

API J55 套管的膨胀性能分析*

张建兵^{1,2} 王长宁² 袁孟嘉²

(1.西安交通大学 2.长庆石油勘探局)

张建兵等. API J55 套管的膨胀性能分析. 天然气工业, 2006, 26(2): 88-91.

摘要 可膨胀的套管管材是膨胀套管技术的核心技术之一。模拟井眼中的套管膨胀力学环境,对3根国产 $\varnothing 114.3$ mm API J55 套管(壁厚 6.35 mm)在原始状态和热处理状态下分别进行了径向 6.2%及 16.5%的膨胀试验,对膨胀前后套管的几何精度、材料相关性能及套管的实物性能进行了检验。发现标准 API J55 套管在进行幅度为 16.5%的径向膨胀后,仍然具有较好的基本性能指标,但同时发现该种套管由于材料性能方面的原因,存在变形困难的问题,还发现套管在膨胀后抗挤强度下降显著。分析结果对于可膨胀套管管材研究具有重要参考价值。

关键词 钻井 固井 膨胀套管 API 材料 试验

膨胀套管技术是近年来在油气井建井及修井工程领域内出现的重大新兴技术之一,国外专家预言,这一技术将对钻井工程技术产生革命性的影响^[1],它将彻底改变现有的油气井井身结构设计方法,极大地节约建井成本,经济有效地修复腐蚀套损井。在钻井技术发达的美国,膨胀套管技术已经有了近 50 年的应用历史。在我国,中国石油及中国石化的有关研究机构目前都在积极开展此项技术的应用研究^[2-4]。

膨胀套管的基本原理基于油气井井筒内的金属管材冷扩径技术,通过机械挤胀的方法对下入井筒内的管柱进行径向膨胀,使其发生永久塑性变形,从而使下入井眼的管柱所引起的可利用的井眼直径的减小达到最低限度^[5]。寻求膨胀性能良好的适宜的套管管材是膨胀套管技术的关键技术之一。

长庆油田积极跟踪这一世界先进技术,尝试采用膨胀套管技术修复腐蚀套损井。认为对可膨胀套管管材的研究指导思想,主要以满足本油田的基本需要为出发点,又要力求管材低成本易获取。在研究思路上要循序渐进,首先对现有管材进行优选研究,积累认识,最终研究出性能满足需要的可膨胀套管。考虑到陇东油田油层套管普遍采用 $\varnothing 139.7$

mm J55 套管的现实情况,决定对标准 API J55 套管的膨胀性能进行试验分析研究,为下一步可膨胀套管研究提供参考依据。

一、API J55 套管的膨胀试验

试验随机选取了国内某企业生产的 $\varnothing 114.3$ mm API J55 套管(壁厚 6.35 mm)3 根,该企业 J55 套管的熔炼分析化学成分(内控标准)见表 1。

表 1 某企业 J55 套管钢的化学成分

元素	C	Si	Mn	P	S	Al
Wt (%)	0.35~0.40	0.20~0.35	1.25~1.45	≤0.35	≤0.35	≤0.01

膨胀前对 3 根套管的几何外形、材料力学性能等按照相关标准进行了测量检验。对不同热处理状态下的试验结果进行对比,任选其中两根套管进行了热处理,热处理温度为 840 ± 10 °C,热处理时间为 14 min,出炉后空冷至常温。任选 1 根进行了热处理的套管进行径向变形量为 16.5% (内径变形量,下同)的扩径膨胀,对另两根套管进行径向变形量为 6.2% 的扩径膨胀。膨胀是在 350 t 拉拔机上进行的。扩径后对 3 根套管的几何外形、材料力学性能及套管实物性能进行了测量检验。

* 本文受中国石油天然气集团公司石油科技中青年创新基金(03E7037)资助。

作者简介: 张建兵,1974 年生;2003 年 7 月毕业于原西南石油学院油气井工程专业,获工学博士学位;现在西安交通大学博士后流动站与长庆局博士后科研工作站从事材料科学与石油工程交叉学科的研究工作。地址:(710021)陕西省西安市未央路 151 号。电话:(029)86594626。E-mail:zhjb@people.mail.com.cn

二、试验结果分析

要确认某种套管是否可作为膨胀套管,认为主要应该考虑如下4个方面:

