维普资讯 http://www.cqvip.com

7-12,16

ERW直缝焊套管生产及应用中需要注意的几个问题

张 毅 李鹤林
（中国石油天然气总公司石油管材研究所 710061）

TG335.75

摘要 ERW直缝焊套管已在我国广泛使用，本文结合生产及使用中发现的问题浅谈几点看法。内容包括焊缝沟腐蚀问题、灰斑问题、母材与焊缝的韧性匹配问题，钢材分层及断口分离问题以及硬度偏低引起的耐磨性问题等。

主题词 电阻焊 石油套管 沟槽腐蚀 韧性 耐磨性

1 引言

70年代以来，随着纯净钢、连铸板坯、非金属夹杂物球化处理、控制轧制、控制冷却、高频电阻焊接以及低碳微合金化沉淀硬化钢的发展，世界上很快就开发出ERW直缝焊管，并伴随着电子计算机自动控制和在线多探头无损探伤技术，使ERW焊管的质量进一步提高，从而进入被UOE管和无缝钢管所垄断的使用领域。目前生产直缝焊管的技术以日本钢铁企业最具有代表性，他们生产的ERW套管已广泛地用于各种油井，包括一些高寒冷地区以及深井等特殊的油气井。据统计，截止1993年6月，日本各厂家共向中国提供了32万t ERW套管，其中以新日铁居多，达151786t（见表1）。这当中绝大部分属普通ERW套管，只有1/10左右是按订货补充技术条件订购的特殊用途ERW套管。从使用情况看，ERW套管广泛用在我国大庆、胜利、辽河、中原、大港、冀东、长庆、塔里木、吐哈、渤海、南海各油、气田，钢级、规格符合API J—55、N—80的5in、5 $\frac{1}{2}$in、7in、9 $\frac{5}{8}$in、10 $\frac{3}{4}$in、13 $\frac{3}{8}$in、20in不等。见表2。

需要强调的是，ERW焊管与无缝管相比，毕竟存在着一条焊缝。随着人们对焊缝认识的不断深化，通过使用又提出了一些新问题，如焊缝沟腐蚀问题，灰斑问题，母材与焊缝的"等韧性"匹配问题，钢材分层及断口分离问题，以及硬度偏低的耐磨性问题等。本文将对上述问题作简要分析，并就如何预防提几点看法。

表1 日本向中国提供ERW套管量

厂家	数量/t	所占比例/%
新日铁	151786	47.1
住友金属	86895	27.0
NKK	43030	13.4
川崎制铁	40170	12.5

表2 新日铁供应中国部分ERW套管的规格数量

油田	规格 mm	钢级	数量t
大庆	139.7	TC—60LE	5124
	244.5	TC—80HE	500
	339.7	TC—60LE	500
中原	244.5	NT—55HE / NT—80HE	6060
塔里木	339.7	NT—80HE	3400
吐哈	273.0	NT—55E	5000
大港	339.7	NT—55E / NT—80HE	2100
海洋	508.0	J—55/K—55	4316
长庆	273.0 / 127.0	NT—55E	1500 / 7500

维普资讯 http://www.cqvip.com

2　焊缝韧性

冲击韧性是评价冶金质量敏感的性能指标，一般认为，ERW套管的焊缝强度较易满足标准要求，但若在选材、焊接及热处理方面控制不当，焊缝韧性难以保证。研究表明[1] ERW套管焊缝韧性，主要受母材韧性、母材Pcm值(化学成分)及焊接工艺影响。图1列出部分ERW焊管母材(横向)韧性与焊缝韧性对比，可以看出，随着母材韧性提高，焊缝韧性相应提高，母材$FATT_{50}$下降，焊缝$FATT_{50}$亦下降，其中，性能优异者，焊缝$FATT_{50}$可达到与母材$FATT_{50}$"等韧性"水平。而焊接质量差的管子，焊缝韧性低于母材。

