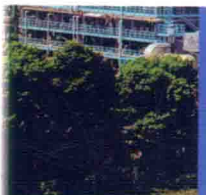


石化设备 典型失效案例分析

贾国栋 王 辉 杜晨阳 主编



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

石化设备典型失效案例分析

贾国栋 王 辉 杜晨阳 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书精选出石化行业承压设备和动设备近 40 个典型失效案例,涉及制氢转化炉、乙烯裂解炉、气化炉、电站锅炉、工业管道、换热器、反应器、塔、压缩机转子叶片等。针对失效分析思路、失效件的宏观和微观形态、失效原因和机理以及预防控制措施进行了详尽的介绍,并重点对同类设备的失效规律进行探讨性的总结。

本书对从事石化及其他行业的失效分析技术人员具有一定的启发性及参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

石化设备典型失效案例分析 / 贾国栋, 王辉, 杜晨阳
主编. —北京: 中国石化出版社, 2015. 7
ISBN 978-7-5114-3233-9

I. ①石… II. ①贾… ②王… ③杜… III. ①石油
化工-化工设备-失效分析-案例 IV. ①TQ050.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 091588 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

710×1000 毫米 16 开本 34.75 印张 655 千字

2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

定价:120.00 元

《石化设备典型失效案例分析》

编 委 会

主 编：贾国栋 王 辉 杜晨阳

编委会(按姓氏笔划排序)：

王建军 卢荔民 史 进 刘 畅

安永明 杨瑞平 李思华 何承厚

汪剑波 宋晓江 陈照和 金 强

周 敏 赵保成 姜海一 曹迺炜

谢国山 裴彦达 穆澎淘

前 言

近年来,我国石化行业发展迅猛,各种与石化设备相关的腐蚀失效时有发生,由于其内部盛装高温、高压、有毒、易爆介质,承压设备一旦失效,容易导致有毒介质扩散或引发爆炸事故,不仅直接造成人员财产损失,还会带来更为严重的环境和社会问题。通过失效分析找到失效原因,不仅可以避免相同的失效事故重复发生,同时也可作为设计修正的反馈,并促进相关标准的完善和技术进步。

石化设备发生失效的原因错综复杂,失效形式多种多样,需要失效分析工作者具备较高的专业技术水平以及丰富的经验。本书编者在多年从事石化设备失效分析研究工作的基础上,精选出近40个典型失效案例加以总结分析,案例涉及制氢转化炉、乙烯裂解炉、气化炉、电站锅炉、工业管道、换热器、反应器、塔、压缩机转子叶片等。本书内容详实,对失效分析思路、样品选取保存、失效件的宏观和微观形态、失效原因和机理分析以及预防控制措施等均进行了详细的描述,并着重于对同类设备的失效规律进行探讨性的总结。

本书中所提及使用相关法规、标准是按照当时生产制造或检验调查的现行法规、标准选用的,由此给读者带来的不便,请广大读者见谅。

本书适用于从事石化及其他行业的失效分析技术工作者、企业设备管理人员,同时也供有关专业人员学习使用。

本书涉及内容广泛、专业性强,由于编者水平所限,书中难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 加热炉失效案例	(1)
第1节 制氢转化炉炉管开裂失效分析	(1)
第2节 制氢转化炉下尾管断裂失效分析	(20)
第3节 裂解炉对流段盘管泄漏原因分析	(41)
第4节 乙烯装置裂解炉炉管失效分析	(48)
第5节 乙烯裂解炉新、旧炉管焊接开裂问题分析	(52)
第6节 合成氨厂渣油气化炉过热壳体安全性分析	(61)
第7节 小结——高温炉管腐蚀	(81)
第2章 锅炉四管失效案例	(96)
第1节 锅炉水冷壁管氢腐蚀失效案例分析	(96)
第2节 锅炉水冷壁管爆管失效案例分析	(102)
第3节 辅锅爆管失效案例分析	(120)
第4节 小结——锅炉管道爆管原因分析	(128)
第3章 石化管道失效案例	(144)
第1节 奥氏体不锈钢管道泄漏成因分析	(144)
第2节 苯酚丙酮装置蒸汽管线失效分析	(149)
第3节 超高压蒸汽线热偶支管断裂失效分析	(156)
第4节 石脑油管线泄漏失效分析	(175)
第5节 不锈钢管道泄漏成因分析	(194)
第6节 焦化车间管道泄漏成因分析	(210)
第7节 蒸馏装置减底渣油管线失效分析	(215)
第8节 加氢裂化装置空冷器出口管道鼓包失效分析	(227)
第9节 制氢装置中变气不锈钢管线失效分析	(244)
第10节 瓦斯管线开裂失效分析	(268)

