梦思	李慧芳	钱才富	王友刚 (835)
C7	甲醇合成塔平盖密封面加工工艺研究	蔡超	关庆鹤	刘太平	(843)

- C8 硼注射箱人孔螺栓孔螺纹返修工艺技术研究 程小刚 郭光强 杜宇 (847)
- C9 大型卡箍紧固结构中制造实配问题分析以及解决方案 郁恒山 杨敬霞 张少勇 丁勤 (854)
- C10 球形储罐赤道板吊点计算 陈超 史旭阳 (860)
- C11 一种镍基合金堆焊管板与换热管对接焊坡口加工工艺研究 关庆鹤 廉松松 李国骥 (865)
- C12 大直径多孔双面堆焊管板制造技术 王翰 贾小斌 王金霞 王志刚 周彩云 郑维信 (870)
- C13 DMTO 装置两器旋风分离系统现场组装技术 张勋 王桂清 (875)
- C14 合成回路蒸汽发生器制造技术 王金霞 张建晓 张凯 贾小斌 李义民 郑维信 (880)
- C15 四喷嘴水煤浆气化炉制造技术 张志敏 (885)
- C16 固定床反应产物蒸汽发生器事故分析及结构改进 刘仙君 (892)
- C17 超大型薄壁密集塔盘特种材料塔器制造技术 高学明 (897)
- C18 超厚壁海洋承压设备设计制造研究 王志峰 张明建 卞如冈 杜军毅 孙螺 潘广善 (901)
- C19 海上浮式生产储油船 (FPSO) 用低温厚壁容器的研制
..... 张杰 王志峰 杜军毅 王雪娇 王迎君 何治文 肖高辉 (911)
- C20 组合氨冷器的设计及制造 凌翔翰 沈林 张少勇 丁勤 裴峰 胡学海 (918)
- C21 大型硫黄回收余热锅炉研制 韩冰 毛家才 殷俊 (926)
- C22 新型铸铁水室的结构设计与成形制造技术研究 李树奎 王化乔 (935)
- C23 立式螺纹锁紧环式换热器现场拆卸技术
..... 宁兴盛 周霞 王志刚 林浩志 张东泓 尤秀美 (940)
- C24 提高数控钻床在管板钻孔工序中质量和效率 沈林 丁勤 尹飞 (946)
- C25 移动式管道预制工作站的建立与应用 秦丽 (951)
- C26 300mm 管板与厚壁换热管内孔对接自熔焊技术 朱宁 高中华 周兵风 (956)
- C27 内孔焊焊接工艺的研究及焊接工艺评定的实施 于湫 (963)
- C28 SA-336F91 与 20MnMoNb 异种钢焊接工艺研究及在产品上应用
..... 陈怡 李春光 欧海燕 (970)
- C29 国产 Cr-Mo 钢焊材的焊接工艺试验 雷万庆 徐红 梁小武 (976)
- C30 哈氏合金 C276 堆焊技术研究 王雪骄 (986)
- C31 NG-SAW 在超低温高压大厚壁压力容器中的应用 唐贺峰 达进 (992)
- C32 高镍合金 N_2O 减排反应器裂纹分析与修复技术探讨 郑启文 安洪亮 徐锴 郑本和 (997)
- C33 铝合金管道的现场焊接 高中华 (1005)
- C34 P+T 焊接技术在薄壁不锈钢容器上的应用 陶彦文 朵元才 张建晓 吕龙 徐红 (1008)
- C35 RPV 顶盖 J 型焊缝自动 TIG 焊接技术研究 吴佳 肖鹏 刘云飞 (1013)
- C36 薄壁不锈钢换热管管头的焊接 汪伟 陈禹 (1019)
- C37 国产 2.25Cr1Mo0.25V 钢焊接热影响区粗晶区的再热裂纹敏感性评价方法研究
..... 黄宇 徐驰 陈进 刘长军 陈建钧 张莉 (1023)
- C38 应变强化 S30408 焊接接头力学性能研究 丁会明 江城伟 陆群杰 (1031)
- C39 杂质元素对 R407C 焊条韧性影响的研究 王庆江 徐锴 陈佩寅 张建晓 王志刚 (1037)
- C40 临氢高温高压反应器用 12Cr2Mo1R 钢埋弧焊材的开发与工程应用
..... 冯伟 徐锴 张庆素 胡晓波 (1045)
- C41 稳压器安全阀接管安全端异种金属焊缝残余应力的研究 张倩 刘长军 (1054)
- C42 基于元素扩散的 316L/BNi-2 钎焊接头残余应力数值模拟分析
..... 段鹏洋 汪保安 周恂彦 涂善东 (1060)
- C43 热输入对 CF-62 钢焊缝补焊残余应力的影响 胡泽训 赵建平 贾文婷 (1068)