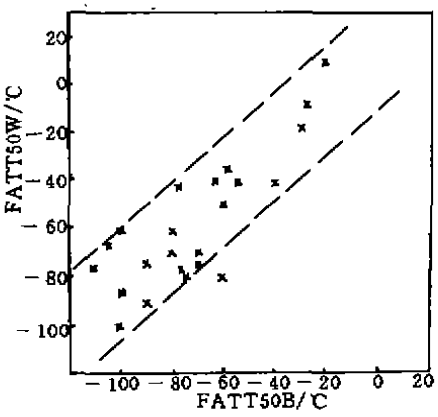


图1　ERW焊缝$FATT_{50}W$与母材$FATT_{50}B$关系

关于化学成分对焊缝韧性的影响，表3列出同一机组生产同钢级ERW焊管不同成分的焊缝韧性。对比分析，随着钢中C、S、Pcm、C_E值降低，焊缝韧性明显提高。

表3　ERW焊管不同成分的焊缝韧性

元素含量/wt%								Pcm	C_E	$\sigma_{r0.5}$ MPa	Akv* 20℃/J	$FATT_{50}$ ℃
C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti					
0.08	0.15	1.15	0.02	0.004	—	0.01	0.03	0.145	0.272	463	70	−80
0.18	0.14	0.79	0.019	0.008	0.02	0.01	0.006	0.228	0.320	454	28	−50

* 试样尺寸5×10×55(mm)

另外，ERW套管的焊缝韧性还可以采取控制焊缝亮线宽度、流线夹角与钢中非金属夹杂物来实现。随着亮线带加宽、流线夹角加大、MnS等夹杂物含量增多，焊缝韧性降低[1]。

对于油层套管而言，焊缝韧性还与抗射孔开裂一一对应[2]。表4列出不同钢级ERW套管焊缝与母材韧性值要求，参照该标准生产的ERW套管，除满足低温(−40℃)环境使用外，还能保证射孔不裂，在大庆进行的ERW套管下井模拟射孔实验充分证实了这一点[3]。

表4　ERW套管韧性值

钢级	试验温度	试样尺寸 mm	焊缝Akv/J		母材Akv/J		$FATT_{50}$ ℃
			平均值	最小值	平均值	最小值	
NT−55E	0℃	5×10×55	20	11	27	11	≤−30
TC−60LE	40−℃	5×10×55	27	22	41	34	≤−50
NT−80HE	0℃	5×10×55	20	11	27	11	≤−30

3　灰斑缺陷

灰斑是存在于焊缝熔合线处的平面缺陷，断口上一般呈灰色平斑状，并常为圆形、椭圆形或长条形，无显著塑性变形见图2。它包括冷焊和过烧两种情况，利用扫描电子显微镜、X射线能谱仪及电子探针对灰斑研究

维普资讯 http://www.cqvip.com

表明，灰斑区常聚集分布着 Al、Si、Cr、Mn、Fe 等元素的氧化物如图 3。说明灰斑主要是由焊接过程中焊区金属氧化造成的。其产生的主要影响因素有母材的化学成分、焊接温度、焊接速度、挤压量、开口角、带钢边缘形状及表面状态等。

灰斑缺陷对焊缝力学性能影响，与灰斑的严重程度有关。灰斑缺陷轻微存在对焊缝强度影响不大，严重灰斑相当于钢中裂纹，一方面减少实际承载面积，另一方面由于灰斑存在，焊缝区应力状态发生变化、产生应力集中，对性能影响较大。



