油田用双金属机械复合管失效原因分析与对策

张金星[1]，夏晓晖[1]，宋成立[2]，李先明[1]，谭川江[1]，李纪朋[1]，林冠发[2]
（1.中国石油股份公司 塔里木油田分公司，新疆 库尔勒 841000；
2.中国石油集团石油管工程技术研究院，西安 710077）

摘要：目的 分析研究双金属机械复合管的失效原因，并提出改进措施。**方法** 对比说明双金属机械复合管几种常见的典型制造方法及其优缺点，介绍应用中典型传统焊接工艺焊接的环焊缝腐蚀刺漏或穿孔、环焊缝开裂、内衬塌陷或鼓包以及爆管等常见的失效形式，利用现场应用的失效实例、统计数据和室内检测结果，分析这些失效类型的原因，并提出针对性建议或措施。**结果** 双金属机械复合管几种典型的制造方法各有优缺点，但其产品的内衬与基管的结合力均较小。造成其管材失效的主要原因有高压、高温、含 CO_2/Cl^- 腐蚀介质、封焊结构、焊接工艺、外防腐层施工、应力腐蚀或电偶腐蚀等。根据现场应用实践，提出并应用了管端堆焊结构、环焊缝用镍基合金焊材、增加内衬厚度和小管径等防止失效的建议或措施，取得很好的防护效果。**结论** 造成此类管材失效的因素有腐蚀、封焊结构、焊接、外防腐施工及应力腐蚀或电偶腐蚀等，可采取堆焊结构、镍基合金焊材、厚衬层和小管径等措施。

关键词：双金属复合管；内衬；失效原因分析；腐蚀
中图分类号：TE988.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1672-9242(2022)11-0133-09
DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2022.11.018

Failure Analysis and Measures of Bimetallic Mechanical Composite Pipefor Oil Field

ZHANG Jin-xing[1], *XIA Xiao-hui*[1], *SONG Cheng-li*[2], *LI Xian-ming*[1], *TAN Chuan-jiang*[1], *LI Ji-peng*[1], *LIN Guan-fa*[2]
(1. Tarim Oilfield Company, Petro China, Xinjiang Korla 841000, China;
2. Tubular Goods Research Institute, CNPC, Shaanxi Xi'an 710077, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the failure cause of bimetallic mechanical composite pipe and put forward improvement measures. A brief comparison of several typical and common manufacturing methods and their advantages and disadvantages are introduced, and the failure types of the pipes welded by the typical traditional welding process such as girth weld corrosion leakage or pitting, girth weld cracking, lining collapse or bulge, and pipe bursts, are introduced. Using oilfield application failure examples, statistical data and test results, the causes of these failure types are analyzed, and targeted recommendations or measures are put forward. The results show that several typical manufacturing methods of bimetal mechanical composite pipes have their own advantages and disadvantages, but the bonding force between the inner lining and the base pipe of the product is rela-

收稿日期：2021–07–08；**修订日期：**2021–08–25
Received: 2021-07-08; **Revised:** 2021-08-25
基金项目：中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司技术开发项目（201017060160）
Fund: Technology Development Project of Tarim Oilfield Branch of Petro China Co., Ltd. (201017060160)
作者简介：张金星（1990—），男，工程师，主要研究方向为石油设备管理。
Biography: ZHANG Jin-xing (1990-), Male, Engineer, Research focus: petroleum equipment management.
通讯作者：林冠发（1960—），男，博士，教授，主要研究方向为腐蚀与防护。
Corresponding author: LIN Guan-fa (1960-), Male, Doctor, Professor, Research focus:corrosion and protection.
引文格式：张金星，夏晓晖，宋成立，等. 油田用双金属机械复合管失效原因分析与对策[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 133-141.
ZHANG Jin-xing, XIA Xiao-hui, SONG Cheng-li, et al. Failure Analysis and Measures of Bimetallic Mechanical Composite Pipefor Oil Field [J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 133-141.

tively small. The main reasons for the failure of this type of pipe are high pressure and high temperature, CO_2/Cl^- corrosive medium, the sealing structure and welding process, external anti-corrosion layer construction, stress corrosion or galvanic corrosion, etc. According to the field application practice, suggestions or measures to prevent failures such as pipe end surfacing structure, nickel-based alloy welding material for girth weld, increase of lining thickness and small pipe diameter, etc. have been put forward and applied, and a good protective effect has been achieved.

KEY WORDS: bimetallic mechanical composite pipe; lining; failure analysis; corrosion

目前油田随着深井、超深井的不断开发和生产，尽管在井口采取节流措施，但地面管线还是面临高温高压的腐蚀环境，对地面集输管线的管材提出了更高的要求。21 世纪初，开发并应用于油田的双金属复合管得到了大力推广，对气田集输系统产生了很好的经济效益，同时也带来应用过程中的诸多问题[1-3]。截至 2015 年，塔里木油田已使用的超 400 km 长的双金属机械复合管，就已经发生了 66 次失效事件，给油田造成了较大的经济损失和人力消耗[4-6]。尽管如此，由于机械复合管同随后出现的冶金复合管相比，其管体的生产成本小，工艺技术和制造过程简单，因此具有较好的经济效益，在国内外各油田得到广泛的应用[7-11]。近年来，生产企业、研究机构和油田用户对双金属复合管的生产与应用做了许多试验与研究工作，针对现场出现的问题提出了较多的改进措施，使得该产品得到了不断完善。