第 11 节 小结——管道腐蚀	(274)
第 4 章 换热器失效案例	(293)
第 1 节 蒸发器泄漏失效分析	(293)
第 2 节 再沸器下管箱失效分析	(297)
第 3 节 连续重整装置再接触冷冻器管程接管失效分析	(310)
第 4 节 换热管爆管失效分析	(317)
第 5 节 粗苯酚塔再沸器裂纹成因分析	(322)
第 6 节 丙烯急冷器壳体开裂失效分析	(332)
第 7 节 小结——换热器失效原因分析	(345)
第 5 章 其他石化静设备失效案例	(356)
第 1 节 环氧乙烷精制塔开裂失效分析	(356)
第 2 节 氧气过滤器爆炸失效分析	(360)
第 3 节 天然气处理厂干燥器分离器失效分析	(366)
第 4 节 小结——静设备失效原因分析	(378)
第 6 章 石油化工动设备失效案例	(388)
第 1 节 合成氨装置 103-JT 转子叶片断裂原因分析	(388)
第 2 节 新氢压缩机入口缓冲罐接管开裂失效分析	(404)
第 3 节 氢气压缩机连杆螺栓断裂失效分析	(410)
第 4 节 压缩机密封用单向阀开裂失效分析	(415)
第 5 节 小结——动设备失效原因分析	(430)
第 7 章 煤化工设备失效案例	(443)
第 1 节 氨加热器 U 形管束爆管失效分析	(443)
第 2 节 蒸汽轮机凝汽器管束失效分析	(452)
第 3 节 煤气化装置变换气管道失效分析	(462)
第 4 节 煤气化装置预变换炉出口管线弯头失效分析	(484)
第 5 节 煤气化炉合成气冷却器氮气吹扫管线失效分析	(507)
第 6 节 煤气化炉喷嘴冷却盘管失效分析	(519)
第 7 节 小结——煤化工设备失效原因分析	(533)

第 1 章 加热炉失效案例

第 1 节 制氢转化炉炉管开裂失效分析

1 炉管开裂背景

根据某炼油厂提供的资料，该厂制氢转化炉辐射段出口集合管总集合管与分集合管焊口发生开裂。该管道自 2000 年投产以来，一直没有开车，自 2007 年 8 月 11 日第一次开车，已有 11 次开停车记录，见表 1-1-1，装置实际运行时间共 580 天，总计约 13968h。该管道材质为 Incoloy 800H，开裂部位正常运行温度 805℃，操作压力 2.5MPa，介质为转化气(主要组分有 H₂、CO、CO₂、CH₄等)。

表 1-1-1 第一作业部天然气制氢装置开停车统计

次数 项目	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次
开工时间	2007-8-11	2007-8-19	2007-8-22	2007-8-30	2007-11-30	2008-1-14
停工时间	2007-8-17	2007-8-22	2007-8-22	2007-11-17	2008-1-14	2008-6-23
停工原因	分水罐弯头漏	FV4203 孔板漏	法兰材质不合格	调度安排	PSA 故障停工	调度安排
次数 项目	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	第 11 次	
开工时间	2008-7-4	2009-2-15	2009-7-7	2009-7-16	2009-9-13	
停工时间	2009-2-9	2009-3-14	2009-7-10	2009-8-16	2009-9-20	
停工原因	调度安排	调度安排	转化炉 炉管裂纹	转化炉 炉管裂纹	转化炉 炉管裂纹	