图 2　灰斑缺陷的宏观特征

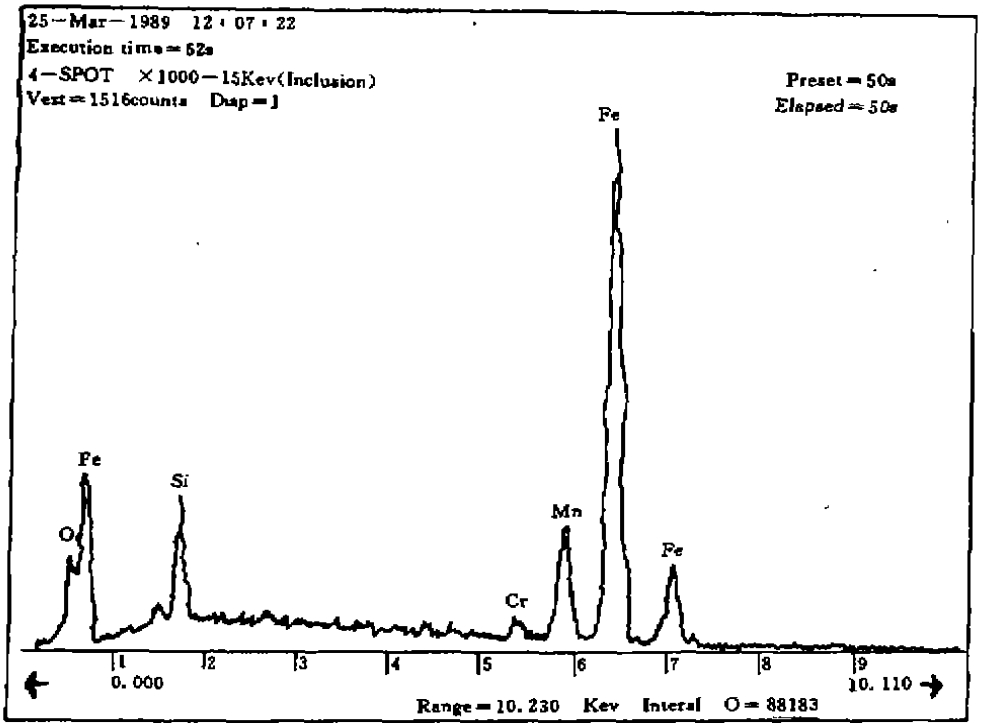


图 3　灰斑区氧化物定点分析结果

灰斑对焊缝塑韧性影响大，而且数据分散。例如当灰斑面积为 5%～20%时，δ 下降 10%～35%，ψ 至少下降 50%，Akv 下降 10%～80%，见图 4。焊缝断裂韧性试验结果表明，灰斑缺陷主要降低断裂韧性中的塑性分量，而塑性分量占韧性的绝大部分。由此可见，灰斑存在，显著降低裂纹萌生及扩展能量，这亦是塑韧性指标显著下降的原因所在。

另外，灰斑缺陷对焊缝区选择性腐蚀的敏感性也有一定影响，尤其是过烧或回流夹渣，虽然分布于接近钢管表面处，但向焊缝深部延伸较大，所以极易产生和促进沟腐蚀，应严格控制。

灰斑主要靠严格的焊接工艺和质量保证

维普资讯 http://www.cqvip.com

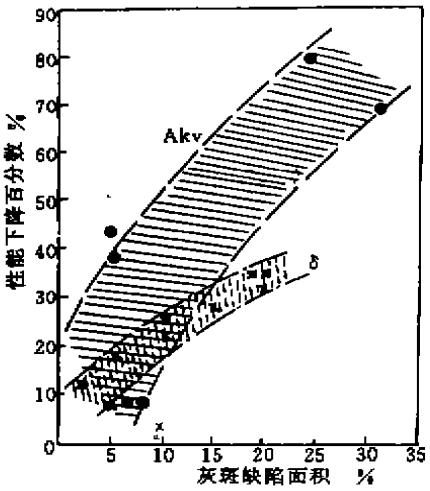


图4　灰斑面积对性能影响

体系来避免。如采用隋性气体保护焊，红外线跟踪及焊接热输入自动监控、超声波无损探伤，材质成分要求 Mn/Si＝4～15 等。

4　沟状腐蚀

沟状腐蚀属于选择性腐蚀，是 ERW 套管使用中值得重视的问题之一。由于 ERW 直缝焊管焊缝与母材微区成分、夹杂物含量及显微组织存在着显著差别，故会在焊缝与母材金属之间产生电位差，并形成原电池，导致焊缝产生严重的局部腐蚀——沟状腐蚀。这就是说，焊缝的存在，ERW 套管都有发生沟状腐蚀的潜在危险。防止套管沟状腐蚀，除采用内壁涂层、降低介质中 Cl^- 离子浓度和含 O_2 量（$O_2 \leqslant 0.5mg/L$）、添加缓蚀剂等方法外，生产出耐沟状腐蚀的 ERW 套管依然是最有效的措施。新近研究表明，其措施主要有三点：

（1）组织均匀化，减少母材与焊缝的电位差。降低钢中含碳量，C＝0.08%～0.04%，使母材与焊缝均为细晶粒铁素体组织，晶粒度 10～12 级，见图 5。另外，焊后采用退火或淬火高温回火，使母材、焊缝及热影响区组织均匀化，从而减小电位差及沟腐蚀倾向，见图 6。

