

内窥镜检测方法技术研究

单黎波, 王建昌

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710061)

摘 要: 通过对内窥镜检测技术的归纳、分析, 并根据液体火箭发动机的结构特点和常见缺陷情况, 提出了采用制作、积累缺陷样件, 将内窥镜检查技术与计算机技术相结合的方法, 实现对发动机内表面缺陷及多余物的定性、测量的实验方案。在试验基础上, 对各种内表面缺陷在内窥镜中的形貌特征及判断方法进行了描述, 并根据多组试验数据, 制作了内窥镜检查的缺陷尺寸对比曲线。同时介绍了该方法在液体火箭发动机各重要零、部、组件上的应用情况。

关键词: 液体火箭发动机; 内窥镜检测; 多余物

中图分类号: V448

文献标识码: B

文章编号: (2006)04-0054-09

Study on endoscope check method

Shan Libo, Wang Jianchang

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710061, China)

Abstract: By analysis of check technique for endoscope combined with computer, this paper gives experimental method of qualitative and measuring of engine inner surface fault and residual substance according to structural properties and fault for liquid propellant rocket engine. On the basis of test, appearance feature in endoscope and judgement method are discussed for inner surface faults. Correlation curve of fault dimension for endoscope check is made by groups of test data. The method is introduced for application of assembly parts in liquid propellant rocket engine.

Keywords: liquid propellant rocket engine; endoscope check; residual substance

1 引言

内窥镜检测技术由发明到现在, 已经经历了整整一个世纪, 其在工业领域的应用也有四十多年的历史。1958 年美国光学公司研制出世界上第

一根可实用的传像束, 且形成了商品化生产, 随后又制造出系列内窥镜并开始应用于汽车、电力、医疗等领域。目前内窥镜检测技术在美国、英国、日本等发达国家已广泛应用于航空、航天、汽车、民航、石油化工、电力、热力管道和造船等工业领域。例如: 美国 VMI 公司将 $8 \times 10 \text{mm}^2$ 的光纤内

收稿日期: 2006-03-24; 修回日期: 2006-04-21。

作者简介: 单黎波 (1962—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机系统无损检测。

窥镜应用于保安器材领域,美国在直升机制造及阿波罗计划中的“土星”号火箭上,法国在“宇宙”火箭上均采用了光纤内窥镜检测目标和监控发动机的工作状态。

随着我国高新技术的发展及现实需要,工业内窥镜检测逐步开始广泛应用于工业领域(特别是在航天产品上),在工业产品的内腔表面、焊缝表面、导管内表面、装配质量及多余物的质量控制方面,内窥镜检测技术的优越性已逐渐显露出来,而且这种应用研究正不断朝纵深发展。

2 试验情况

2.1 缺陷的定性分析

参照部标 QJ2859-96《工业内窥镜操作使用方法与判定规则》中所规定的缺陷判定方法,根据发动机主要零、部、组件的结构特点,对其常见缺陷进行定性分析。

2.1.1 裂纹

裂纹是对任何机械产品质量影响最严重的一种缺陷,对外表面裂纹的检测,用磁粉探伤和渗透探伤方法可以很好地得到解决。但内表面裂纹的检测却是一个较难解决的问题。一些开口较宽的裂纹用肉眼和内窥镜进行观察或检测可以发现;但对于微裂纹或发纹则很难凭肉眼和内窥镜的观察来发现。经过多次反复试验发现,由于用内窥镜进行检测时,内窥镜对缺陷有一定的放大作用,对于开口宽度大于 0.1mm 左右的裂纹在内窥镜镜头观察角度以及探头与裂纹缺陷距离合适的情况下,可以实现检测目的。图 1 为用内窥镜检测到的某产品内腔表面裂纹。

2.1.2 未焊透

未焊透也是一种对机械强度影响较为严重的缺陷,理化分析结果表明,当焊缝存在未焊透时,其机械强度可降低 20%~40%。一般情况下,导管的未焊透均可采用 X 射线探伤的方法进行检测;但也有些导管在焊接后由于结构和位置的原因,无法用 X 射线进行探伤检查,故用内窥镜检测作为一种辅助性的方法进行检查,是现在通用的解决问题的办法之一。图 2 为某 $\phi 12 \times 1\text{mm}$ 导管焊缝的未焊透照片。所使用的内窥镜为 OLYMPUS 公司的 $\phi 4.1\text{mm}$ 光纤内窥镜。