2009 年 7 月初该管道总集合管与分集合管焊口(东侧焊口)发生开裂，该厂采取了紧急停车后堆焊修复的措施；同年 8 月 16 日此焊口再次发生开裂，同时对称位置的西侧焊口也发生开裂，同样采取了紧急停车后堆焊修复的措施，并将运行温度从 805℃降至 790℃；管道修复后投用仅一周时间，东、西两道焊口又发生开裂，开裂形貌见图 1-1-1，最后一次开裂导致装置紧急停车，将东侧失效管道取下并沿裂纹剖开后形貌见图 1-1-2。为了防止类似事故的再次发生，对管

道的更换和使用加以指导，须对截取下来的管段进行失效分析，判定焊口开裂的原因。因为前两次开裂部位经过补焊后无法分析，所以只针对最后一次焊口开裂进行分析。



(a) 东侧焊口开裂形貌



(b) 西侧焊口开裂形貌

图 1-1-1 焊口开裂形貌

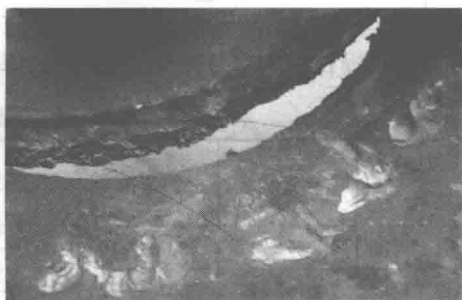


图 1-1-2 东侧焊口裂纹打开形貌

2 检验及试验分析

本次失效分析主要是通过宏观检查、壁厚测量、化学成分分析、硬度测试、低倍组织观察、金相分析、断口分析、能谱分析、冲击试验、常温拉伸试验、高温拉伸试验、管系应力校核等手段，综合判断焊口开裂原因。

(1) 宏观检查

总集合管和分集合管对接焊口示意图见图 1-1-3，二者以三通形式对焊。从图 1-1-4 来看，对接焊缝上有裂纹出现，裂纹清晰可见。裂纹出现在管段正下部，向两边延伸，裂纹的两个尖端见图 1-1-5，外部裂纹总长占对接焊口圆周总长的 60% 左右。管段外表面光滑，无明显腐蚀痕迹。从图 1-1-6 来看，基体内表面光滑，但内表面焊缝处极不平坦，有 100mm 左右长的未焊满区域，未焊满凹槽里面有裂纹出现。从图 1-1-7 来看，断口附近有塑性变形，全裂透部位不

