DOI: 10.3969/j.issn.1000-6826.2023.06.0601

SPHT1 高频焊管焊缝开裂分析

Weld Cracking Analysis of SPHT1 High Frequency Welded Pipe

供稿|苏崇涛，郭晓静，左海霞 / SU Chongtao, GUO Xiaojing, ZUO Haixia

内容导读

某厂家的 SPHT1 钢板制成焊管后，在压扁实验过程中发生了开裂，为找出焊管开裂的原因，采用扫描电子显微镜、光学显微镜和能谱仪分析等手段对开裂焊管的压扁和未压扁部位进行了检验和分析。结果表明，焊管开裂的主要原因是在较高热输入及较大挤压力的焊接工艺下，钢板内分布的条状硫化物夹杂被挤压外露到钢管表面，在夹杂物部位形成裂纹，并在外力作用下扩展导致焊管在压扁试验中开裂。

SPHT1 为管用热轧钢带[1]，以优质低碳热轧薄板为原料，生产的钢管具有耐高温高压的特点。这种低碳热轧钢产品含碳量低、塑性好，有良好的加工成形性能和可焊接性能，被广泛应用于焊管、船舶、压力容器等制造行业[2]。

焊管是钢板或者钢带经卷曲成型后，将弯曲接头拼接对焊制成的钢管，焊接钢管生产工艺简单、效率高、品种规格多，在当前生产中以高频直缝焊和螺旋焊为代表的焊管工艺有着广泛的应用[3-4]。焊管的焊缝部位是其薄弱环节，用户将当前某钢厂生产的 SPHT1 钢板卷曲后采用直缝焊工艺焊接成管，在后续焊管的质量检测中，对已生产的焊管进行压扁试验，发现焊接部位有开裂现象。为了解裂纹产生的原因，本文对焊缝及缺陷部位采用光学显微镜、扫描电子显微镜（SEM）进行检测，对缺陷产生的原因进行分析。

实验材料

压扁试验是一种通过将钢管压扁到规定范围尺寸以显示其缺陷，检测钢管工艺性能的重要试验。在焊管检测中，对钢管施加压力直至管内壁之间的距离达到产品标准所规定的值后卸除载荷。压扁过程中，焊缝位置与施力方向成 90°。试验完毕后，检查试样压缩变形处，如无裂缝、裂口或开裂现象，即认为合格。用来生产焊管的钢板厚度为 2.5 mm，制成钢管的直径为 8 cm，SPHT1 焊管化学成分见表 1，在进行压扁试验过程中，被压扁部位的焊缝处出现了明显的开裂现象，见图 1。

表 1　试验 SPHT1 钢的化学成分（质量分数）　%

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.1	0.35	0.5	0.03	0.03	余量

为系统分析缺陷产生的原因，在压扁部位截取试样进行检测，同时在未压扁部位截取试样作为对照。其中试样 1 为焊接后未压扁部位试样，试样 2 为焊接后压扁部位试样。采用光学显微镜、扫描电子显微镜（SEM）对试样进行检测，并对可能产生缺陷的原因进行分析。

作者单位：本钢技术中心，辽宁　本溪　117000

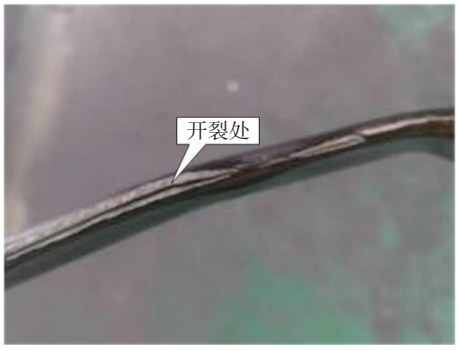

图 1　压扁开裂试样

金相检测

垂直于焊缝截取试样，检测面为焊管横截面焊缝部位。在检测过程中发现，试样 1 虽然未压扁，但是在焊缝区也发现了裂纹，如图 2(a) 所示。图 2(b) 为裂纹在焊缝区域所处位置及扩展情况，从图中可以看出，裂纹开口处位于焊缝热影响区部位，裂纹末端向板厚 1/4 部位扩展。

