

焊接热影响区液态金属致脆失效分析

江涛, 关凯书

(华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘要:某公司的304不锈钢管道在焊接过程中发生了开裂, 裂纹位于焊接热影响区。在排除焊接对失效的影响后, 对该管道进行了化学成分、力学性能、晶间腐蚀检测, 都未发现异常。通过模拟焊接工况的方法, 在失效管正常位置制备新裂纹。对新裂纹进行宏观观察、金相分析、扫描电镜分析以及EDS能谱分析, 推断出原焊接热影响区开裂的原因为液态金属致脆。管道表面加工过程中采用了含锌涂料, 在焊接过程中, 表面熔化的液态锌渗透到管材内部, 使得材料晶界弱化。在焊接热影响区, 受焊接热应力的作用, 裂纹在晶界处起裂并最终导致该管道沿晶开裂。

关键词:304 不锈钢; 焊接热影响区; 液态金属致脆; 失效分析

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20192834

中图分类号: TG441.7; TG111.92

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2021)15-0158-04

Failure Analysis of Liquid Metal Embrittlement in Welding Heat-Affected Zone

JIANG Tao, GUAN Kaishu

(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: A 304 stainless steel pipe of a company cracked during welding. Cracks were located in heat-affected zone of welding. Eliminating the influence of welding, no abnormalities were found after the chemical composition, mechanical properties and intergranular corrosion tests of the pipeline. By the simulation of the welding condition, new cracks in normal position of failed pipe were prepared. Macroscopic observation, metallographic analysis, scanning electron microscope and energy spectrum analysis of new cracks were carried out. It is deduced that liquid metal embrittlement is the main cause of cracking of original welding heat affected zone. The Zn-containing coating is used in the surface processing of pipeline. During welding, molten Zn penetrates into the interior of the pipe, which leads to the weakening of grain boundary. In the heat affected zone of welding, due to welding thermal stress cracks initiate at grain boundaries and eventually lead to intergranular cracking of pipe.

Key words: 304 stainless steel; heat-affected zone; liquid metal embrittlement; failure analysis

在300系列奥氏体不锈钢中,304不锈钢因其优异的耐高温性能和耐腐蚀性能而在制造行业广泛使用,包括核电、化工、食品、石油炼化等领域。尽管奥氏体不锈钢具有出色的抗蚀性能,但在含特殊腐蚀性介质的环境中仍然容易受到影响,例如点蚀、晶间腐蚀和应力腐蚀开裂(SCC)。此外在焊接接头处,由于焊接高温下组织的变化和焊接残余应力的影响,焊接接头腐蚀十分常见,其中临近焊缝的热影响区(HAZ)往往作为最先起裂的区域。这是由于焊接

过程中的热输入,热影响区内发生晶粒长大。相比母材和熔合区的组织,热影响区的粗晶组织的耐蚀性能较差。尽管有关热影响区失效的案例已被广泛地研究报道,许多复杂环境下的腐蚀案例仍然有待研究。

某公司的304管道尚未投入使用,在焊接过程中出现了裂纹,裂纹分布在热影响区。对热影响区进行初步的化学成分、力学性能、晶间腐蚀检测,结果都合乎标准,未能发现确切的开裂原因,依据裂纹尖端的微观金相观察结果,初步推测是因为裂纹仅扩展至管壁浅表面,无法得到足够且有效分析依据的缘故。为探明该管焊接热影响区开裂的原因,对出现裂纹的管道母材部分进行了处理。即在管端施加应力并加热,自然冷却,模拟了热影响区的工作情况。得到了与原焊接裂纹相近的人为制备裂纹,且宏观上更为显著,便于对原焊接热影响区的失效原因进

收稿日期:2019-09-27

作者简介:江涛(1994-),男,福建漳州人,硕士研究生,主要研究方向:微试样测试技术、过程设备失效分析与预防;电话:15892009132;