能看到明显的起裂点，应为多源起裂，裂纹由内向外扩展。从宏观检查的结果来看，此处焊口开裂应与焊接质量问题有关。

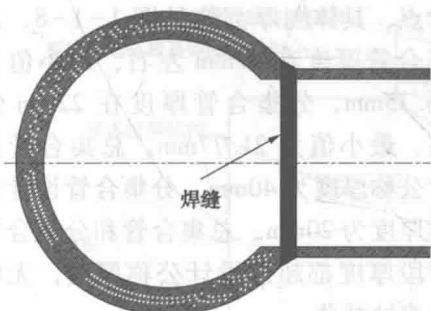


图 1-1-3 总集合管与分集合管对接焊口位置示意图

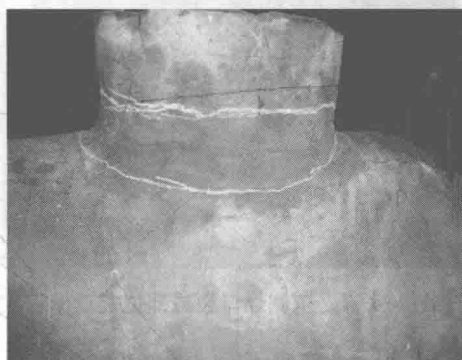
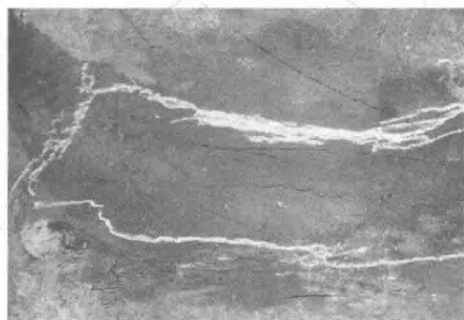
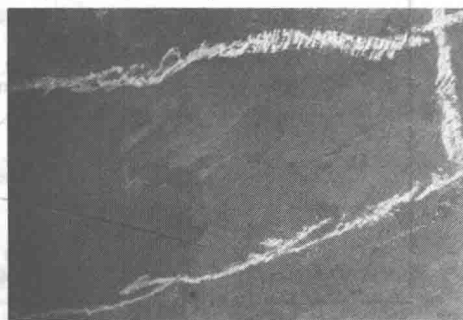


图 1-1-4 管段外部形貌



(a)



(b)

图 1-1-5 管段外部裂纹尖端



(a)



(b)

图 1-1-6 管段内部形貌



图 1-1-7 东侧焊口裂透部位宏观形貌

(2) 壁厚测量

对截取下来的管段进行测厚，总集合管两侧各取 4 个点，分集合管取 4 个点，具体测厚部位见图 1-1-8，总集合管厚度在 47mm 左右，最小值为 46.75mm，分集合管厚度在 22mm 左右，最小值为 21.77mm。总集合管设计公称厚度为 40mm，分集合管设计公称厚度为 20mm。总集合管和分集合管管段厚度都超过设计公称厚度，无明显腐蚀减薄。

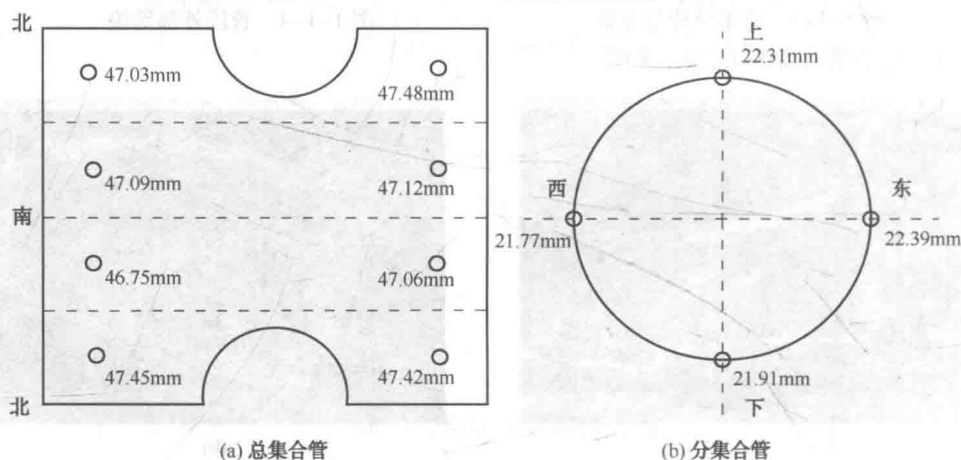


图 1-1-8 测厚位置

(3) 取样及加工

进一步分析须对集合管进行取样及加工，取样位置见图 1-1-9。金相试样分为裂纹尖端金相、断口附近金相、基体金相，扫描电镜试样主要有断口扫描电镜及能谱试样，化学成分主要为远离焊缝化学成分分析，并通过能谱进行初步判定。常温拉伸性能测试分为带焊缝试样和不带焊缝试样，按照 ASTM E8/E8M—2008 中 $\phi 6\text{mm}$ 试样进行；高温拉伸性能测试分为带焊缝试样和不带焊缝试样，按照 ASTM E8/E8M—2008 中 $\phi 6\text{mm}$ 试样进行；冲击性能测试分为带焊缝和不带焊缝试样，按照 ASTM E23—2008 进行。所有带焊缝拉伸和冲击试样轴向都垂直于焊缝，焊缝处于试样中心位置；基体拉伸和冲击试样轴向平行于总集合管轴向。另外，对部分拉伸试样断口进行了扫描电镜观察。焊缝、热影响区、基体都