试样 2 为完全开裂试样，图 3(a) 为试样 2 裂纹及裂纹附近分布的非金属夹杂物形貌；图 3(b) 为裂纹在焊缝区域的所处部位及裂纹扩展情况，可见裂纹开口处于热影响区部位，最终在靠近母材的热影响区部位完全开裂。

图 4 为焊管母材不同位置显微组织分布情况。对母材及焊缝部位组织、晶粒度和夹杂物进行了检

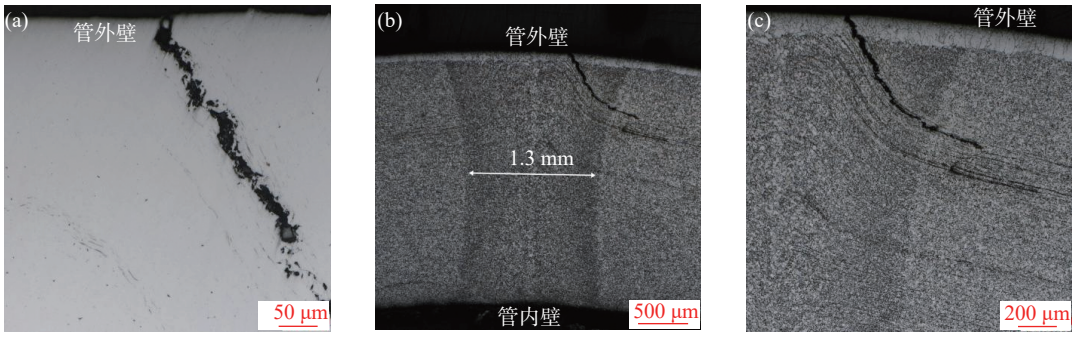

图 2　试样 1 裂纹形貌及母材中非金属夹杂物：(a) 裂纹及夹杂物分布；(b) 裂纹所处部位及扩展情况；(c) 裂纹末端显微组织

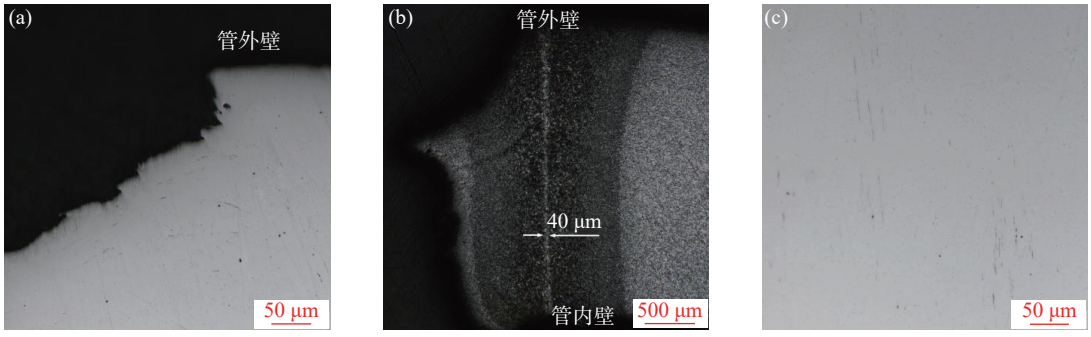

图 3　试样 2 裂纹形貌及母材中非金属夹杂物：(a) 裂纹及夹杂物分布；(b) 裂纹所处部位及扩展情况；(c) 母材中夹杂物分布

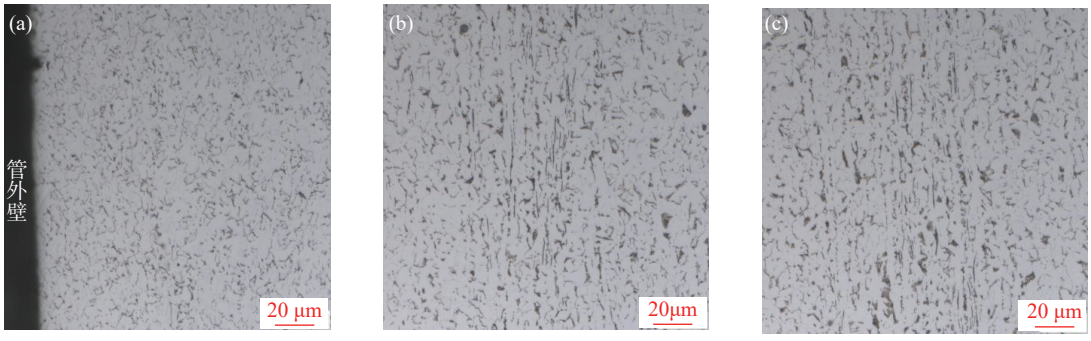

图 4　母材部位显微组织：(a) 板厚度方向边部；(b) 板厚度方向 1/4 部位；(c) 板厚度方向心部

测，晶粒度采用 GB/T 6394—2017 中的比较法，非金属夹杂物级别评定按 GB/T 10561—2005 中 A 法进行评定，结果表明：试样 1 和试样 2 熔合区和热影响区的组织均为贝氏体+铁素体，母材组织均为铁素体+珠光体。试样 1 及试样 2 的母材晶粒度分别为 11.5 和 11.0，B 类夹杂物评级均为 0.5，D 类夹杂物评级均为 1.0。

扫描电子显微镜断口观察

试样 2 在切割过程中发现焊缝部位产生完全开裂，采用扫描电镜对开裂部位的断口形貌进行了观察，见图 5。从图中可以看出，断口部位有多条明显平坦的开裂面，开裂面光滑，略有起伏，未见明显的撕裂痕、滑移台阶，没有明显的形变特征，其上有细小块状、条状附着物。断口局部分布有二次裂纹，二次裂纹周围有少量韧窝状断口分布。对平坦开裂面上的附着物采用能谱分析仪（EDS）进行成分分析，其成分主要为 S、Mn、Fe 元素，如表 2 所示。