E-mail:jiangtao4311@163.com

通讯作者:关凯书(1962-),男,黑龙江人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:承压设备结构完整性、微试样测试技术、过程设备失效分析与预防;电话:13166213046;

E-mail:guankaishu@ecust.edu.cn

行分析。

1 理化检验及结果

原裂纹与人为制备的裂纹如图1所示。

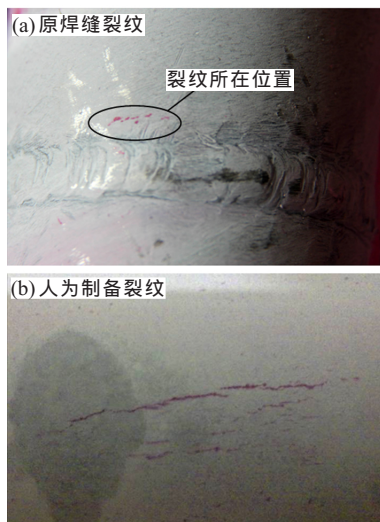


图1 裂纹宏观照片
Fig.1 Macro photograph of cracks

1.1 金相分析

从管道上人为新制备的裂纹上取样,分别选取较粗的主裂纹与附近的较短裂纹的裂尖观察。管壁母材为奥氏体组织,组织形貌未发现明显异常。其中,主裂纹的金相照片如图2所示,主裂纹沿晶界扩展,裂纹上有沿晶二次裂纹,为典型的沿晶开裂。主裂纹附近,组织在近外壁附近有许多平行的浅表的沿晶裂纹,说明了外壁附近都有晶界弱化的现象。而近壁面浅表裂纹长度远低于主裂纹的原因,是由于应力在主裂纹上释放,抑制了附近较浅裂纹的扩展。同时,在金相显微镜下,主裂纹近外壁区域上还出现了沿晶界发亮现象,图3上标识出了发亮的晶界,推测是因为晶粒间存在夹杂物。另一处从较短裂纹取样的金相照片见图4。与主裂纹相比,第二处裂纹的扩展深度较低,张开角度较小,同样可以明显观察到



图2 主裂纹尖端形貌
Fig.2 Morphology of main crack tip

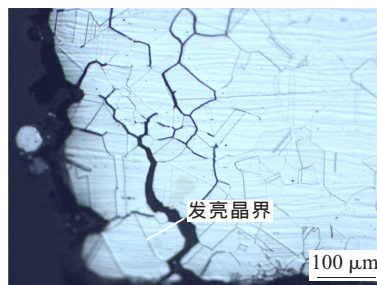


图3 近外壁附近晶界特征
Fig.3 Grain boundary characteristics near the outer wall

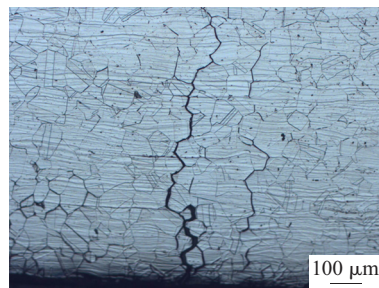


图4 短裂纹尖端形貌
Fig.4 Morphology of shorter crack tip

裂纹沿晶界扩展,体现了晶界弱化的特征。

1.2 扫描电镜分析

在金相照片上观察管外壁附近晶界上有夹杂物的特征。为观察晶界上的夹杂物,选取主裂纹沿壁厚打开。在SEM扫描电镜下对得到的裂纹断口进行观察。在电镜下,断口整体平整,无腐蚀产物膜覆盖的痕迹。经局部放大,在裂纹断口上观察到了“冰糖状”形貌,如图5所示,为典型的沿晶开裂特征。与金相分析结果类似的是,在晶粒间同样观察到了二次裂纹。晶界面上光滑无腐蚀产物覆盖,说明晶界是在短期加热的过程中发生了显著的弱化,导致该管道母材严重的脆化。正常情况下,奥氏体不锈钢短时间的加热,不会发生如此显著的组织脆化劣化。推测是在加热处理以及原焊接失效的过程中,腐蚀性的介质在晶界上积聚导致的。