1 常见制造方法及其比较

从结构形式来说，目前双金属复合管的耐蚀层与基管的复合主要有机械式复合和冶金复合 2 种。相比较而言，冶金复合管的生产成本远大于机械式复合管，因此目前在油田广泛应用的双金属复合管就是机械式复合管。双金属机械式复合管主流制造方法的原理与优缺点见表 1。

在塔里木油田应用最多的是爆炸复合法制造的复合管，其次是机械旋压法和液压胀形法[12]。最初，前者占 90%以上，后二者不足 10%，但随着爆炸复合管失效次数的增加，后二者的应用比例逐渐增大。从失效分析来看，塔里木油田应用机械复合管当然是用量最大的爆炸复合管，特别是鼓包或塌陷的比例最大，而后来采用机械旋压法和液压胀形法生产的复合管这方面失效较少，机械旋压法复合管最少。

表 1 双金属机械式复合管主要制造方法原理与优缺点

Tab.1 Principles and characteristics of the main manufacturing methods of bimetallic mechanical composite pipes

序号	方法名称	方法原理	优点	缺点
1	机械滚压法	利用两种不同材质的机械性能，在滚压机具螺旋进给的挤压下，使内衬管连续局部塑性变形，外基管始终保持在弹性变形范围之内。当外力去除后，外基管弹性收缩，内衬管由于已呈塑性变形无法收缩。从而达到内衬管外表面强力的嵌合在外基管的内表面中，复合成形	摩擦阻力小，能耗低，驱动功率低	易造成内管壁变薄，严重时导致内管开裂，且易在内管形成加工硬化
2	机械旋压法	旋压装置主轴带动组合在芯棒上的复合管坯旋转的同时，三个呈锥形状的旋转轮反方向地旋转并前进，使外层的碳钢管均匀地贴在不锈钢管之上，形成静配合细螺纹状的连结	工艺简单，成形效率高	加工大管径较困难，且管层间结合力较低，易分离或脱落等
3	爆炸复合法	将装配好的内外管放置在水槽内，将集束炸药放置在内衬管轴线上，通过炸药瞬间产生的爆炸力，引起水槽内水压瞬间增高，瞬间推动内衬管在直径方向向外扩张至外基管的内表面上，并随外基管继续扩张，直至压力消失，而外基管在轴向内收缩，最终复合成形	一次性瞬间成形，各点的压力基本相同	内衬与基管的结合力较小
4	机械拉拔法	扩径挤压拉拔法：内管和外管在拉挤模的作用下发生胀形而成型；扩径缩径拉拔法：管坯在夹头作用下，通过成形模具，内外管同时发生缩径变形	工艺简单，成形效率高	结合强度低，在高温状态下复合管会分层
5	液压胀形法	将内、外管套在一起放入模具，然后对内管壁加内压，随着内压升高，内管由弹性变形逐渐进入塑性变形，并贴紧外管；当内压升高到一定值时，外管将产生弹性变形并贴紧模具；当内压卸除，外管回弹，内管保持塑性变形，则内外管紧密结合在一起	工艺简单，界面接触压力分布均匀，内表面无擦伤或破坏现象	界面结合力较小，高温下易产生松弛；装置结构复杂，密封技术要求高

2　油田应用中典型失效类型及原因分析

塔里木油田运用双金属复合管始于 2005 年，首先在牙哈作业区铺设一试验段，试验取得成功后，在油田开始推广应用。随着应用规模的扩大和时间的延长，以传统焊接工艺进行封焊和对焊的双金属机械复合管存在的问题逐渐显现出来，其主要问题就是管材的失效。该类管材失效主要有环焊缝腐蚀刺漏或穿孔、环焊缝开裂、内衬鼓包或塌陷、爆管、基管本体穿孔等，其失效的原因也有许多方面。

2.1　环焊缝腐蚀刺漏或穿孔

环焊缝腐蚀刺漏或穿孔是双金属机械复合管失效比较多的一种形式，也是导致环焊缝开裂的重要因素之一。一般是先在内表面的焊缝及其热影响区处形成腐蚀坑（因封焊部位多次加热而产生贫铬区），有些则是内焊缝余高因局部的腐蚀而降低，然后腐蚀坑扩大而相连形成腐蚀沟槽，或是腐蚀坑加大加深，最后腐蚀至刺漏或穿孔，如图 1 所示。形成环焊缝腐蚀刺漏或穿孔的部位大部分处于管线的底部，主要集中于 4 点到 8 点区间（如图 2 所示），而在管道上半部的环焊缝上也有形成相对较少的腐蚀坑或点蚀，极个别也可造成刺漏或穿孔。

分析这类失效原因，首先是塔里木油田应用最多的克拉苏区块，其地面集输系统面临高压（节流后最高 12 MPa）、高温（最高 70.4 ℃）环境，天然气中有较高含量的 CO_2 组分（最高物质的量分数为 1.04%），地层水含很高的 Cl^-（最高 1.25×10^5 mg/L），因此腐蚀环境较为苛刻，内衬发生点蚀、应力腐蚀、与基管电偶腐蚀等破坏的风险较高[13]。其次，主要是衬层热影响区的耐蚀性相对母材变差了，是因为衬层在封焊、根焊、填充焊或过渡焊的多次加热过程中形成了贫铬相，在高含 Cl^-情况下就可形成腐蚀坑或沟槽。第三，焊接时焊缝存在诸多缺陷和根焊使得衬层引入过多的基管成分，导致其耐蚀性下降。第四，管线介质温度的变化导致基管与内衬的热膨胀造成焊缝处应力集中，从而加速了内衬的腐蚀，也就是应力腐蚀比一般均匀腐蚀或非应力腐蚀的局部腐蚀要快得多[14-15]。