进行洛氏硬度的测量，洛氏硬度测量和焊缝低倍组织观察为同一试样，先进行低倍组织观察，确定焊缝位置后，分别测试焊缝、热影响区和基体洛氏硬度。

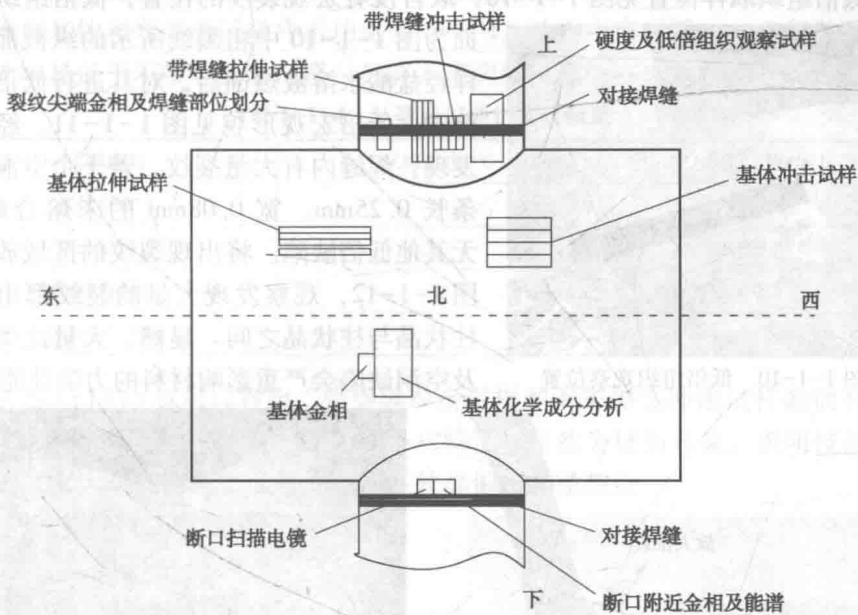


图 1-1-9 取样位置示意图

(4) 化学成分分析

基体材料为 Incoloy 800H，对应 ASME B407 UNS NO 8810。填充焊条为 ENiCrFe-3(Inconel 182)，对应 ASME C-SFA-5.11 W86182，从基体取样按 GB/T 20123—2006 进行化学成分分析，结果可以看到，基体材料化学成分符合标准要求，焊缝处取样进行化学成分分析显示，焊缝材料成分基本在焊条标准范围之内。化学成分与标准对比数据见表 1-1-2。

表 1-1-2 化学成分与标准对比 %

钢种	C	Si	Mn	S	P	Cu	Fe	Ni	Cr	Ti	Nb	Al
800H 基体	0.070	0.43	1.24	0.0021		0.30	46.14	30.85	20.0	0.51		0.52
ASME B407	0.05~ 0.1	1.0	1.5	0.015		0.75	≥39.5	30~35	19.0~ 23.0	0.15~ 0.60		0.15~ 0.60
焊缝 部位	0.042	0.61	6.17	0.0052	0.017	0.029	11.52	61.80	17	0.20	1.67	
ENiCrFe-3	0.10	1.00	5.0~ 9.5	0.015	0.03	0.50	10	≥59.0	13.0~ 17.0	1.0	1.0~ 2.5	

(5) 低倍组织观察

低倍组织取样位置见图 1-1-10，取自没有宏观裂纹的位置，低倍组织观察面为图 1-1-10 中粗黑线所示的纵截面。试样经盐酸水溶液热蚀后，对其进行低倍组织检验，低倍宏观形貌见图 1-1-11。经观察发现，焊缝内有大量裂纹、若干个空洞；一条长 0.25mm、宽 0.08mm 的未熔合缺陷，无其他低倍缺陷。将出现裂纹的区域放大见图 1-1-12，观察发现大量的裂纹都出现在柱状晶与柱状晶之间。显然，大量此类裂纹及空洞缺陷会严重影响材料的力学性能。