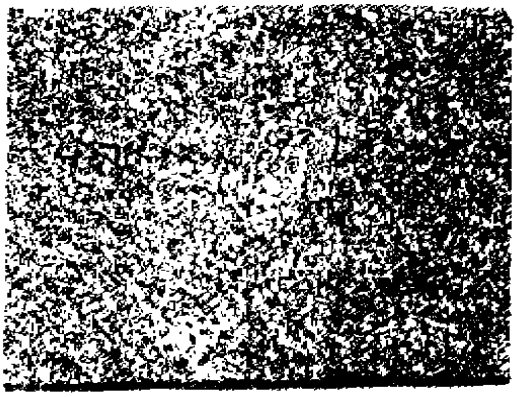


图5　ERW 套管焊缝金相组织 100×

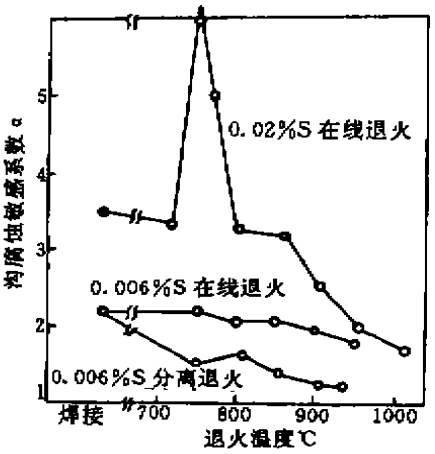


图6　退火热处理对沟状腐蚀影响

（2）控制硫化物夹杂。在细晶粒铁素体钢中，MnS、FeS 等夹杂物往往沿焊缝区析出，加大与基体金属的电位差。因此，降低钢中含 S 量，使 S≤0.005%，可抑制 MnS 生成，钢中添加 Ti 等微合金化元素，可抑制 FeS 生成，并降低沟腐蚀敏感性（图 7）。

（3）提高耐腐蚀性。添加 Cu、Ca 等合金元素，这方面可分加 Cu、Cu－Ca 两种方式，图 8 即为 Cu、Ca 元素对耐沟腐蚀的影响。目前看来，钢中 Cu 含量可控制在 0.08%～0.3%范围，Ca 可加到 20ppm，见图 9。

值得注意的是，对于油、气并存或注水开发的油田，使用 ERW 套管还必须考虑介质

维普资讯 http://www.cqvip.com

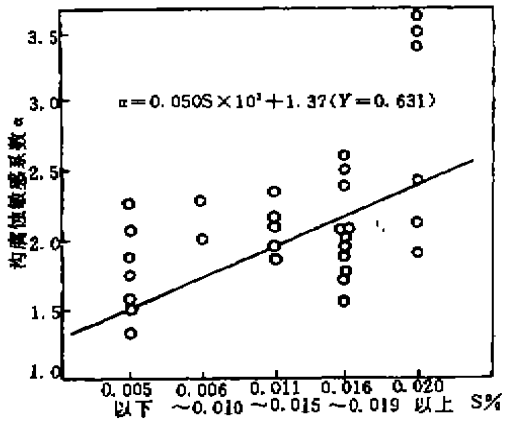


图 7　钢中硫含量对沟状腐蚀敏感系数影响

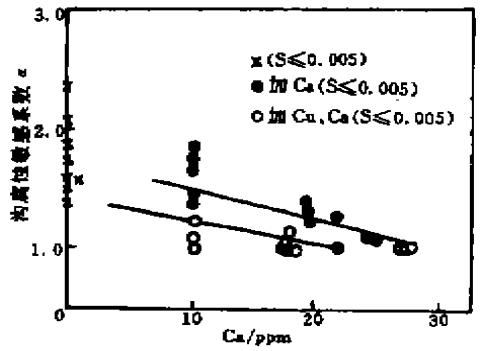


图 9　钢中加 Ca 对沟状腐蚀影响

中 CO_2、H_2S 流体中含 O_2 量以及温度、压力等因素的影响。其中酸性介质的氢致开裂(HIC)、硫化物应力腐蚀开裂(SSCC)，CO_2 酸气腐蚀与注水介质 O_2 腐蚀等均是不可忽视的因素。新日铁新开发的J－55抗腐蚀