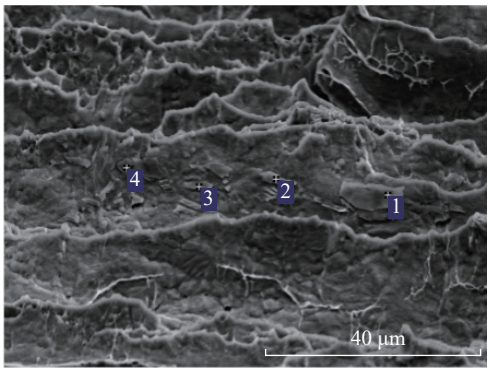

图 5　试样断口微观形貌

表 2　图 5 试样不同部位能谱分析成分（质量分数）　%

位置	S	Mn	Fe
1	7.49	13.98	78.53
2	2.10	4.82	93.08
3	0.20	1.66	98.14
4	2.52	5.22	92.26

检测结果及分析

非金属夹杂物分布

在显微镜下对焊缝部位进行观察，试样 1、2 在焊缝区域均存在裂纹，见图 2~3。2 个试样裂纹的开裂部位及扩展方向存在相似性，裂纹开口均位于焊缝热影响区部位的管外表面，裂纹两侧的钢材基体上有多条浅灰色夹杂物呈流线状分布，单条夹杂物最大宽度 1.8 μm，根据夹杂物形貌结合扫描电镜断口夹杂物的成分结果，分析其为硫化物夹杂，裂纹扩展方向与硫化物的分布方向一致。

对焊管母材中的夹杂物分布情况进行了观察，母材中局部有硫化物夹杂分布，这类硫化物宽度小于 GB/T 10561—2005《钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法》评级规定的下限 2 μm，不在标准规定范围，因此在产品质检过程中，往往会因为其宽度不在评级范围而被忽略掉。试样中硫化物的分布整体上属于不均匀分布，主要分布在板厚度方向 1/4 部位和心部，多条夹杂物聚集在一起，条与条之间的间距很小，形成了一个较明显的夹杂物聚集区（见图 3(c)）。从表 1 所示化学检测结果看，试样的硫含量并不高，满足高级优质结构钢的成分要求，但是本材料中硫化物具有极细的尺寸，因而形成的硫化物数量较多，且在局部呈聚集分布状态，对材料性能造成影响更大，在特殊的使用环境下，会导致失效风险增加。