图 1　克深区块双金属机械复合管环焊缝内腐蚀坑或槽形貌

Fig.1 Morphology of corrosion pits or grooves in the girth weld of the composite pipe

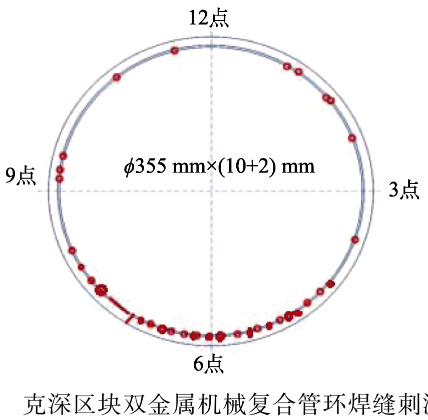


图 2　克深区块双金属机械复合管环焊缝刺漏或穿孔位置统计结果

Fig.2 Results of puncture or perforation position in the girth weld of the composite pipe

由于焊缝及其热影响区是管材失效的薄弱部位，因此焊缝的力学性能和耐蚀性能等就成为管材失效的重要影响因素。针对塔里木油田克深二气田所用的内衬是 316 L 不锈钢的双金属机械复合管，最初的焊缝焊接工艺是免充氩保护氩弧焊封焊（R309LT1-5 药芯焊丝，带内保护）+根焊（R316LT1-5 药芯焊丝）+过渡层焊（ER309 MoL 实芯焊丝）+电弧焊填盖（CHE427 或 CHE507 碳钢焊条），随后采用免充氩保护氩弧焊封焊（R309LT1-5 药芯焊丝，带内保护）+根焊（R316LT1-5 药芯焊丝）+过渡层焊（ER309 MoL 实芯焊丝）+手工焊填盖（不锈钢焊材，ATS-309 MoL）的焊接工艺[5]。由于最初根焊采用了耐蚀性不是很好的不锈钢焊丝，虽然较基管的耐蚀性要好，但比内衬的耐蚀性只是略好，同时加上不能很好保证现场焊接的质量，并在根焊部位存在基管与衬管的应力集中，使得焊缝耐蚀性（实际上就是抗应力腐蚀性能）急剧下降，所以焊缝处及其热影响区就很容易被腐蚀，甚至造成应力腐蚀开裂而刺漏，还未开裂时则形成较多一定深度的腐蚀沟槽。这样应力腐蚀过程对最初一般不锈钢焊丝的过渡焊层同样也有发生，现场一些焊缝失效包括过渡焊层也被严重的腐蚀就说明这种情况，如图 3 所示，其中图 3b 上的基管已穿孔。

2.2　环焊缝开裂

环焊缝开裂是双金属机械复合管失效很重要的一种形式，其典型特征是开裂沿着焊缝扩展，多数开

图 3　克深区块双金属机械复合管环焊缝横截面腐蚀形貌
Fig.3 Corrosion morphology of the cross section of the circumferential weld of the composite pipe

裂处于焊缝与母材熔合线附近的封焊部位，特别是最初双金属机械复合管焊接采用 309 焊丝根焊、过渡区和盖面采用碳钢焊条的封焊焊缝发生这种开裂的情形较多。从宏观角度来看，多数环焊缝开裂发生在弯头和管道应力集中的部位，其宏观形貌如图 4 所示。

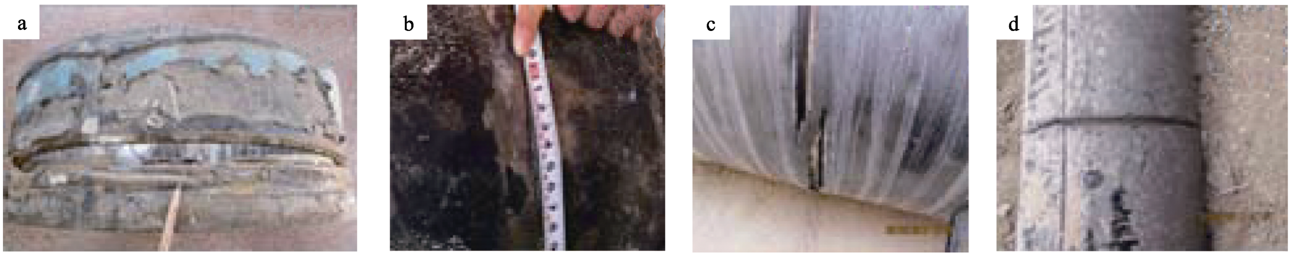


图 4　塔里木油田双金属机械复合管环焊缝开裂形貌
Fig.4 Cracking morphology of the girth weld of the composite pipe in Tarim oilfield

这种失效的原因首先就是基层与衬层之间的缺口和温差引起衬层与基层热膨胀，导致封焊位置存在应力集中，易引发裂纹的萌生（通过塔里木油田克深区块地面集输所用同类管材运行 5 年多的焊缝无损检测发现，几乎所有焊缝均存在不同长度的裂纹，最短 15 mm，最长 350 mm[5]）。其次，由于电弧热作用，封焊、根焊、填充焊或过渡焊对衬层耐蚀性产生影响（主要是导致热影响区贫铬区形成）[16-18]，易形成腐蚀坑而成为焊缝开裂的起裂点。第三，封焊焊接时，内衬不可避免地会熔入较多的基层碳钢成分或在这一过程中产生马氏体，会造成该处的硬度偏高，止裂性差而易开裂。第四，封焊后，由于基管与衬层的缝隙存在，所以等于给封焊的焊缝预留一个缺口或裂纹，在后续使用过程中将成为封焊焊缝开裂的起裂源，在现场这种焊接的机械复合管就发生了此类环焊缝开裂事件。第五，封焊后根焊附近有时存在类似未熔合、裂纹、气孔等缺陷也是环焊缝开裂的重要原因之一，其形貌见图 5。