- C44 反应堆压力容器内环形件焊接残余应力数值模拟 孙少南 于敦吉 张 喆 陈 旭 (1078)
- C45 基于维氏硬度与压痕实验的 X70 管线钢焊接接头力学性能评定 王宇扬 王 晶 (1087)
- C46 E2209 双相不锈钢堆焊层组织分析 邱媛媛 贺爱姣 包广华 吴道文 (1095)

D 使用管理

- D1 核电聚乙烯管电熔接头相控阵超声检测声场的数值模拟 侯东圣 秦胤康 郑津洋 (1104)
- D2 TOFD 检测扫描面盲区的讨论 沈 威 刘毅勇 (1112)
- D3 板材内部裂纹的无损检测工艺探讨 沈 威 刘毅勇 陈明华 (1117)
- D4 RFCCU 反应再生系统外壁超温的热红外检测与原因分析 马云飞 马丽涛 (1126)
- D5 管道内检测装置中 Nd-Fe-B 永磁体磁性分布研究 宋 盼 王少军 任 彬 浦 哲 (1135)
- D6 在役过程大型原油储罐的检测关键技术
..... 徐如良 肖 宇 陈 炜 关卫和 陶元宏 蒋金玉 (1142)
- D7 工作周期时长对铬钼钢焦炭塔变形影响的在线试验研究
..... 朱金花 张绍良 戴兴旺 梁文彬 董 杰 (1149)
- D8 关于热壁加氢反应器安全状况等级评定的探讨
..... 缪春生 王志成 郭培杰 董文利 郑逸翔 (1155)
- D9 大型石油储罐罐区管理中基于风险的检验和检测监测技术综合应用
..... 徐如良 肖 宇 陈彦泽 (1161)
- D10 高压大口径环锁型快开盲板安全联锁功能研究 罗 凡 陈伟忠 (1168)
- D11 某弯头爆裂事故原因分析 张 良 杨锋平 罗金恒 (1173)
- D12 CFB 锅炉省煤器悬吊管泄露失效分析 亓 婧 单广斌 陈文武 刘小辉 (1180)
- D13 胺处理再生塔底重沸器返塔管线腐蚀失效分析 刘小辉 (1187)
- D14 X80 管线钢管焊缝泄漏失效分析 邵晓东 戚东涛 魏 斌 李厚补 (1195)
- D15 干燥机的腐蚀失效分析 李贵军 单广斌 刘小辉 (1202)
- D16 一台焊接板式换热器泄漏原因分析 沈建民 杨 福 (1207)
- D17 氧气平衡罐破裂失效原因分析 石生芳 左延田 (1213)
- D18 232 起汽车罐车泄漏事故特征分析及对策研究 薛小龙 (1218)
- D19 压力容器用 Q345R 受火后拉伸性能的试验研究 左延田 石生芳 薛小龙 (1223)
- D20 氨检漏现行标准的探讨 常 佳 钟玉平 张爱琴 (1228)



材料、断裂力学、 腐蚀

大型贮油及燃料油路罐用高强度12Mn17V2R的研究

丁家祥 魏家祥
燕山大学
摘要: 介绍了12Mn17V2R高强度钢的研究背景、化学成分、力学性能、焊接性能、断裂力学性能、腐蚀性能、疲劳性能、无损检测性能、应用前景等。

关键词: 12Mn17V2R; 高强度钢; 断裂力学; 腐蚀; 疲劳; 无损检测

1. 引言

Development of 12Mn17V2R High Strength Steel for Large Oil Storage Tanks

Abstract: This paper introduces the research background, chemical composition, mechanical properties, welding performance, fracture mechanics performance, corrosion performance, fatigue performance, non-destructive testing performance, and application prospects of 12Mn17V2R high strength steel.