显微组织分析

在显微镜下对焊管的显微组织进行观察，母材组织为铁素体和珠光体，晶粒细小均匀，在板厚度 1/4 和心部均有带状特征，带状组织级别为 2 级，带状组织上弥散分布着条状的硫化物夹杂（见图 4），这种情况与连铸坯二冷工艺有关。连铸工艺下，坯壳为固态，坯内仍为液态，随着钢液温度降低，析出的硫化夹杂物会在坯壳内的钢液中上浮，如二冷工艺不当，则在固液交界部位产生夹杂物聚集和成分偏析，造成板厚 1/4 部位的偏析现象。热影响区、熔合区为贝氏体和铁素体组织，晶粒尺寸细小，未见异常。

2 个试样开裂部位均位于焊接热影响区，焊接热影响区既是容易产生焊接缺陷的部位，又是焊接残余应力较高的部位，焊接热影响区及熔合区的缺陷对焊接结构的抗断裂性能有重要影响[5]。试样 1 裂纹沿板厚方向 1/4 部位的带状组织分布区域扩展。试样 2 裂纹在板厚度 1/4 处扩展，在母材与热影响区交

界处发生断裂。在此处产生断裂的原因为该部位一侧为热影响区，另一侧为母材，物理性能上存在差异，在压扁过程中，不同部位具有不同的塑性，在外力作用下产生的形变也不同，因此容易在该处形成开裂。

高频直缝焊工艺分析

高频直缝焊技术是将热轧板卷经过成型机成型后，利用高频电流的集肤效应和邻近效应，使管坯边缘被加热至熔融状态，在挤压辊的作用下进行焊接[6-7]。在管对接过程中挤压力的作用下高温熔融金属会被挤出到钢管外表面，随后使用刮板将多余的金属液体刮掉。

宏观上看，焊缝区域总体上呈腰鼓状，腰鼓尺寸与输入热量的大小有关，通过测定腰部的宽窄衡量焊接热量的输入情况。一般认为输入热量愈大，腰部愈宽；输入热量愈小，腰部愈窄，理想的腰鼓尺寸为壁厚的 1/3。经过测量，板厚度中心部位热影响区尺寸为 1.3 mm，和钢板厚度 2.5 mm 的 1/3 相比略大（见图 2(b)）。在焊接接头中间呈白亮线的部位为熔合区，管边缘部位加热到 1400 ℃ 以上，与空气中氧结合产生局部脱碳[8]，导致焊缝部位经腐蚀后颜色较浅，宏观观察为一条白色的直线，宽度在 40 μm 左右（见图 3(b)）。熔合线的宽窄与板材所受挤压力的大小有关，挤压力越大，熔合区金属被挤压出来的量越大，从而导致熔合线变窄。对于熔合线的宽度国际上还没有统一的标准，一般为内控指标，例如新日铁规定熔合线标准为 0.02~0.20 mm[9]，从试样检测结果看熔合线宽度属于正常范围，略微偏低。

开裂产生原因的综合分析

材料因素上，试样开裂与板厚度方向 1/4 部位的条状硫化物及带状组织有一定的关系，从断口扫描形貌上分析，硫化物分布部位断口平滑，没有形变特征，只有在非硫化物分布区域有少量的韧窝状断口，表明夹杂物造成了基体不连续；两试样开裂部位都位于硫化物分布较多的区域，同时也处于带状组织分布部位，可以判断，带状组织造成材料性能分布不均匀，对裂纹的扩展起到了促进作用。