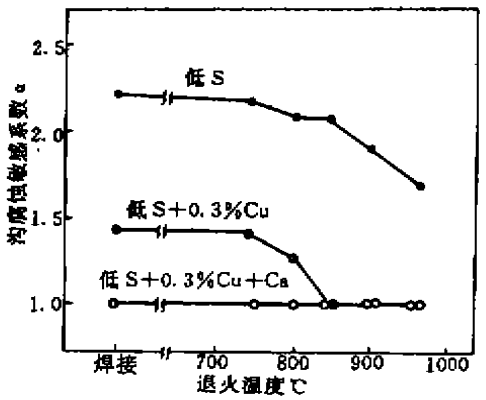


图 8　钢中 Cu、Ca 对沟状腐蚀影响

ERW 套管(化学成分见表 5)，在人造海水中通入 100%H_2S 气体或 50%H_2S＋50%CO_2 混合气体，经 25℃和 70℃腐蚀试验，焊缝与母材腐蚀速率相同，腐蚀量 0.15～0.22mm/年。但水中含 O_2 量提高，即便不通入 H_2S 或 CO_2 气体，管壁也会出现局部选择性腐蚀。根据实验室试验结果，介质中含 O_2 量在 0.25mg/L 以下，不加 Cu、Ti 合金的 NC－55E ERW 套管也有较高的抗沟腐蚀能力，O_2 在 0.5mg/L 以内，加 Cu、Ti 元素的 ERW 套管，一般不发生沟腐蚀，但 O_2＝2～3mg/L 时，添加 0.015%Ti 和 0.30%Cu 也不能保证不产生沟状腐蚀，当然，O_2≥5mg/L 后，各种 ERW 套管的沟腐蚀都在所难免。因此，预防 ERW 套管的沟状腐蚀，必须与除 O_2 加缓蚀剂等措施结合起来考虑。

表 5　新日铁抗腐蚀 ERW 套管化学成分

元素	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Ti
含量%	0.22	0.18	1.23	0.021	0.006	0.03	0.027	<0.002

5　分层与断口分离

分层是热轧板卷常见的缺陷形式之一，断口分离则是 ERW 套管(板卷)力学性能试验时，在平行于主应力方向出现的材料分离现象，断口上表现为垂直主裂纹面的裂纹(图 10)。

研究表明[4]，出现分层或断口分离，裂纹内和裂纹尖端均有较严重的链珠状夹杂物和成分偏析带。见图 11。利用光学金相，X 射线能谱仪和电子探针对夹杂物和偏析带进行分

维普资讯 http://www.cqvip.com



图10　ERW套管断口分离

析，分层处夹杂物主要是SiO_2、$Fe_{1-x}O$、铬铁矿、铁尖晶石以及Fe、Mn的硅酸盐和MnS等，夹杂物种类多，聚集生大，并含有Ca、Mg、Ti、K、Cr等元素，其形成与冶炼过程中炉衬材料卷入钢水内有关。形成断口分离的夹杂物主要为条片状MnS、未固溶NbC等，偏析带内Mn、C、P、B等元素含量较高，说明裂纹是由于夹杂物和成分偏析造成的。目前认为，产生断口分离的基本条件是在低于Ar_3温度即α+γ两相区进行终轧，终轧温度愈低，形变量愈大，断口分离倾向就愈大。



图11　ERW套管偏析带100×

试验证明，出现断口分离对ERW套管力学性能影响不大，产生断口分离的主要原因是带状偏析和条片状夹杂物，带状偏析和条片状夹杂物轻微时，在一般环境中也不影响实际使用，但在腐蚀环境中，尤其是在H_2S等存在的条件下，夹杂物与带状偏析严重的地方氢极易聚集，从而产生H_2S应力腐蚀破坏或氢致开裂，影响套管的正常使用。当然，分层本身对腐蚀性能影响就很大，因此在ERW套管中是绝不允许的。

分层以及带状偏析和条片状夹杂物严重者，对钢的工艺性能也有影响，即在焊管生产初期的切边时，或成型过程中产生裂纹，将迫使生产中断，造成严重的经济损失。

为防止分层或断口分离出现，从根本上讲应提高钢的冶金质量，如采取各种精炼措施，限制钢中夹杂物级别，降低S、P等有害元素含量。在连铸过程中，应严格控制浇注温度和冷却速度，并采取电磁搅拌等措施，使钢中偏析减小至最低程度。为减少硫化物夹杂的不利影响，还可添加Ca、Re等对硫化物进行球化处理。