Keywords: 12Mn17V2R; High strength steel; Fracture mechanics; Corrosion; Fatigue; Non-destructive testing

1. Introduction

随着石油工业的快速发展,大型贮油及燃料油路罐的需求日益增加。12Mn17V2R高强度钢具有强度高、韧性好、焊接性能优良等特点,是制造大型贮油及燃料油路罐的理想材料。本文主要研究了12Mn17V2R高强度钢的化学成分、力学性能、焊接性能、断裂力学性能、腐蚀性能、疲劳性能、无损检测性能、应用前景等。

大型原油及燃料油储罐用高强钢 12MnNiVR 的研制

丁庆丰^{1,2} 杨宏伟¹

(1. 江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江阴 214429

2. 燕山大学亚稳材料国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

摘要 介绍了兴澄特钢生产的大型原油及燃料油储罐用高强钢 12MnNiVR 的生产工艺、实物性能及气电立焊接头性能。研究结果表明, 兴澄特钢生产的大型原油及燃料油储罐用 12MnNiVR 钢板集高强度、高韧性、高延性及优异的抗大线能量焊接性能为一体, 完全满足 100000m³ 及以上大型原油及燃料油储罐用高强钢的技术要求, 已成功应用于 110000m³ 大型原油及燃料油储罐建造。

关键词 气电立焊; 大型储罐; 高强度; 高韧性

Development of 12MnNiVR High Strength Steel for Large Oil Storage Tanks

Ding Qingfeng^{1,2} Yang Hongwei¹

(1. Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., 214429 Jiangyin

2. State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, 066004 Qinhuangdao)

Abstract Production process, mechanical properties of base metal and EGW of 12MnNiVR steel plate manufactured by Jiangyin Xingcheng special steel limited company have been introduced. The results show that the 12MnNiVR steel plate exhibited high strength, high impact toughness, high plasticity and excellent weldability with large heat input. The properties of 12MnNiVR steel plates satisfy the technical requirements for large crude oil and fuel oil storage tanks. The 12MnNiVR steel plates had been applied to the construction of the 110000 m³ crude oil and fuel oil storage tank.

Keywords gas electro welding (EGW); large oil storage tank; high strength; high impact toughness

1 前言

江阴兴澄特种钢铁有限公司(以下简称兴澄特钢)2010年投产3500mm炉卷轧机、2011年投产4300mm厚板轧机。经近5年的品种开发和市场推

广,兴澄特钢中厚板产品品种和结构不断完善,中厚板市场中兴澄品牌影响力不断提高。

随着全球能源需求越来越大,对石油需求日趋扩大。据报道2014年我国石油对外依存度接近60%,目前国内大型石化企业等均采用石油储备方式进行储油,建造100000m³及以上大型原油及燃料油储罐是主要的储油方式^[1-3]。为满足市场对大型原油及燃料油储罐用钢12MnNiVR的需求,

2013年,兴澄特钢大型原油储罐及燃料油用钢12MnNiVR通过全国锅炉及压力容器标准化技术委员会主持的技术评审,经过近2年的努力,2015年兴澄特钢中标舟山商业石油储运基地10台80000~110000m³大型原油、燃料油储罐,迄今,兴澄特钢已生产12MnNiVR/12MnNiVR-SR钢板7000余吨。

本文介绍了兴澄特钢生产的大型原油储罐及燃料油用钢板的设计原理、生产工艺,统计了已供货12~36mm厚12MnNiVR/12MnNiVR-SR钢板化学成分、实物性能,分析了该钢气电立焊焊接接头性能及微观组织。

2 技术标准及设计原理

2.1 技术标准

2.1.1 化学成分及性能要求

供货技术条件中规定了12MnNiVR钢化学成分、力学性能,具体见表1和表2。

表1 12MnNiVR钢化学成分要求 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	V	Pcm
≤ 0.15	0.15~ 0.40	1.20~ 1.60	≤ 0.015	≤ 0.005	0.15~ 0.40	0.02~ 0.06	≤ 0.24

注: $P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cr/20 + Cu/20 + Mo/15 + Ni/60 + V/10 + 5B$ (%)

表2 12MnNiVR钢力学性能要求

厚度 (mm)	R_{eL} (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	横向-20℃ KV ₂ (J)
10~18	≥490	610~730	≥17	≥100
>18-22	≥490	610~730	≥18	≥100
>22-36	≥490	610~730	≥19	≥100