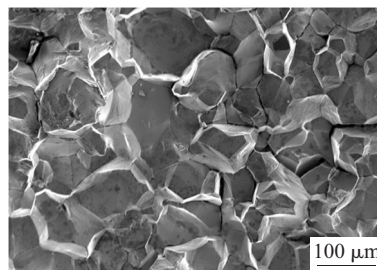
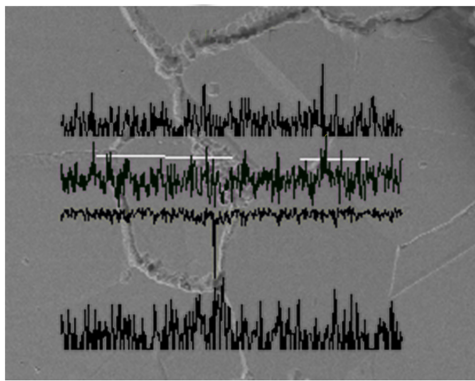


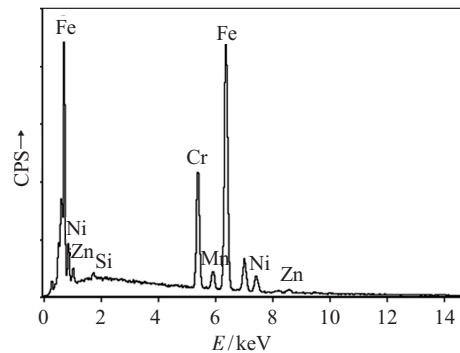
图5 裂纹断口SEM照片
Fig.5 SEM photograph of crack fracture

1.3 能谱分析

根据微观金相组织观察和电镜观察结果,近壁面的晶粒间分布有夹杂物,考虑是晶界上的夹杂物导致了裂纹的萌生。为验证这一推测并分析导致晶界弱化的夹杂物的组成,利用EDS能谱仪对裂纹附近的晶界位置进行了元素成分线扫描分析,分析结果如图6(a)所示。根据线扫描中Fe-Zn元素的强度峰值图,开裂位置附近母材上含有Zn。在能谱仪扫描掠过晶界时,峰值图出现了Fe含量的下降和Zn含量的升高。通过对该点扫描以准确测定其Zn的含量,如图6(b)所示。Zn含量为3.39wt%,证实了晶界上确实有Zn存在。线扫描与点扫描结果证实了母材上有Zn相在晶界处富集。而Zn主要分布在晶粒间的原因,是由于Zn的熔点远低于母材,Zn在管壁受热后熔融液化,液态下Zn在Zn-Fe间具有较高的扩散速率,且Zn优先沿晶界向母材扩散,进而导致液态金属致脆。



(a) 线扫描检测结果



(b) 点扫描检测结果

元素	wt%	at%
Si	0.37	0.72
Cr	18.55	19.75
Mn	1.18	1.19
Fe	68.25	67.67
Ni	8.28	7.81
Zn	3.39	2.87

图6 能谱检测结果

Fig.6 Test results of energy spectrum

求,一般情况下奥氏体不锈钢不会在短时间内发生如此严重的劣化开裂。因此奥氏体不锈钢快速锌致开裂过程是决定热影响区开裂失效的根本原因。

2.1 液态金属致脆

液态金属致脆(LME)宏观上指正常的延性固体金属与低熔点的液态金属(如Li、Zn、Al、Mg等)接触后,固体金属的断裂强度与伸长率显著下降,导致金属发生脆化^[1-2]。与常规环境腐蚀不同,LME不会导致固体金属的腐蚀失重。微观上,LME裂纹是由于高温下液态金属及合金在固体金属表面形成液膜,当受到拉应力时,液态金属沿多晶固体金属的晶界快速渗透进入其内部组织而在液态金属渗透区形成的一个或多个断裂裂纹。裂纹快速地沿晶扩展导致脆性断裂。LME裂纹的扩展速率极快,极易导致