生产工艺上，在加热条件下将钢板弯曲对接熔融金属在挤压辊作用下形成焊管。钢管焊接热影响区在高温下有良好的塑性，加热温度越高、挤压力越大，热影响区受挤压力作用产生的形变就越厉害，被挤出到钢管表面的金属量就越大，越容易让钢板内部的缺陷经过挤压后暴露到钢板的外表面。从缺陷试样热影响区腰鼓形中部宽度来看，较大的宽度表明其热输入量较大。熔合线宽度较窄表明挤压力大。在这种工艺条件下必然会使钢板对接过程中在热影响区区域产生较大形变，分布在钢板厚度方向 1/4 处的夹杂物随高温金属的流动被挤出钢板表面，在随后清理钢管表面多余金属的过程中，夹杂物分布区域被彻底暴露在钢管表面，作为之后开裂的裂纹源头。

综上所述，焊管的开裂虽然与材料自身材料因素有关，但是采用的焊接工艺不当也是缺陷产生的必要原因。焊接过程中，在过高的热输入及挤压力作用下，夹杂物被挤出到钢板表面，形成外露，破坏了焊缝区基体的连续性，造成了材料局部性能差异，降低了结合力，进而在焊缝冷却过程中，在夹杂物部位产生应力集中[10-11]。同时在挤压力卸载后，管外表面受到钢板回弹力的作用，导致硫化物分布部位受拉应力作用，当拉应力超过夹杂物与基体的结合力后，造成了焊管的开裂。在拉应力持续作用下，裂纹向硫化物和带状组织分布较多的部位扩展。在后续的压扁试验过程中，钢管受到压应力作用产生形变，钢管裂纹在焊接形成缺陷的基础上继续扩张，又由于母材与焊缝相邻部位受到焊接热影响，强度较低，更容易产生形变。所以当裂纹扩展到该部位时，在压力及管形变作用下，最终导致了完全开裂。

结束语

（1）在较高热输入和较大挤压力的焊接工艺下，钢板内部分布的条状硫化物及带状组织被挤压外露到钢管表面，从而导致焊管在压扁试验中开裂。

（2）钢板中低于 2 μm 的极细夹杂物，按照 GB/T 10561—2005 中规定，不在标准评定范围内，质量检测过程中很容易忽略掉，但是如果这类夹杂物聚集分布，在特殊使用环境下，很容易造成失

效，因此在焊接制管前，需要注意检查原材料中是否存在该类型的夹杂物。

参考文献

[1] 张玉柱，吝章国，李对廷，等. 邯钢焊管用钢带 SPHT1 的研制与开发//2005 中国钢铁年会论文集：第 3 卷. 北京，2005：530
[2] 王涛，任永峰，何石磊，等. 不同热处理工艺对 HFW 焊管沟槽腐蚀的影响. 焊管，2016，39(6)：18
[3] 张达富，吴安术，刘锦燕. 焊管压扁开裂的原因分析. 物理测试，2016，34(5)：41
[4] 秦捷，徐言东，张伟. RBE 直缝焊管机组电控系统. 金属世界，2023(2)：34
[5] 鲁丽君，白世武，丁红胜. 焊接接头有限元模拟的研究进展. 金属世界，2008(2)：35
[6] 孙宝福，金有海. 高频直缝焊管成型过程仿真分析. 中国石油大学学报 (自然科学版)，2010，34(4)：123
[7] 杨效勇，樊道兴，郑志新. 高频焊管焊缝质量分析. 焊管，1990，13(4)：52
[8] 黄友阳. 高频焊管金属流线的形成形态与分析. 钢管，2000(6)：31
[9] 聂向晖，王滢，刘小峰，等. HFW 焊缝结构参数对其冲击性能的影响. 热加工工艺，2012，41(15)：8
[10] 黄佳建. 某天然气管道三通开裂原因分析. 理化检验：物理分册，2020，56(8)：74
[11] 海超，郭晓静. 热轧钢板高频直缝电阻焊接制管开裂原因. 理化检验：物理分册，2022，58(3)：49

作者简介：苏崇涛（1976—），男，辽宁省本溪市人，金属材料高级工程师。2000 年毕业于武汉科技大学金属材料专业，主要研究方向：钢铁材料物理检测、显微组织及性能分析。通信地址：辽宁省本溪市本钢厂区氧气路 6 号本钢技术中心；E-mail：luminarc02@163.com。