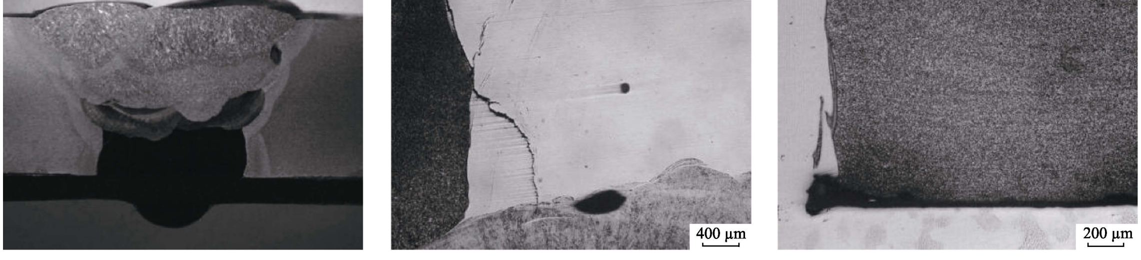


图 5　克深区块机械复合管环焊缝处的缺陷及衬管与基管交接处
Fig.5 Defects in the girth weld of the pipe and the junction of the liner and the base pipe

2.3　内衬塌陷或鼓包

双金属内衬复合管的内衬塌陷或鼓包是其最为严重的一种失效形式（见图 6），因为这在所有双金属机械复合管失效类型中所占的比例最大，有些管径高达到 68%[5]。虽然大部分内衬塌陷或鼓包不能完全阻断介质的流动，但对介质流态则产生了较大影响。如塌陷占据了管内有效的横截面，流态发生了改变，输送阻力急剧升高，严重影响管线的正常运行。

内衬塌陷或鼓包的直接原因应当是内衬与基管的结合力太小和管内压发生突然改变而造成的，这是由其本身结构特点决定的。从生产原理和制造过程来看，耐蚀内衬与维持管体强度的碳钢基管是通过过盈相嵌起来的，内衬先是弹性变形再塑性变形，在维持

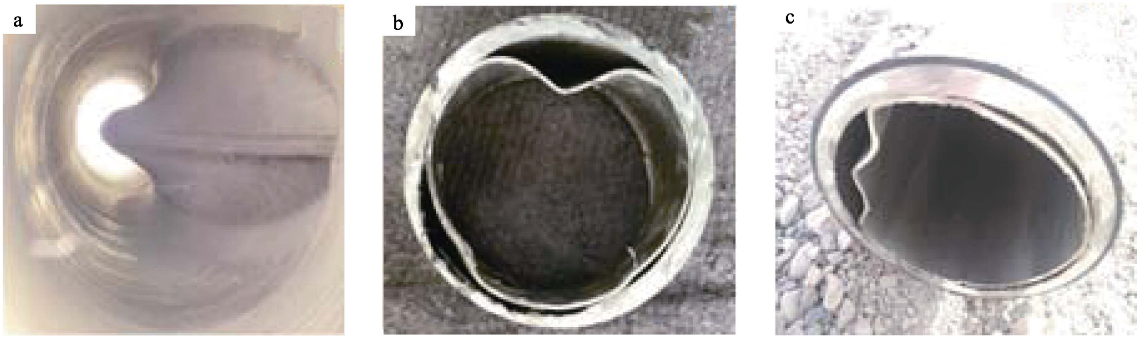


图 6　塔里木油田用双金属机械复合管内衬塌陷或鼓包形貌
Fig.6 Lining collapse or bulge morphology of the composite pipe used in Tarim oilfield

一定的残余应力后，与基管贴合在一起；基管则是通过弹性变形与内衬贴合在一起的，因此内衬与基管之间的表面没有任何粒子或原子的渗透和扩散等物质传输，仅仅是机械贴合在一起，并没有形成冶金熔合区[19]。由此看来，内衬与基管的结合力应当比较小，其间不加任何其他胶粘剂时，纯机械附着力（一般检测的是剪切强度）一般只有几个兆帕或更小。如果该类管材采用 3PE 外防腐层时，可能这一附着力还会降低。因为制作 3PE 防腐层时，其内层目前采用的熔结环氧粉末通过加热 200~240 ℃后涂敷上去的，而这一加热温度正是金属及其零件的低温回火温度，其热处理主要的作用是消除金属部件中存在的残余应力[20]，而双金属机械复合管就是凭借这种残余应力使得内衬材料与基管保持贴合状态，因而其采用 3PE 外防腐层施工可能导致内衬与基管的附着力降低，这是造成内衬层鼓包和塌陷的关键因素之一。不同规格的双金属机械复合管在外防腐层施工完成后，通过拉脱法测定的剪切强度见表 2[21]。研究表明，一定的结合强度能够提高机械式复合管的抗鼓包能力，但结合强度提高到一定程度后，再提高则不会对复合管鼓包产生明显改善，而且过大会造成衬管的反向屈服，反而加剧了失稳，因此机械式复合管的结合强度应控制在一个合理的范围内[22]。