图 1-1-10 低倍组织观察位置



图 1-1-11 焊缝低倍宏观形貌



图 1-1-12 缺陷部位放大图

(6) 力学性能测试

① 洛氏硬度 对于侵蚀出焊缝的试样，分别测量焊缝、两边热影响区、两边基体的硬度。从表 1-1-3 中可以看出，焊缝硬度略高于热影响区硬度，热影响区硬度略高于基体硬度。原因是焊缝和热影响区偏析析出物较多，导致硬度增加，塑性下降。

表 1-1-3 焊缝、热影响区、基体硬度

试样号	试验温度/℃	硬度值/HRB			平均值/HRB
基体 1	20	81.5	79.5	80.0	80.33
基体 2	20	75.5	78.0	76.0	76.50
热影响区 1	20	85.5	84.5	86.0	85.33
热影响区 2	20	84.0	84.0	85.5	84.50
焊缝	20	89.5	89.0	88.5	89.00

② 冲击试验 在基体和焊缝处各取两个试样做夏比 V 形缺口冲击试验。基体试样远离焊缝，取样位置见图 1-1-9，带焊缝试样取在焊缝处，进行冲击试验后，得到基体和带焊缝试样冲击功见表 1-1-4。从表中可以看出，带焊缝的试样冲击功明显低于不带焊缝的试样，只有不带焊缝试样的一半左右。

表 1-1-4 V 形缺口冲击试验结果

试样编号	试验温度/℃	冲击吸收功/J
基体试样 1	20	113.0
基体试样 2	20	115.7
带焊口试样 1	20	59.2
带焊口试样 2	20	51.9

从图 1-1-13 也可以看出，带焊缝冲击试样和不带焊缝冲击试样断面有显著差异，带焊缝冲击试样断口有明显的条状特征，显然为枝晶开裂，表明枝晶的存在使韧性大大降低，其原因可能是存在枝晶偏析和微裂纹。

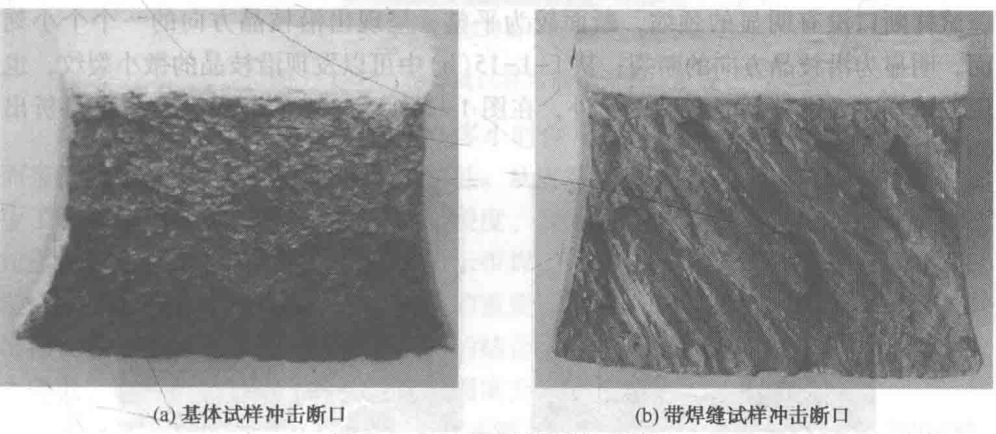


图 1-1-13 冲击试验断口形貌

③ 常温拉伸试验 取基体和带焊缝的拉伸试样，取样位置见图 1-1-9。对于带焊缝试样，焊缝和热影响区都在拉伸试样的标距段。基体的常温拉伸性能如抗拉强度、屈服强度、伸长率都在 ASME B407 中 UNS NO 8810 标准范围之内。带焊缝的拉伸试样抗拉强度较基体低，屈服强度高，屈强比大，延伸率只有 7%，根据 ASME C-SFA-5.11 中对 ENiCrFe-3 全焊缝试样力学性能的要求，抗拉强度应达到 550MPa，延伸率达到 30%。