由表1和表2可见,12MnNiVR钢对P、S含量、冲击韧性要求较高。

2.1.2 焊接要求

全部钢板经气电立焊(75~100kJ/cm)后,

焊接接头热影响区的冲击功平均值不低于47J(-15℃),试验方法按照NB/T 47014-2011的规定执行。冲击试样的取样位置从焊缝处上表面刨掉1~2mm作为冲击试样的上表面,冲击试样的缺口划线位置为断面浸蚀出熔合线(FL)中点向焊接热影响区方向外推1mm,或紧靠熔合线(FL)最上方,最大限度的通过焊接热影响区。

2.2 设计原理

12MnNiVR钢集高强度、高韧性、高延性和优异的抗大线能量焊接性能为一体,是目前低合金容器钢中强度、韧性要求最高的钢种之一,特别适合用于大线能量焊接,可明显提高大型原油和燃料油储罐的焊接效率和改善焊接环境。

结合GB 19189-2011和舟山商业石油储运基地大型原油及燃料油储罐对12MnNiVR/12MnNiVR-SR钢的特殊要求,兴澄特钢对该钢的成分设计、性能要求等提出了新的设计特点:利用先进的特殊洁净钢冶炼技术,严格控制杂质元素和残余元素的含量,要求 $P \leq 0.010\%$, $S \leq 0.004\%$, $[H] \leq 0.0001\%$,是国内外同类钢种要求最高的;采用厚板坯轧制,增大道次压下量,提高钢板心部性能。板坯厚度为350mm,是目前国内生产大型储罐用钢最厚规格坯料;综合考虑大型储罐不同部位用材的使用特点,提高钢板强度、韧性、塑性技术指标内控要求,强度下限值提高10MPa,冲击韧性从80J提高到120J,塑性最低值提高到19%以上,全面满足大型原油及燃料油储罐的技术要求。

3 12MnNiVR钢生产工艺

12MnNiVR钢在GB 19189-2011中明确规定是大线能量焊接用钢,且必须进行“淬火+回火”处理。因此,根据兴澄特钢先进的冶金装备和特殊洁净钢冶炼技术,确定了该钢的生产工艺:高炉铁水→铁水脱硫→氧气转炉冶炼→钢包炉精炼→真空处理→连铸→铸坯切割、清理→铸坯加热→高压水除鳞→控轧控冷→精整→淬火→回火→检验→入库、发货。

12MnNiVR钢经深脱磷、脱硫,可使杂质元素含量大大降低,其中实物可使 $P \leq 0.009\%$, $S \leq$

0.003%, [H] ≤ 0.00008%。钢水经全程 Ar 保护浇注、电磁搅拌、轻压下等连铸技术浇注成 350mm 厚连铸坯, 连铸坯低倍达到 C, 0.5~1.0 级, 中心疏松 0.5, 无中心裂纹、无角裂纹。铸坯经大吨位、大压下量轧制及 ACC 控制冷却, 充分保证了钢板心部晶粒细小、均匀。钢板再经离线“淬火+回火”, 板厚 1/4 处具有优异的强韧性匹配, 板厚 1/2 处也有优异的冲击韧性, 满足 -20℃ 下 KV_2 不低于 120J 的要求。钢板全程不采用钢丝绳而采用吸盘转运, 使钢板表面不受二次损伤, 保证了钢板具有优异的表面质量。

4 12MnNiVR 钢实物性能

兴澄特钢已供货 10 台 80000~110000m³ 大型原油及燃料油储罐用高强度钢, 总共约 7000 余吨, 厚度为 12~36mm, 一次性能合格率 99.6%。同

时, 对 36mm、23mm 厚钢进行了气电立焊焊接试验, 并测试其焊接接头力学性能。

4.1 钢板力学性能统计

图 1~图 4 列出了兴澄特钢 12~36mm 厚 12MnNiVR/12MnNiVR-SR 钢实物性能统计。

由图 1~图 4 可见, 钢板的各项性能均满足国家标准 GB 19189—2011、供货技术条件要求, 且具有高强度、高韧性和高延性的特点。

4.2 模拟焊后热处理试验

对 36mm 厚 12MnNiVR-SR 钢进行 585℃ × 190min 模拟焊后热处理试验, 400℃ 以上控制升降温速度不超过 120℃/h, 36mm 厚 12MnNiVR-SR 钢母材及模拟焊后热处理试验后力学性能结果见表 3。