2 分析与讨论

经过以上对高温拉伸人为制备裂纹的理化检验,进而分析探究焊缝热影响裂纹产生的原因。光学显微镜下观察,裂纹为沿晶扩展。在外壁附近,晶粒间有发亮的夹杂物。扫描电子显微镜下,裂纹断口呈“冰糖状”的沿晶开裂形貌。之后利用EDS能谱仪分析的结果表明,在裂纹附近区域观察到有Zn在晶界上积聚。而此前在对热影响区裂纹分析中,母材的化学成分未能检测到明显的Zn,说明Zn来源于管外。在焊接过程中,在热影响区的热输入和应力作用下,Zn沿晶界向管壁母材扩散。而原焊缝热影响区裂纹仅扩展至管外壁近表面,化学成分分析过程中母材心部的微量Zn难以检测到。同理对原热影响区裂纹母材的晶间腐蚀检测和力学性能分析也都未能取得有效的结果。同时考虑到未加热拉伸前管母材的化学成分、力学性能均符合要求,同时焊接工艺也符合要

灾难性的脆性断裂,因此受到钻井、飞机设计、汽车制造等领域的广泛关注。

2.2 锌致裂纹形成机理

由于锌电极电位低于铁,锌在与铁接触时,优先于铁发生电离。含锌涂层的阳极牺牲保护,对钢管起到腐蚀防护的作用,钢管的表面常常会使用含锌的涂料。而纯锌的熔点仅为419.53℃,文中出现失效的焊接热影响区温度可达700~800℃。高温熔融的液锌与固体不锈钢钢管表面接触,构成了LME发生的两相条件。在焊接热影响区温度下,涂层内的Zn与铁发生包晶反应,782℃以下,Zn液冷却析出 α -Fe(Zn)相和 Γ (Fe₃Zn₁₀)相^[3]。由于 Γ (Fe₃Zn₁₀)相在裂纹上是以孤岛的形式存在, α -Fe(Zn)相作为锌扩散通道。这里用 α -Fe(Zn)薄层开裂模型描述Zn致脆化

的过程。 α -Fe(Zn)相的细小晶粒在晶界成核并长大。Zn在涂层附近的基体表面扩散并富集,导致 α -Fe(Zn)晶粒生长,在液态锌与不锈钢晶界表面形成 α -Fe(Zn)固态层。受到应力作用时,表面的 α -Fe(Zn)合金强度远低于奥氏体基体相,基体晶界很容易变形产生裂纹。与液态锌接触的奥氏体基体晶界作为Zn的扩散路径,同时边界区也转变为 α -Fe(Zn)。这进一步加强了Zn的晶界扩散,因为Zn在 α -Fe(Zn)中的扩散率要高于奥氏体和 Γ (Fe₃Zn₁₀)相,随着奥氏体晶界逐渐被低强度的 α -Fe(Zn)所取代,在该扩散转变区产生沿晶界裂纹。当扩散转变区的裂纹形成后,Zn液通过毛细作用进入奥氏体基体内部,由于裂纹尖端Zn浓度较低,在浓度梯度下Zn向裂纹尖端扩散,使得裂纹尖端晶界发生 α -Fe(Zn)转化,晶界被弱化直至不能承受尖端局部应力时,裂纹开动。扩散转变阶段和 α -Fe(Zn)合金开裂阶段的反复进行,使得裂纹持续扩展^[4-6],导致了焊接热影响区裂纹的产生。而随着焊接完成,热影响区逐渐冷却至室温,裂纹晶界上的 α -Fe(Zn)相冷却转变为 Γ (Fe₃Zn₁₀)+ α -Fe(Zn)相,裂纹扩展过程结束。