在本次分析中由于样品形状的限制不能做到全焊缝拉伸试样，但带焊缝拉伸试样的试验结果有一定的参考性。从表 1-1-5 可以看到，带焊缝试样抗拉强度和延伸率都远远低于标准中全焊缝试样要求，显示出本试样延伸率低、塑性差。

表 1-1-5 常温拉伸试验结果

试样编号	试验温度/℃	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	伸长率 A /% ($L_0=4D$)	断面收缩率 Z /%
基体试样 1	20	550	237	43.0	58.5
基体试样 2	20	555	225	44.0	59.0
ASME B407 UNS NO 8810 标准		450	170	30	
带焊缝试样	20	455	321	7.0	11.0
ASME C-SFA-5.11 全焊缝拉伸试样		550		30	

为了分析不同试样延伸率的差异，对断后基体试样和带焊缝试样进行了详细的分析。从图 1-1-14(a)中可以看出，基体试样断后有明显的颈缩，断口上出现纤维区和剪切唇区。从图 1-1-14(b)和 1-1-14(c)中可以看出，拉伸断口为穿晶断裂，晶内有大量韧窝，为典型塑性断裂。从图 1-1-15(a)中可以看出，带焊缝试样断口没有明显的颈缩，断面较为平整，呈现出沿枝晶方向的一个个小刻面，明显为沿枝晶方向的断裂；从 1-1-15(b)中可以发现沿枝晶的微小裂纹，也说明试样主要沿枝晶间断裂；另外，在图 1-1-15(c)中的断面上发现大量析出物，直径在 $2\mu\text{m}$ 左右。