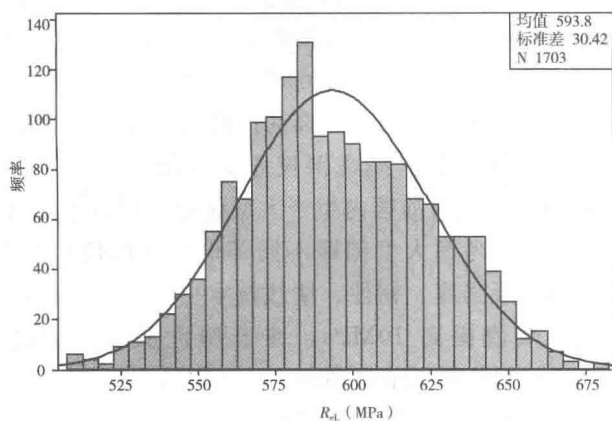


图 1 屈服强度 $R_{0.2}$ 统计

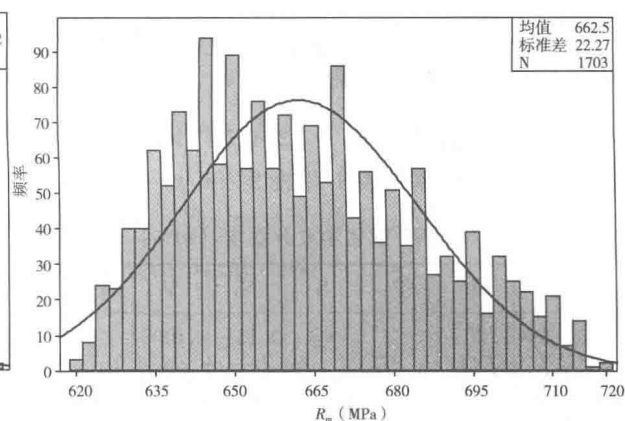


图 2 抗拉强度 R_m 统计

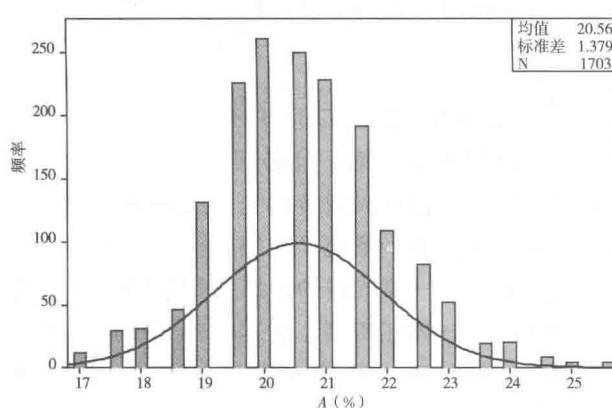


图 3 延伸率 A 统计

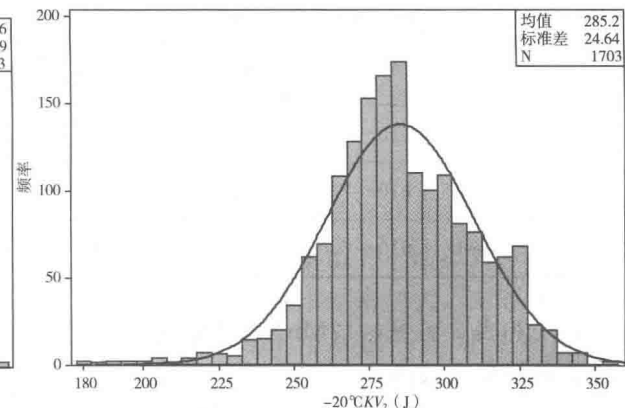


图 4 -20℃ 冲击功 KV_2 统计

表3 12MnNiVR - SR 钢力学性能要求

状态	厚度 (mm)	取样部位	R_{eL} (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	-20°C KV_2 (J)
母材	36	T/4	573 564	652 649	23.0 23.5	299 288 290
		T/2	556 562	645 647	21.5 22.5	276 259 266
SR 态	36	T/4	562 570	646 648	23.5 22.5	281 285 280
		T/2	549 563	639 640	22.0 21.0	270 251 259

由表3可见, 36mm厚12MnNiVR - SR钢经模拟焊后热处理后性能优异, 具有优异的强韧性匹配, 特别是钢板心部仍具有优异的冲击韧性, 完全满足该项目工程供货技术条件和国家标准要求。

4.3 气电立焊性能

36mm、23mm厚12MnNiVR钢板气电立焊焊接采用神户 $\phi 1.6\text{mm DW-S60G}$ 焊丝, 焊前不预热, 焊接接头力学性能试验结果见表4。