同时，如果内衬与基管间残留少量的空气或水分时，在进行内层熔结环氧粉末的加热涂敷时，则层间的空气就会受热膨胀或水分受热汽化进而膨胀。这时较薄的内衬（最初一般为 1.5~2.5 mm）由于受基管约束而只能向内鼓起，形成了内衬的鼓包或塌陷现象，有时即使加热涂敷结束管体恢复到常温，其鼓包或塌陷也无法恢复到加热前的形态，这就是内衬的鼓包或塌陷是发生屈曲失稳塑性变形的缘故[23]。因此，加热涂敷环氧熔结粉末可导致部分双金属机械复合管产生鼓包或塌陷现象而被直接查看出来。对塔里木油田一区块所用双金属机械复合管 3PE 外防腐层施工完成后，检查到的内衬鼓包、塌陷结果统计见表 3[5]。由表 3 可见，双金属机械复合管管径并不是越大越容易鼓包或塌陷，而内衬越薄则越易发生。由此得出管径越小或内衬越厚，内衬发生鼓包或塌陷的可能性越小。

导致双金属机械复合管内衬鼓包或塌陷还有其他因素，比如内衬与基管因热膨胀系数不同，在外防腐施工和生产过程中，由于温度的不断改变而使内衬与基管可发生相对滑动，从而造成附着力的不断减小而可能导致内衬的鼓包或塌陷[23]。管线投产后，发生关停或某处的刺漏或穿孔，甚至爆管造成内压的急剧下降也可引起内衬的鼓包或塌陷。当环焊缝发生刺漏或穿孔时，管内介质就会流入衬管与基管的间隙，并经过一段时间后，管内与间隙的压力达到平衡，如在

表 2　不同规格双金属复合管结合强度试验结果
Tab.2 Bonding strength test results of bimetallic composite pipes of different specifications

序号	规格/mm	接触面积/m^2	压力/kN	结合强度/MPa	制造方法
1	ϕ355.6×(8+2.5)L415/316 L	0.021 33	22.6	1.06	水下爆破
			21.2	0.99	
2	ϕ168.3×(6+2)L245/316 L	0.009 816	0.892	0.091	水下爆破
			1.064	0.108	
3	ϕ168.3×(10+2)L245/316 L	0.009 313	4.114	0.442	液压复合
			1.929	0.207	
4	ϕ168.3×(8+2)L245/316 L	0.009 564	0.534	0.056	水压复合
			3.03	0.316	
5	ϕ168.3×(10+2)L245/316 L	0.009 313	20.97	2.251	机械内旋压
			28.02	3.009	

表 3 双金属复合管外防腐后衬层鼓包、塌陷比率
Tab.3 Rate of bulging and collapse of the lining layer after the external anticorrosion of the pipe

序号	规格/mm	比率/%	序号	规格/mm	比率/%
1	ϕ508×(14.2+2.5)	6	5	ϕ323.9×(8.8+2)	6
2	ϕ508×(20+2.5)	1.6	6	ϕ323.9×(12.5+2)	8
3	ϕ355.6×(10+2)	17	7	ϕ168.3×(5.6+2)	0
4	ϕ355.6×(14.2+2)	28			

后续的运行过程中管内压力有快速减小的情况（如管线关停或某处的刺漏或穿孔甚至爆管等），这时有可能导致内衬的鼓包或塌陷，在油田现场发现环焊缝刺漏或穿孔都伴随内衬的鼓包或塌陷发生就是最好的证明。事实上，双金属机械复合管的内衬鼓包或塌陷所发生的屈曲失稳，与内衬的材质、直径与厚度（径厚比）、初始缺陷（椭圆度、凹度等）等有关，径厚比越大、椭圆度越低、衬层与基管的间隙越大，则内衬鼓包或塌陷越易发生[24]。

同时在现场发现，不同生产方法制造的双金属机械复合管产生内衬塌陷的几率不同，相比水下爆炸复合法，采用液压扩径法与机械旋压法制造的复合管在外防腐层制作过程中尚未发生内衬塌陷[19]。

2.4 爆管

双金属机械复合管发生爆管失效的情况比较少，但也有发生，特别是投用时间越长，爆管事件发生的次数就越多。双金属机械复合管爆管现象一般不发生在焊缝及其附近，发生的部位一般与焊缝有一段距离。通过对塔里木油田机械复合管 2 次爆管处基管的壁厚检查发现，爆管开裂的基管对应位置壁厚严重减薄，最薄处已不足 1 mm。这说明管内介质穿过衬管到达间隙后，对基管局部的腐蚀比较严重，使其不能再承受内压而爆裂，如图 7 所示。

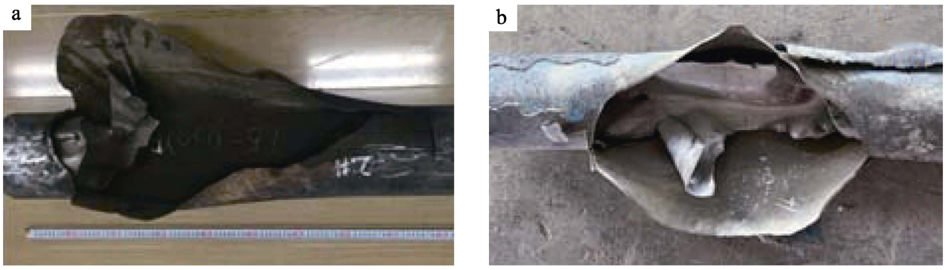


图 7 塔里木油田一气田机械复合管 2 次爆管形貌
Fig.7 Morphology of the composite pipe in Tarim oilfield after bursting