(1)套管本身是否具有足够的制造精度以保证变形的均匀性^[6]。

(2)套管膨胀(变形)的难易程度。

(3)套管膨胀后是否出现超标准的裂纹等缺陷。

(4)套管膨胀后其使用性能是否仍然满足相关标准。

主要针对以上几个技术要求,对此次 $\varnothing 114.3$ mm API J55 套管膨胀试验的结果进行分析。为阐述简洁,以下将变形量为 16.5% 的 1 根套管称为 A,将变形量 6.2%、但膨胀前未作热处理的 1 根套管称为 B,将变形量 6.2%、膨胀前作了热处理的 1 根套管称为 C。

1.套管的几何精度

(1)壁厚不均度。因为套管在膨胀时会发生应变集中,套管的壁厚不均度会在原基础上增加,所以套管的壁厚不均度应作为可膨胀套管的一个重要控制指标^[6]。对每根套管分别在纵向等距选取了 4 个截面,每个截面选取了 8 个点,对其膨胀前后的壁厚进行了测量,计算得到了相应的壁厚不均度,见表 2。

表 2 3 根套管膨胀前后的壁厚不均度值

项目	A	B	C
膨胀前	3.4%	4.9%	3.8%
膨胀后	4.1%	6.0%	5.2%

API 标准规定的无缝套管壁厚不均度的上限值为 12.5%,从表 2 中的试验数据可以看出,此次试验套管的初始壁厚不均度是比较小的,膨胀后的壁厚不均度虽然都出现了上升现象,但仍然在 API 标准

的规定范围内,远低于标准规定的上限值,认为此次试验套管的壁厚精度是满足套管膨胀要求的。

(2)不圆度。如果膨胀后套管的不圆度值偏大,将会导致其和外层套管贴合不紧密,对膨胀后的 3 根套管所测的所有 6 个截面中,有一个截面的不圆度值为 2%,有两个截面为 1%,其余 3 个均不大于 0.6%。总体结果是可以接受的。

(3)长度变化。经测量膨胀后套管长度减小约 4.25%,与国外作业数据基本相符。

(4)壁厚变化。膨胀后 A 套管的壁厚减薄约 8.8%,B 和 C 套管的壁厚减薄约 5.5%,减小幅度与国外作业数据相当。

2.膨胀力

膨胀力的大小反映了套管膨胀(变形)的难易程度。此次试验 A 套管的膨胀力为 62 t(相当压强 59.5 MPa),B 套管的膨胀力为 63 t(相当压强 67.4 MPa),C 套管的膨胀力为 54 t(相当压强 57.8 MPa)。

以此次膨胀力数据和国外数据对比,此次膨胀的膨胀力偏大。Enventure 公司(当今世界领先的膨胀套管技术服务公司)在某油田膨胀管施工所用 LSX-80 钢级,6.35 mm 壁厚的膨胀管,在膨胀率为 13.4% 的情况下,机械膨胀力约为 29.5 t。另外,API 规定 $\varnothing 114.3$ mm J55 套管(壁厚 6.35 mm)的内屈服压力下限为 36.9 MPa,膨胀后的内屈服压力会略有降低,即该种套管膨胀后的抗内压强度会低于此值,高的膨胀工作液压力会损坏膨胀后的套管。影响膨胀力的因素是多方面的,有材质本身的因素,也有膨胀工具锥角的因素,另外,膨胀时的润滑状况也会影响膨胀力的大小。但综合分析后认为此次试验膨胀力大的主要因素是材质因素。

3.套管的塑性性能及膨胀后套管的探伤结果

膨胀前后套管材料的纵向延伸率指标测量见表 3。

表 3 3 根套管在不同阶段的纵向延伸率值及 API 规定值

套管编号	A			B			C		
	试样面积 (mm ²)	API 值 (%)	测试值 (%)	试样面积 (mm ²)	API 值 (%)	测试值 (%)	试样面积 (mm ²)	API 值 (%)	测试值 (%)
原始状态	161	20.0	25.0	162	20.0	25.0	159	19.0	30.0
热处理后	160	19.0	29.0	—	—	—	158	19.0	30.0
膨胀后	144	19.0	22.0	151	19.0	23.0	154	19.0	26.0