6　耐磨性

众所周知，ERW套管所用控轧卷板，材质含碳量普遍较低，一般情况C≤0.20%，最低者仅有0.04%。这种成分设计，虽然对钢的焊接性能和耐腐蚀性能有益，但管材硬度往往偏低。低硬度套管在运输和使用过程中，不仅容易发生磕拉碰伤，而且螺纹与管壁的耐磨性亦不及无缝套管。特别在钻探地质结构比较复杂、纯钻井时间较长或弯曲度较大的油、气井时，钻具难免要与表层套管或技术套管碰撞磨损，形成偏磨。国内某油田已发生三起因表层ERW套管偏磨而在距井口30～200m处泄漏的工程事故，因此，不得不引起人们足够的重视。

7　结论

以上就ERW套管生产和使用中发现的几个问题进行了简要分析。虽然ERW套管具有尺寸精度高，抗挤毁能力强，材质韧性突出、射孔不裂、以及价格便宜等优点，并已在国内各油田推广使用，但无论从生产或使用角度讲，要想合理地选用ERW套管，必须根

（下转第16页）

维普资讯 http://www.cqvip.com

方式。操作者对成型变形花中每一道次轧辊应根据其形状选择对应的轧辊主程，并输入该道次轧辊的所有信息。每一主程都要求输入一定数量的变量值，图 10 为边缘弯曲成型时的主要变量。其中有中心半径(R_C)、中心变形角(A_C)、边缘半径(R_E)、边缘变形角(A_E)以及带钢宽度。

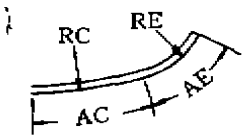


图 10 边缘弯曲成型时的主要变量示意图

屏幕 3：屏 3 询问轧辊自身的信息，如中心孔尺寸及类型、孔型设计、传动比、凸缘间隙(即辊缝)等。

一旦翻过此三页屏幕，操作者即完成机组设计，该系统将自动完成计算和显示连续成型变形花、绘制轧辊加工图样等功能。

4.2 系统的编辑操作

如果要设计的焊管机组与计算机内存的机组有类似的轧辊孔型和成型排列方式，那么为了省时省力，可以调用系统内"机组处理程序"，进行编辑操作。这样，系统就会将计算机内存的焊管机组罗列出来。选出你所需要的机组，对其进行编辑，按设计要求对原机组进行增加和删除。一旦选定机组成型排列方式，即可按回车键。这时系统提出如下问题：①你是否需要绘图文件？②你是否需要后处理文件？③是否要求冲制数控纸带？操作者回答以上问题，系统将运行数据处理的所有程序。例如，若操作者对以上问题均回答"Yes"，系统将进行以下步骤：

(1)运行机组构成程序，由此产生绘图文件、工程图样和加工工艺路线。同时将每一个绘图文件和加工工艺路线显示在彩色监示器上，以便校对；

(2)自动绘制所有图样和连续成型变形花；

(3)系统接受机组中轧辊主程所产生的加工工艺路线，并与预定义的加工工艺文件相结合、设计操作文件。然后，自动后处理(Post－process)这些文件，并设计出生产每一轧辊所需的数控代码。如果需要，该系统将自动产生粗精加工纸带；

(4)系统将自动冲制第 3 步产生的数控纸带，如果需要，此文件也可进行存储。

5 小结

计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)系统，可以应用于传统的轧辊成型和焊管机组设计。它避免了设计人员许多繁重而单调的重复性工作，提高了设计效率和质量，并可以实现设计标准化。

参考文献

1 R Baranowski. Roll design and production system. January 1992 Tube international

2 D Baranowski. Computerised design of tubemill tooling. May 1993 Tube international

3 吕凤翥、蔡建新. 微机绘图软件 AUTO CAD，清华大学出版社，1987 年 7 月第 1 版

(收稿日期：1993—09—10)

(上接第 12 页)

据各油田不同的地质结构、井深设计和腐蚀环境，提出具体的技术条件，并通过检验、评价与质量控制，方能充分发挥 ERW 套管的技术经济效益。

参考文献

1 张毅，霍春永. 输送管选材韧性评价需要注意的几个问题. 焊管，1993(3)

2 冯耀荣，贾立仁. 日本 ERW 套管的韧性评价. 石油专用管，1993(6)

3 直焊缝套管的开发研究及其推广应用. 石油专用管，1992(6)

(收稿日期：1993—10—12)