3 结论与建议

(1) 304 不锈钢焊接热影响区开裂是由于液态金属锌致脆导致的。管壁表面加工过程中使用了含锌涂料,焊接热影响区受工作温度和热应力共同作用下,管道表面的锌沿晶界渗入管壁内部,弱化固体金属晶界,致使母材发生脆化,最终导致裂纹从外壁起裂。

(2) 由于锌的熔点远低于母材,在母材焊接期间,低熔点的金属锌易高于熔点形成液相。在应力作用下,锌向母材扩散的速率较快。因此,通过降低温度或减小高温下停留时间可以避免严重的液态金属致脆失效。建议在保证焊接接头质量的前提下尽量降低焊接过程中的热输入。

(3) 从液态金属来源上避免失效是最有效的途径,建议更换为不含Zn和Cu的涂料。

参考文献:

- [1] Bauer K D, Todorova M, Hingerl K, et al. A first principles investigation of zinc induced embrittlement at grain boundaries in bcc iron[J]. Acta Materialia, 2015, 90:69-76.
- [2] 刘树勋,李培杰,曾大本. 液态金属腐蚀的研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(5):275-278.
- [3] Lee Hyungsoo, Jo Min Chul, Seok Su Sohn, et al. Microstructural evolution of liquid metal embrittlement in resistance-spot-welded galvanized TWIP-Induced Plasticity (TWIP) steel sheets [J]. Materials Characterization, 2018, 147: 233-241.
- [4] Kang Jee-Hyun, Kim Doyub, Kim Dong Hwi, et al. Fe-Zn reaction and its influence on microcracks during hot tensile deformation of galvanized 22MnB5 steel [J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 357:1069-1075.
- [5] Cho L, Kang H, Lee C, et al. Microstructure of liquid metal embrittlement cracks on Zn-coated 22MnB5 press-hardened steel[J]. Scripta Materialia, 2014, 90-91:25-28.
- [6] Razmpoosh M H, Biro E, Chen D L, et al. Liquid metal embrittlement in laser lap joining of TWIP and medium-manganese TRIP steel: The role of stress and grain boundaries [J]. Materials Characterization, 2018, 145: 627-633. 

(上接第157页)

[20] Mintz B, Crowther D N. Hot ductility of steels and its relationship to the problem of transverse cracking in continuous casting [J]. International Materials Reviews, 2010, 55 (3):

168-196.

[21] 许孟春,李德军,张宁. 连铸板坯角部横裂纹产生原因与控制[J]. 鞍钢技术, 2015(2):9-14. 

推广会

中国锻压协会举办“大型锻件在线视觉测量系统”技术成果推广会

2021年7月7日,由中国锻压协会组织举办的“大型锻件在线视觉测量系统”技术成果推广会在京成功召开。推广会由中国锻压协会张金秘书长主持,清华大学、北京科技大学、北京钢铁研究总院、航天科技集团、中国船舶重工集团、中国一重、中国二重、中信重工等20余位院校、企业代表参会。

会议上,行者科技(沈阳)有限公司介绍了具有自主知识产权的“大型锻件在线视觉测量系统”。该系统能够克服大型自由锻造机生产现场高温、高振动、粉尘严重的特殊环境,利用激光结构光技术,实现了热态锻件在线尺寸的精度测量,为热态大型锻件实现数字化制造提供了基础条件。该技术目前已经在中钢集团邢台机械轧辊有限公司得到成功应用,经济、社会和环境效益显著。

与会专家、代表对该“大型锻件热态在线测量”给予了高度评价,认为该系统的成功应用将极大推动我国大型锻件制造业向尺寸精准控制、工艺过程数字化管控迈进,为锻造行业实现降本增效、绿色低碳制造做出卓越贡献。并希望行者科技与大锻件制造企业一起扩展对复杂锻件视觉测量技术的研发,加快“大型锻件在线视觉测量系统”的产业化步伐,为我国锻造行业在线测量技术长足发展作出更大的贡献。