从表 3 中的数据可以看出,3 根套管的纵向延伸率在膨胀后都出现了下降,但都大于 API 规定的

下限值。对膨胀后的套管进行了磁粉探伤,未发现裂纹。从现有检测结果可以基本认为此次试验的套

管塑性性能满足膨胀要求。

4. 套管膨胀后的材料性能

(1) 材料拉伸性能。对 3 根套管在原始状态、热处理后及膨胀后的纵向拉伸性能指标进行了检测, 结果见表 4。API 标准规定的 J55 钢级的套管屈服

强度下限为 379 MPa, 上限为 552 MPa, 抗拉强度下限为 517 MPa, 未规定上限值。从表 4 中的数据可以看出, 3 根套管膨胀前后的纵向拉伸强度性能指标都满足 API 标准要求。从表 4 中的数据还可以看出, 膨胀后套管的屈强比出现了上升。

表 4 3 根套管在不同阶段的纵向拉伸力学性能指标

测试状态	A			B			C		
	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	屈强比	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	屈强比	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	屈强比
原始状态	439	686	0.64	443	697	0.64	451	698	0.65
热处理后	444	652	0.68	—	—	—	454	666	0.68
膨胀后	503	729	0.69	472	698	0.68	476	688	0.69

(2) 冲击试验值。此次试验未测横向夏比 V 型缺口冲击吸收能, 测试所得的纵向夏比 V 型缺口冲击吸收能见表 5。API Spec 5CT 标准在补充要求中给出了 J55 钢级套管管子的横向和纵向冲击试验要求, 要求 J55 套管的纵向最小夏比 V 型缺口冲击吸收能为 27 J, 此次试验所检测的膨胀前后的所有试样冲击值均大于 27 J, 符合 API 标准的补充要求对于 J55 套管纵向冲击值的要求。

表 5 3 根套管在不同阶段的纵向冲击值

套管编号	A 管的冲击吸收能 (J)			B 管的冲击吸收能 (J)			C 管的冲击吸收能 (J)		
	1 号	2 号	3 号	1 号	2 号	3 号	1 号	2 号	3 号
原始状态	32.0	31.0	33.0	32.0	31.0	32.0	40.0	36.0	37.0
热处理后	51.0	56.0	52.0	—	—	—	51.0	49.0	44.0
膨胀后	34.0	35.0	44.0	38.0	39.0	36.0	39.0	48.0	37.0

(3) 硬度。此次试验所得的套管在不同阶段的硬度值见表 6, API Spec 5CT 标准未规定 J55 钢级套管的硬度值, 所以测得的硬度值仅供参考。可以看出, 膨胀后套管材料的硬度值增加了。

表 6 3 根套管在不同阶段的硬度值

套管编号	A 管的硬度值 (HB)			B 管的硬度值 (HB)			C 管的硬度值 (HB)		
	外部	中间	内部	外部	中间	内部	外部	中间	内部
原始状态	215	219	211	224	215	215	211	215	215
热处理后	207	207	207	—	—	—	202	202	202
膨胀后	229	229	234	219	224	229	219	224	219

(4) 残余应力。用环切法对此次试验套管在不同阶段的平均环向残余应力进行了测试, 测试结果见表 7。

表 7 3 根套管在不同阶段的残余应力值

项目	A 管残余应力 (MPa)	B 管残余应力 (MPa)	C 管残余应力 (MPa)
原始态	-0.56	-9.88	-9.01
热处理后	-15.2	—	-6.16
膨胀后	-214.87	-194.55	-235.97

从表 7 中的数据可以看出, 膨胀前套管的残余应力水平是比较低的, 膨胀后套管的残余应力水平增长非常显著, 且为环向收缩残余应力。这种高的残余应力的存在对膨胀套管服役是非常有害的, 它会使套管在井筒内发生收缩塑性变形, 同时会降低套管的抗挤强度。但另一方面, 这种残余应力会提高套管的抗内压强度。分析认为这种残余应力主要是由于塑性变形不均匀及套管材质本身性能不均一造成的。

5. 套管膨胀后的实物力学性能

套管膨胀后的抗拉强度会略有上升, 抗内压强度基本不变或稍有下降, 但抗挤强度会出现显著下降^[7]。本次试验样品有限, 所以, 把检验重点放在了套管膨胀后抗挤强度的考察上, 对膨胀后的 3 根套管进行了实物挤毁试验。

(1) 管体抗拉强度。计算得到的管体抗拉强度见表 8。

表 8 3 根套管在不同阶段的管体抗拉强度

项目	A 管抗拉强度 (kN)	B 管抗拉强度 (kN)	C 管抗拉强度 (kN)
原始态	978	970	1010
热处理后	987	—	1016
膨胀后	1157	1064	1078