2.1.3 折迭

折迭这种缺陷出现在表面的情况并不少见,在高温合金钢和合金结构钢的管材中经常出现折迭缺陷。在一般的磁粉探伤和渗透探伤工艺中,都会把它作为需进行检测的缺陷之一。在 QJ2859-96 标准中没有对这种缺陷判定的一般方法进行解释和规定。图 3 是检测到的某 $\phi 65 \times 3\text{mm}$ 导管折迭缺陷的内窥镜检测照片,所使用的内窥镜为 OLYMPUS 公司的 $\phi 4.1\text{mm}$ 光纤内窥镜。

根据折迭缺陷的产生机理及内窥镜检查时观察到的现象,可确定折迭的一般判定方法为:在内窥镜光束照射下,观察到亮色或黑色(根据内窥镜探头角度不同而定)不规则连续或断续条纹,在一定放大倍数下,所观察到的条纹有不规则的边缘,且其在深度的延伸方向是侧向延伸时,应判断为折迭。

2.1.4 拉线和划痕

拉线和划痕是导管中比较常见的缺陷,其产生可为机械原因和人为原因,但划痕由人为原因产生的较普遍。图 4 为内窥镜检测到的拉线。所使用的内窥镜均为 OLYMPUS 公司的 $\phi 4.1\text{mm}$ 光纤内窥镜。

2.1.5 起皮

起皮通常是在材料锈蚀后出现,也可由人为因素产生。但由于在航天产品中一般都大量使用不锈钢和铝合金材料,出现锈蚀起皮的可能性几乎没有,但由于人为因素产生的却时而有之。图 5 为用内窥镜检查所观察到的起皮。所使用的内窥镜为 OLYMPUS 公司的 $\phi 4.1\text{mm}$ 光纤内窥镜。

2.1.6 凹坑、凸起

凹坑、凸起在检测过程中并不难判断,但标准 QJ2859-96 中对凹坑检测的描述(当内窥镜以一定角度照射时,凹坑周围与基本被检物边界连续,无分界线,且离光源近的部位有阴影,远的部位为亮影。)在检测浅的凹坑时并不一定适用。因为当凹坑浅时离光源近的部位只有很淡的阴影线,而远的部位却不一定有亮影,如图 6 所示。并且当光线的入射角逐渐增大时,其阴影部分(或阴影线)会逐渐减少或消失。同时,标准中对凸起检测的解释(在内窥镜光束照射下,凸起部分为亮点,且背后有阴影。)也只适用于小的凸起,

而对于较大的凸起则应为亮斑或亮影,如图 7 所示。

2.1.7 焊漏

因为内表焊漏与基本金属相连且有明显的凸起,故很易于判断。焊漏上的缺陷一般有内咬边、凹陷(线状和片状)、焊瘤、烧穿及由于气体保护不好造成的豆腐渣状缺陷等,如图 8~图 10 所示。

2.1.8 斑点

斑点的产生多数是由于导管内或材料基体上残留的水渍或略带有酸碱性的水渍在风干后形成的,它的存在一般对基体材料不产生性质和性能上的影响。通过实际检测,笔者认为标准 QJ2859-96 中的解释(在光束照射下,观察到与周围基本被检金属色泽不同的光滑无凹陷或凸起块状表面)不甚确切。因为即使是水渍风干后产生的斑点,也不一定会是光滑的。

2.1.9 腐蚀

一般而言,腐蚀分为自然腐蚀(即锈蚀)和化学腐蚀两种,由于腐蚀的情况不同,在内窥镜下观察到的现象也不尽相同,但很易于区分,如图 11、图 12 所示。

2.1.10 多余物

多余物控制一直是影响航天产品质量和可靠性的一个关键问题,多余物通常由在机械加工或零件装配时落入产品内腔中的金属屑或杂物等造成。

图 13 为某产品集液器环内金属丝多余物及焊漏表面凹陷的具体情况,使用的内窥镜为 OLYMPUS 公司 $\phi 4.1\text{mm}$ 光纤内窥镜。其中的金属丝多余物是在车加工集液器孔时产生的。