表4 接头试验结果

试板厚度 (mm)	坡口形式	线能量 (kJ/cm)	拉伸试验		-15°C KV_2 (J) 冲击试验	
			R_m (MPa)	断裂位置	焊缝	HAZ
36	对称 X形	80~86	640 645	焊缝	89 85	195 192
					93	201
23	V形	93~98	660 658	焊缝	78 101	186 198
					95	191

由表4可见, 36mm、23mm厚钢板气电立焊接头均满足该项目工程供货技术条件和国家标准要求, 并有较大富余量。

5 结论

兴澄特钢采用离线“淬火+回火”工艺生产的

大型原油及燃料油储罐用高强钢12MnNiVR具有优异的强韧性匹配, 经100kJ/cm及以下气电立焊焊接后, 该钢焊接接头仍具有优异的强韧性。该钢集高强度、高韧性、高延性和优异的抗大线能量焊接为一体, 完全满足100000m³及以上大型原油及燃料油储罐用高强钢技术要求。兴澄特钢12MnNiVR钢成功应用舟山商业石油储运基地110000m³大型原油及燃料油储罐, 已生产7000余吨, 积累了丰富的生产经验。

参考文献

- [1] 丁庆丰, 刘静, 袁桂莲, 等. 70MPa级抗大线能量焊接压力容器用钢组织和性能研究 [C]. 2011全国压力容器压力管道技术发展及使用暨新技术新产品交流会论文集, 2011: 33-36.
- [2] 陈宇. 探析我国石油储备的必要性及其发展 [J]. 化工管理, 2014 (18): 157-158.
- [3] 陈颜堂, 丁庆丰, 等. 大线能量焊接用钢模拟热影响区的组织和性能 [J]. 金属热处理, 2005 (9): 19-23.

作者简介

丁庆丰, 男, 高级工程师, 主要从事能源用钢研发。
通信地址: 江苏省江阴市滨江东路297号兴澄特钢特板研究所, 214429
手机: 13986136313
Email: xcdingqf@126.com

舞钢临氢 14Cr1MoR 钢板的研制开发

吴艳阳 赵文忠 李样兵 牛红星

(舞阳钢铁有限责任公司, 平顶山市临氢钢重点实验室)

摘要 舞钢通过长时间对 Cr-Mo 钢的基础性研究, 通过采用“电炉+炉外”精炼的方式冶炼出 P 含量不超过 0.005% 的 14Cr1MoR 钢; 采用“控轧+热处理”的生产方式成功生产出 151mm 临氢 14Cr1MoR 钢板交货态、最小模焊态、最大模焊态的力学性能均满足技术条件要求, 且有充足的富裕量。

关键词 14Cr1MoR; “控轧+热处理”

Development of the 14Cr1MoR Plate for Hydrogen Service in Wugang

Wu Yanyang Zhao Wenzhong Li Yangbing Niu Hongxing

(Wuyang Iron and Steel Co., Ltd., The Key Laboratory of Hydrogen steel in pingdingshan city)

Abstract Wugang developed 14Cr1MoR steel plate with the max content of P 0.005% by using the electric furnace refining and the application of out-of-furnace refining process technology. By using the combination technics of controlled rolling and heat treatment for pressure vessel steel, The mechanical properties of the plate not only conform to the standard, but also have Sufficient surplus.

Keywords 14Cr1MoR; Combination technics of controlled rolling and heat treatment

0 前言

低碳 Cr-Mo 钢具有较高的抗蠕变性能、优异的抗氧化性和氢脆性能、优良的加工工艺性能及经济性, 已被广泛应用于石油裂解、煤气化、煤液化^[1]等能源深加工领域, 14Cr1MoR 类钢属于 GB 713—2014 的钢种, 同时也是 Cr-Mo 钢的一个代表性品种, 是世界各国普遍使用的热强钢和抗氢用钢, 被广泛用于制造火电设备、核电设备及与氢相接触的石油、化工、煤转化设备等大型装置。目前我国煤制油行业发展迅速, 新的项目投产及设备改