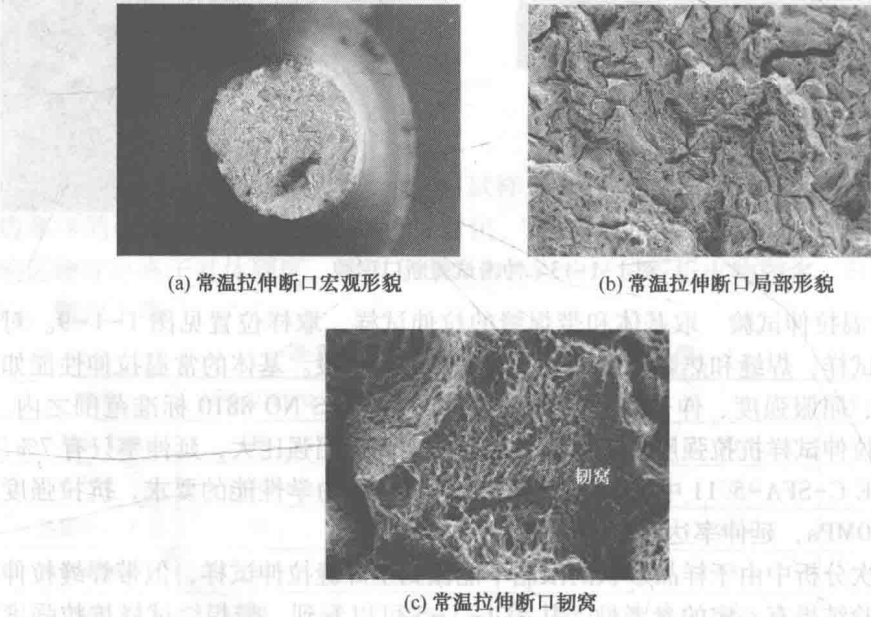


图 1-1-14 基体试样常温拉伸断口形貌

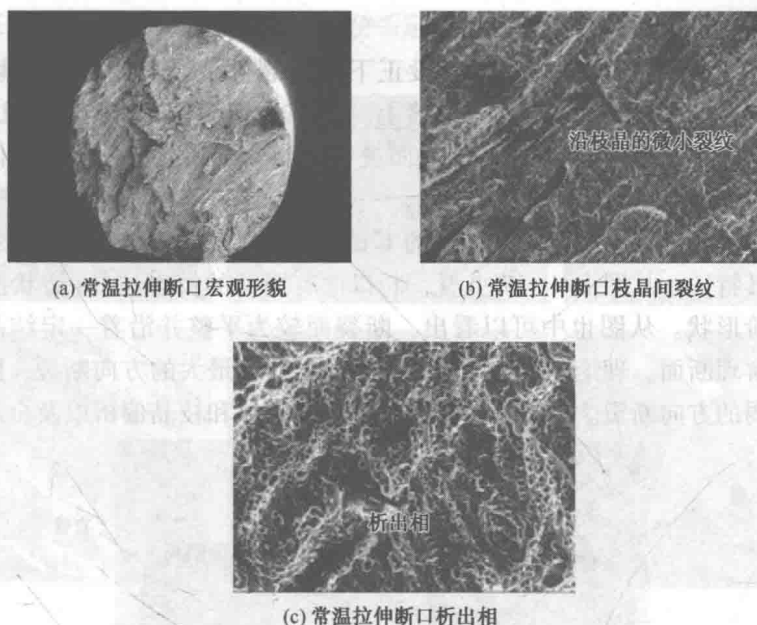


图 1-1-15 带焊缝试样常温拉伸断口形貌

综上所述，基体试样经过 10000 多小时使用后，强度和伸长率都满足要求，而带焊缝试样抗拉强度和伸长率都较低。从宏观观察的结果可以看到焊缝部位发生了塑性变形，变形会使带焊缝试样硬度、屈服强度上升，延伸率降低，同时抗拉强度应略有增加。实际试验观察显示带焊缝试样抗拉强度较低，表明焊缝附近塑性变形是带焊缝试样力学性能异常的重要原因但不是唯一原因。焊接裂纹和析出物在柱状晶间的存在，会使柱状晶的结合强度降低，材料整体塑性和韧性也大大降低，同时析出物的存在会使屈服强度升高。

④ 高温拉伸试验 为了研究材料在高温下的力学性能，取样进行高温拉伸试验，基体取样一个，带焊缝试样取样两个，试验结果见表 1-1-6。从表中可以看出，带焊缝拉伸试样和基体拉伸试样在 800℃ 下抗拉强度差别不大，延伸率差别较大。两个带焊缝高温拉伸试样延伸率差别较大，表明带焊缝试样的力学性能是不均匀的。

表 1-1-6 高温拉伸试验结果

试样编号	试验温度/℃	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	伸长率 A /% ($L_0=4D$)	断面收缩率 Z /%
基体试样	800	203.0	119.0	35.5	30.0
带焊缝试样 1	800	206.5	129.5	41.0	40.0
带焊缝试样 2	800	227.5	143.5	26.0	40.0

(7) 断口及金相分析

① 断口及金相分析试样 将管段正下方开裂部位及其附近部位切下见图 1-1-16，可以明显看出，裂口在焊缝上。将三通切为两部分，对 1[#]试样断口进行扫描电镜观察，对 2[#]试样的纵截面进行金相分析和能谱分析。基体和裂纹尖端金相分析部位见图 1-1-9。

② 断口分析 对图 1-1-16 所示的 1[#]试样进行了化学清洗，通过扫描电子显微镜观察其特征，从图 1-1-17 上看，断口面有明显的铸态枝晶(铸状晶)特征，表现为台阶形状。从图也中可以看出，断裂面较为平整并沿着一定结晶方向破裂，应为解理断面。理论上认为，塑性断裂沿着受力最大的方向断裂，脆性断裂沿着最薄弱的方向断裂。由于焊接时产生的焊接裂纹和枝晶偏析以及金属间析出