对爆管的双金属复合管进行检查发现，一起爆管事件的双金属复合管内衬环焊缝发生了腐蚀穿孔，那么腐蚀介质就会通过环焊缝处内衬的腐蚀穿孔到达了间隙中。由于基管的碳钢与耐蚀的内衬两者耐蚀性能的差异，可形成显著的电偶腐蚀，使得基管严重腐蚀而局部减薄[25-26]。另一起爆管事件的复合管环焊缝及其热影响区均完好无损，也就是说引起爆管的基管减薄的腐蚀介质不是由内衬环焊缝的刺漏或穿孔进来的，而是中部内衬发生刺漏或穿孔导致的，从现场发现就有这样的爆管事件，图 6b 的爆管就是如此。

图 8 是该油田一集输管线所用的双金属机械复合管发生了基管中部的穿孔，现场是通过 3PE 外防腐层撕裂处发生泄漏而发现的，这种基管中部发生刺漏或穿孔的失效事件并不多。把该外防腐层剥离后可发现，在基管中部有一直径 3 mm 的近似椭圆形的穿孔，其明显是内腐蚀穿孔造成的。由于管线内部介质的冲刷腐蚀，已在基管的外表面形成大小不一、深度不同的长花瓣形沟槽，可见介质流速较大、压力较高。最初的冲刷强度还是比较大的，而外防腐层与基管外的附着力又比较强，从而在基管外表面与外防腐层之间

图 8 塔里木油田一气田机械复合管基管中部穿孔和内衬开裂形貌
Fig.8 Pitting of the base pipe and cracking of the inner lining of the pipe in Tarim Oilfield

就造成这样冲刷腐蚀沟槽。通过检查还发现，该根复合管两端焊缝完好无损，而在与基管穿孔相对应的衬管位置上形成了 3 条相互接近的穿透性内衬裂缝，因此造成基管腐蚀穿孔的介质是通过此裂缝泄漏的。由于该根复合管其他部位并没有任何损伤，因此推断内衬所形成的裂缝应当是内衬制作、外防腐施工或投产运行中发生了反复折叠，从而形成了这样的内衬裂缝。如果在内衬已形成裂缝而基管未发生穿孔前，管内压力有所变化时，那么该根机械复合管就可发生鼓包或塌陷。如果泄漏到间隙的介质一边腐蚀一边漫延，当腐蚀造成一定范围漫延区域的基管内表面减薄到不能承受内压时，就有可能发生爆管事件，这就与上述后一爆管结果相同。因此，上述后一爆管事件也应当是内衬反复折叠开裂或其他原因引起内衬开裂或穿孔导致介质进入间隙使得基管局部减薄而发生的。

对双金属机械复合管现场的失效形式不只以上几种，还有其他形式。如焊接质量问题引起内衬的纵向直焊缝开裂，高含 Cl^- 介质引发内衬的点蚀穿孔，进而导致基管穿孔或爆管。除以上存在的应力腐蚀、电偶腐蚀和点蚀外，双金属复合管还存在疲劳腐蚀、晶间腐蚀、缝隙腐蚀等。

3　双金属机械复合管失效的应对措施

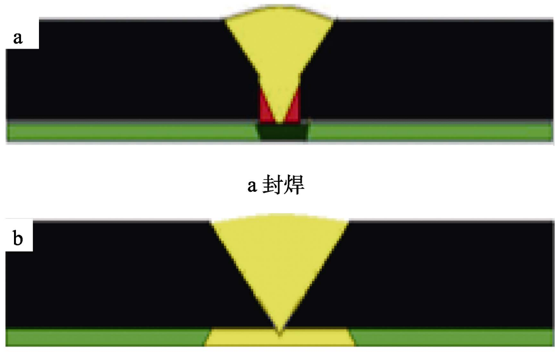
针对双金属机械复合管不同失效原因，可采取不同的应对措施。实际上采用一种改进或应对措施可以同时解决多种类型的失效，目前塔里木油田主要采取以下对策。

3.1　将封焊改为堆焊

为了避免基管与衬管在焊缝处的应力腐蚀，提高焊缝附近内衬的耐蚀性，将原有在环焊缝处的基管与衬管的封焊改为堆焊，即将原来的内衬在管端口伸出，先改为向内缩短一定距离（50~100 mm），然后再用耐蚀合金（现塔里木油田多采用 825 镍基合金，内衬材料选用 316 L 不锈钢、2205 双相不锈钢、825 镍基合金等）从内衬边开始堆焊直至管端口，堆焊的厚度与内衬相同，如图 9 所示。采取这样堆焊结构以后，可以减少内衬在环焊缝处的应力集中，同时后续的环焊缝坡口就直接改为 V 形结构。

3.2　环焊缝全部采用镍基合金焊材

为了提高环焊缝的耐蚀性，防止环焊缝整体发生应力腐蚀，现在封焊、根焊、填充焊、过渡焊和盖面均采用镍基合金。塔里木油田在克深气田区块，双金属机械复合管的环焊缝管口采用热丝 TIG 全自动 625 镍基焊材堆焊或手工氩弧焊 625 镍基焊材封焊，现场焊口则采用内充氩气保护，均采用 ERNiCrMo-3、E NiCrMo-3 镍基焊材进行焊接。



a 封焊

b 堆焊

图 9　双金属机械复合管环焊缝焊接工艺

Fig.9 (a) Sealing and (b) overlaying process of the circumferential weld of the bimetal composite pipe