造项目较多, 对此钢的需求量较大。由于该钢工作环境处于高温、高压、与氢接触, 服役条件十分恶劣, 因此设计技术条件一般要求该钢具有较高的强度、良好的塑性和韧性、优良的焊接性能和抗回火脆化性能。同时随着国内石化行业的发展, 设备逐渐向大型化发展, 因此开发大厚度的临氢 14Cr1MoR 钢板对国内石化、煤化工行业的发展具有较大的推进作用。舞钢作为国内首家宽厚板科研基地, 依托多年 Cr-Mo 钢生产经验, 积极进行了大厚度临氢 14Cr1MoR 钢板的研发。

结合国内某大型化工项目, 进行了 151mm 临氢 14Cr1MoR 的试制, 钢板尺寸为 151mm × 2320mm × 8720mm。

结合目前国内设计院的设计要求，制定了大厚度（熔炼分析）应符合表1、表2的规定，力学性能符合表3的规定。钢的化学成分应符合表3的规定。

表1 化学成分 (wt%)

项目	C	Si *	Mn *	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
熔炼分析	0.05~0.15	0.50~0.80	0.40~0.65	≤0.007	≤0.007	1.15~1.50	≤0.30	≤0.20	0.45~0.65
产品分析	0.04~0.15	0.46~0.84	0.35~0.73	≤0.007	≤0.007	1.15~1.50	≤0.30	≤0.20	0.45~0.70

表2 化学成分 (续) (wt%)

项目	H	As	Sn	Sb	J 系数	X 系数
熔炼分析	≤2ppm	≤0.010	≤0.010	≤0.0025	≤100	≤15ppm
产品分析	≤2ppm	≤0.010	≤0.010	≤0.0025	≤100	≤15ppm

注：1. X 系数 = $(10P+5Sb+4Sn+As) \times 10^{-2} \leq 15 \times 10^{-6}$ ，式中元素以 $\times 10^{-6}$ 含量代入，如 0.01% 应以 100×10^{-6} 代入；

2. J 系数 = $(Si+Mn) \times (P+Sn) \times 10^4 \leq 100$ ，式中元素以其百分含量代入，如 0.15% 应以 0.15 代入。

表3 力学性能要求

拉伸试验 (横向)					冲击试验 (横向)		冷弯试验 180°
R_m (MPa)	R_{eL} (MPa)	A (%)	Z (%)	温度/°C	冲击功 (J)		
510~670	≥300	≥19	≥45	-20	不小于 68 (均值) 48 (单值)		D=3a

模拟焊后热处理工艺

试样的模拟焊后热处理制度按如下工艺执行：

最大模焊 Max PWHT: $(690+14-10)^\circ\text{C} \times (20+0.5) \text{ h}$;

最小模焊 Min PWHT: $(690+14-10)^\circ\text{C} \times (6+0.5) \text{ h}$;

350°C 装出炉，模焊升降温速率按不超过 55°C/h 控制。

1 技术措施

1.1 相变点的测定

使用 DIL 805A/D 型全自动高温相变仪，按 YB/T 5127 标准膨胀法测定出该钢的临界点，其结果如下： $A_{c1}766^\circ\text{C}$ ； $A_{rm} 643^\circ\text{C}$ ； $A_{c3}863^\circ\text{C}$ ； $A_{r3}782^\circ\text{C}$ 。根据相变点测定结果，结合多年 Cr-Mo 钢生产经验，确定 14Cr1MoR 钢板最佳的热处理范围 900~950°C。

考虑到 14Cr1MoR 交货态的组织是贝氏体组织，同时贝氏体组织是在贝氏体铁素体基体上分布着渗碳体、奥氏体、马氏体等相的复合组织^[2]。而后期性能检验前需要对试样进行长时模焊热处理，因此贝氏体基体上的马奥岛组织会产生分解，如何保证钢板长时模焊处理后性能稳定性成为控制的重点，在组织上应确保经最大模焊处理后，钢板晶界处及晶内不产生棒状或片状析出物为宜。因此在成分设计及工艺制定过程中应重点控制钢中 C 化物形成元素的含量及分布状态，确保在后续模焊处理过程中不形成粗大、片状的 C 化物影响钢板的冲击韧性^[2-4]。

1.2 研发难点及工艺措施

针对大厚度临氢 14Cr1MoR 钢的生产难点确定了相应的工艺措施：

表面裂纹：Cr-Mo 钢合金元素含量高、该钢在冶炼及后续轧制过程中极易产生因温度不均、冷速过快而产生温度应力及组织应力，另外在轧制冷却过程中 AlN、Nb (CN) 等质点易在奥氏体晶界沉淀，增加了晶界脆性及裂纹的敏感性，易使钢锭