API标准规定 $\varnothing 114.3$ mm J55套管(壁厚6.35 mm)的管体抗拉强度为818 kN,从计算结果来看,膨胀前后所有套管的抗拉强度均符合标准。

(2)管体抗内压强度。计算得到的管体抗内压强度见表9。

表9 3根套管在不同阶段的管体抗内压强度

项目	A管抗内压强度 (MPa)	B管抗内压强度 (MPa)	C管抗内压强度 (MPa)
原始态	43.8	43.4	45.3
热处理后	44.2	—	45.6
膨胀后	39.8	43.0	43.6

*表中计算时所采用的屈服强度为测得的管子纵向屈服强度,计算结果仅供参考。

API标准规定 $\varnothing 114.3$ mm J55套管(壁厚6.35 mm)的管体抗内压强度下限为36.9 MPa, $\varnothing 139.7$ mm J55套管(壁厚7.72 mm)的管体抗内压强度下限为36.7 MPa,从计算结果来看,膨胀前3根套管的抗内压强度均符合标准,膨胀后3根套管的抗内压强度即满足 $\varnothing 114.3$ mm J55套管的标准,也满足 $\varnothing 139.7$ mm J55套管的标准。同时,由前面的环向残余应力检测结果可知,膨胀后的套管存在较大的环向收缩残余应力,这种残余应力的存在有利于套管的抗内压性能的提高。

(3)管体抗挤强度。在挤毁试验机上对膨胀后3根套管的抗挤强度进行了实物试验,结果发现A套管的抗挤强度为17 MPa,B套管和C套管的抗挤强度均为24.5 MPa。

API标准规定 $\varnothing 114.3$ mm J55套管(壁厚6.35 mm)的管体抗挤强度下限为34.2 MPa, $\varnothing 139.7$ mm J55套管(壁厚7.72 mm)的管体抗挤强度下限为33.9 MPa。从试验结果来看,3根套管膨胀后的抗挤强度均低于 $\varnothing 114.3$ mm J55套管的标准规定值,也低于 $\varnothing 139.7$ mm J55套管的标准规定值,且膨胀幅度越大,抗挤强度越低。膨胀后套管抗挤强度的降低主要是金属材料包辛格(Bauschinger)效应的影响,目前尚无十分有效的方法克服这一现象。倘若修复套损井,尚有原套管可以分担部分挤压载荷,但若是应用于裸眼井段,则低的抗挤强度是很

难接受的。可见,膨胀后套管抗挤强度的降低是膨胀套管技术所面临的一个难题。

三、结论与认识

通过分析,认为本次试验的J55套管:

(1)制造精度高,膨胀后的几何精度仍然满足相关标准。

(2)材料屈服比低,塑性好,可变形程度大。

(3)膨胀力偏大,偏高的膨胀变形力要求高的液压,高的液压会超过膨胀管的抗内压强度,还会给现场套管膨胀作业施工带来其它诸多不利因素,同时会大大增加膨胀套管螺纹抗泄漏设计的难度。

(4)膨胀后抗挤强度低,已经低于相关标准规定值。

(5)套管膨胀后的平均环向残余应力偏大。

长庆局工程院李前春、杨博、毛连海等为本次套管膨胀试验做了具体工作,宝山钢铁股份有限公司韩建增及陈建初协助进行了本次套管膨胀后的性能检测工作,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] WILLIAM FURLOW. Expandable casing program helps operator hit TD with larger tubulars [J]. Offshore, 2000, 60 (1).
- [2] 孟庆坤,谢正凯,冯来.可膨胀套管技术概述[J].钻采工艺,2003,26(4).
- [3] 练章华,施太和,韩建增.膨胀套管摩擦系数与轴向位移的模拟研究[J].石油机械,2002,30(1).
- [4] 张建兵,施太和,练章华等.钻井实体膨胀管纵向金属流动的试验研究[J].西南石油大学学报,2004,26(2).
- [5] 张建兵,施太和,练章华.钻井实体膨胀管技术[J].石油机械,2003,31(增刊).
- [6] 张建兵,毛连海,施太和等.膨胀管膨胀过程中不均匀变形的试验研究[J].石油钻采工艺,2004,26(2).
- [7] RICHARD C. HAUT, QAMAR SHARIF. Meeting Economic Challenges of Deepwater Drilling With Expandable-Tubular Technology [C]. Deep Offshore Technology Conference, Stavanger, Norway October 1999.

(收稿日期 2005-08-19 编辑 钟水清)