3.3　增加内衬厚度

通过上述失效分析，内衬发生鼓包或塌陷的原因与内衬的厚度也有很大关系。当内衬越厚，其鼓包或塌陷所需要的屈曲失稳应力就越大，也就是发生鼓包或塌陷可能性就会减小，因此增加内衬厚度也是控制内衬鼓包或塌陷的重要对策之一。前期在现场应用的双金属机械复合管内衬厚度小的有 1.5、2 mm 等，现在要求内衬的厚度不少于 2.5 mm。

3.4　其他有效对策

针对以上失效原因除采取以上措施外，还有其他可采用的有效对策。例如，为了减少外防腐层施工对内衬与基管结合力的影响，建议对小管径（≤200 mm）以下的管线采用聚氯乙烯冷缠带。通过上面的结合力现场失效统计来看，小管径（≤200 mm）以下机械复合管的内衬发生鼓包或塌陷的几率很小，相反，大管径发生的可能性很大，因此建议小管径的双金属复合管可以采用机械复合管，而大管径则必须采用冶金复合管。同时，建议油田用户在管线运行期间，关停管线时缓慢操作，避免其内压突然变化可能引起内衬的塌陷或鼓包。

采取了以上这些措施后，现场所用的双金属机械复合管发生失效事件大大减少，取得了很好的防护效果，使得该类管材在油田得到了广泛应用。

4　结语

1）双金属机械复合管常见的典型制造方法有机械滚压法、机械旋压法、爆炸复合法、机械拉拔法和液压胀形法等，各有优缺点，其制造产品内衬与基管的结合力均较小。塔里木油田最初以爆炸复合管为主，后来因其失效较多而使相对较好的机械旋压法和液压胀形法的应用逐渐增多。

2）塔里木油田所用双金属机械复合管现场失效较多的是环焊缝腐蚀刺漏或穿孔、环焊缝开裂、内衬

塌陷或鼓包、爆管等，失效原因主要是高压含 CO_2/Cl^- 腐蚀环境、封焊结构、焊接工艺、外防腐层施工、应力腐蚀或电偶腐蚀等。

3）油田用双金属机械复合管可采取管端堆焊结构、环焊缝用镍基合金焊材、增加内衬厚度和小管径等对策，并加强现场外防腐层施工和焊接质量的监控，可有效减少其失效事件发生。

参考文献：

[1] 闫可安，许天旱，韩礼红，等. 双金属复合管的研究现状与发展趋势[J]. 化工技术与开发，2020，49(10): 45-50.
YAN Ke-an, XU Tian-han, HAN Li-hong, et al. Research Status and Development Trend of Bimetal Composite Pipe[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2020, 49(10): 45-50.

[2] 李发根，杨家茂，冯泉，等. 在役双金属复合管道失效机制及控制措施分析[J]. 焊管, 2019, 42(9): 64-68.
LI Fa-gen, YANG Jia-mao, FENG Quan, et al. Failure Mechanism and Control Measures Analysis of Bimetal Composite Pipelines[J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 42(9): 64-68.

[3] 张文毓. 双金属复合管的研究与应用[J]. 装备机械, 2016(3): 70-73.
ZHANG Wen-yu. Research and Application of Bimetallic Composite Pipe[J]. The Magazine on Equipment Machinery, 2016(3): 70-73.

[4] 陈浩，顾元国，江胜飞. 20G/316L 双金属复合管失效的原因[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(12): 1194-1197.
CHEN Hao, GU Yuan-guo, JIANG Sheng-fei. Failure Reasons for 20G/316L Double Metal Composite Pipe[J]. Corrosion & Protection, 2015, 36(12): 1194-1197.

[5] 王福善，李先明，常泽亮，等. 关于库车山前地区双金属复合管选用的思考[R]. 库尔勒：塔里木油田公司, 2015.
WANG Fu-shan, LI Xian-ming, CHANG Ze-liang, et al. Thoughts on the Selection of Bimetallic Composite Pipes in the Piedmont Area of Kuche[R]. Korla:Tarim Oilfield Company, 2015.

[6] 许爱华，张靖，院振刚，等. 新疆克深 2 气田双金属复合管失效原因[J]. 油气储运, 2014, 33(9): 1024-1028.
XU Ai-hua, ZHANG Jing, YUAN Zhen-gang, et al. Failure Cause of Bi-Metal Composite Pipe of Xinjiang No.2 Keshen Gasfield[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(9): 1024-1028.

[7] 杨专钊，李安强，魏亚秋. 双金属复合管标准发展现状及存在的问题[J]. 油气储运, 2020, 39(4): 395-399.
YANG Zhuan-zhao, LI An-qiang, WEI Ya-qiu. Development Status and Existing Problems of Standards for Bimetal Composite Pipe[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(4): 395-399.

[8] 杨专钊，王高峰，闫凯，等. 双金属复合管环焊工艺及接头强度设计现状与趋势[J]. 油气储运，2017，36(3): 241-248.
YANG Zhuan-zhao, WANG Gao-feng, YAN Kai, et al. Status and Trend of Girth Welding Procedure and Joint Strength Design for Bimetallic Composite Pipes[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(3): 241-248.

[9] 韩东锐，王戈，贾思洋，等. 新型钛铜复合管在流动海水中的腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 1-3.
HAN Dong-rui, WANG Ge, JIA Si-yang, et al. Corrosion Behavior of New Type Ti-Cu Composite Pipe in Flowing Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 1-3.

[10] 杨专钊. 油气集输用双金属复合管[M]. 北京：石油工业出版社, 2018.
YANG Zhuan-zhao. Bimetallic Composite Pipe for Oil and Gas Gathering and Transportation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.

[11] 赵俊，陈振栋. 双金属复合管腐蚀分析及解决方法[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2021, 38(2): 24-26.
ZHAO Jun, CHEN Zhen-dong. Corrosion Analysis of CRA Clad or Lined Steel Pipe and Its Solution[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2021, 38(2): 24-26.

[12] 赖亮庆，陈高升，冯林兆，等. 高精度 17-4PH 不锈钢隔碗拉深液压胀形复合成形工艺参数优化[J]. 精密成形工程, 2021, 13(3): 104-111.
LAI Liang-qing, CHEN Gao-sheng, FENG Lin-zhao, et al. Processing Parameters Optimization of Drawing- Hydraulic-Bulging Forming of High-Precision 17-4PH Stainless Steel Spacer[J]. Journal of Precision Forming Engineering, 2021, 13(3): 104-111.

[13] 金伟，杜金楠，彭博，等. 某气田 316L 双金属复合管焊缝腐蚀穿孔原因分析[J]. 全面腐蚀控制，2017，31(10): 56-60.
JIN Wei, DU Jin-nan, PENG Bo, et al. Cause Analysis of Corrosion and Perforation of 316L Bimetallic Composite Pipe Weld in a Gas Field[J]. Total Corrosion Control, 2017, 31(10): 56-60.

[14] 郭崇晓，蒋钦荣，张燕飞，等. 双金属复合管内覆(衬)层应力腐蚀开裂失效原因分析[J]. 焊管，2016，39(2): 33-38.
GUO Chong-xiao, JIANG Qin-rong, ZHANG Yan-fei, et al. Stress Corrosion Cracking Failure Analysis on Bimetal Composite Pipe Lining Layer[J]. Welded Pipe and Tube, 2016, 39(2): 33-38.

[15] LI Li-ying, XIAO Jun, HAN Bin, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joints of L415/316L Bimetal Composite Pipe Using Post Internal-Welding Process[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2020, 179: 104026.

[16] LI Li-ying, XIAO Jun, HAN Bin, et al. Welding L415/316L Bimetal Composite Pipe Using Post-Internal-Welding Process[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2020, 73(3): 675-689.

[17] 朱瑶. 双金属复合管焊接接头组织与性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
ZHU Yao. Study on Microstructure and Properties of Welded Joint of Bimetallic Composite Pipe[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.

[18] 田彩刚, 李文波, 彭新凯, 等. 双金属复合管焊接失效原因分析[J]. 油气田地面工程, 2016, 35(2): 80-83.
TIAN Cai-gang, LI Wen-bo, PENG Xin-kai, et al. Aralysis of Failure Cause of the Welding of Double Metal Composite Pipe[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2016, 35(2): 80-83.

[19] 梁龙贵, 张凯旋. 探究双金属复合管内衬塌陷问题与建议[J]. 化工管理, 2018(5): 14.
LIANG Long-gui, ZHANG Kai-xuan. Probe into the Problem and Suggestion of Lining Collapse of Bimetallic Composite Pipe[J]. Chemical Management, 2018(5): 14.

[20] 魏帆, 姜义, 吴泽, 等. 双金属复合管鼓包机理分析和试验研究[J]. 天然气与石油, 2017, 35(5): 6-11.
WEI Fan, JIANG Yi, WU Ze, et al. Mechanism Analysis and Testing Research on the Buckling of the Bimetal Lined Pipe[J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35(5): 6-11.

[21] 李发根. 316L 双金属复合管风险评价及控制措施攻关[R]. 库尔勒: 塔里木油田公司, 2017.
LI Fa-gen. Risk Assessment and Control Measures of 316L Bimetal Composite Pipe[R]. Korla: Tarim Oilfield Company, 2017.

[22] 潘旭, 周永亮, 冯志刚, 等. 双金属复合管内衬塌陷问题与建议[J]. 石油工程建设, 2017, 43(1): 57-59.
PAN Xu, ZHOU Yong-liang, FENG Zhi-gang, et al. Problems and Suggestions on Collapse of Double Metal Composite Pipe Lining[J]. Petroleum Engineering Construction, 2017, 43(1): 57-59.

[23] 董阳, 周好斌, 苏航, 等. 双金属复合管界面结合性能概述[J]. 化工技术与开发, 2020, 49(10): 36-38.
DONG Yang, ZHOU Hao-bin, SU Hang, et al. Overview of Interface Bonding Properties of Bimetal Composite Pipe[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2020, 49(10): 36-38.

[24] 陈海云, 曹志锡. 热载荷对双金属复合管残余接触压力的影响[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(2): 86-89.
CHEN Hai-yun, CAO Zhi-xi. Influence of Heat Load to the Residue Contact Pressure of Bimetal Composite Pipe[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(2): 86-89.

[25] 丁晗, 李先明, 安超, 等. L245/316L 双金属复合管的失效分析[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(2): 157-161.
DING Han, LI Xian-ming, AN Chao, et al. Failure Analysis of L245/316L Double Metal Composite Pipe[J]. Corrosion & Protection, 2018, 39(2): 157-161.

[26] 罗睿, 余世杰, 袁鹏斌, 等. 316L 与 X65 在模拟流动地层水中电偶腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2016, 13(4): 162-167.
LUO Rui, YU Shi-jie, YUAN Peng-bin, et al. Galvanic Corrosion Behavior of X65/316L Coupled in Simulated Flowing Formation Water[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(4): 162-167.

责任编辑：刘世忠