通过对多台次发动机的重要零、部、组件的内窥镜检查及剖切对比试验,积累了多种常见的、不同性质的内表面缺陷的内窥镜检测照片和标准样件,可作为检测时对缺陷定性对比使用。

2.2 缺陷的定量分析试验

因通过内窥镜目镜观察物体时,内窥镜探头与物体的距离不同对物体有不同的放大倍数,而连接了 CCD 摄像头和视频采集卡将检测图像转变为数字图像后,又对影像进行了一次放大。在实施检测时,先选择固定的、形状规则的试验件来进行检测,在内窥镜探头距物体不同距离时对检

测的图像进行捕捉,用 PHOTOSHOP 等专业图像软件对拍摄的图片进行处理后,利用该软件中的尺寸测量功能进行相对尺寸的测量,然后将所测相对尺寸与被检测物体的实际尺寸相比,找出不同的检测距离时试件相对尺寸与实际尺寸之间的对应关系,并绘制对应的对比关系曲线;最后根据所选固定物体的实际尺寸对曲线进行修正。

2.2.1 试验工艺

- a. 试验对象:金属丝、金属球;
- b. 试验对象尺寸:0.3mm、0.5mm、1.0mm、2.5mm、3.0mm、3.5mm、4.0mm;
- c. 焦距:2mm~6mm、8mm、10mm、12mm、15mm、20mm;
- d. 内窥镜: $\phi 1.2\text{mm}$ 的针状直杆镜和 $\phi 2.4\text{mm}$ 、 $\phi 4.1\text{mm}$ 的光纤内窥镜。

2.2.2 试验工艺选用原则

- a. 试验对象的选择:常见缺陷如裂纹、拉痕、划伤、未焊透等缺陷基本为线状,而焊渣等多余物基本为球状,因此确定试验对象也采用金属丝和金属球。

试验对象尺寸的选择:根据研究内容及常见缺陷的尺寸确定。

- b. 焦距的选择:根据所列内窥镜的景深和常用的内窥镜工作距离确定。

$\phi 1.2\text{mm}$ 的针状直杆镜景深 1~40mm;

$\phi 2.4\text{mm}$ 的光纤内窥镜景深 2~50mm;

$\phi 4.1\text{mm}$ 的光纤内窥镜景深 5~60mm。

- c. 内窥镜的选择:因导管直径多在 $\phi 20\text{mm}$ 以下,腔、孔的直径可更小,因此选用常用的 $\phi 1.2\text{mm}$ 、 $\phi 2.4\text{mm}$ 和 $\phi 4.1\text{mm}$ 等三种规格的光纤内窥镜。

为避免金属表面的反射光对内窥镜检测图像的影响,提高试验结果的准确性,对试验金属球进行了酸洗处理。酸洗工艺如下:

酸洗液: HNO_3 60~90g/L;

H_2SO_4 80~100g/L;

HF 20~40g/L;

酸洗时间:10 秒。

图 14~图 16 为根据试验数据绘制的不同型号内窥镜的测量尺寸与焦距、实际尺寸的关系曲线。

2.2.3 对比曲线的应用方法

在检测时，测量出内窥镜探头与被检缺陷的距离（本文统称焦距），再对检测图像的缺陷尺寸用图像软件的尺寸功能进行测量得出缺陷的相对尺寸，根据焦距和相对尺寸，在对比曲线上找出相应的交点，根据交点与定量曲线的相应位置确定缺陷的实际尺寸。

2.2.4 验证试验

选择有缺陷的典型样件进行验证试验：用内窥镜对样件进行检查，测量出焦距。用 CCD 摄像头或数码相机对缺陷进行拍摄，在计算机上对缺陷图像进行处理，测量出相对尺寸，按所绘制的曲线得出缺陷的尺寸。再对典型样件进行剖切和缺陷实际尺寸测量。表 1 为按曲线得到的缺陷尺寸与剖切得到的实际测量尺寸的比较情况。

表 1 按曲线确定的缺陷尺寸与实际测量尺寸的对比

Tab.1 Comparison table between defect dimension defined by calculation and real measuring dimension

实际尺寸/mm	测量尺寸/mm	放大倍数	相对误差/（%）
0.30	0.36	1.4	+20
0.60	0.70	1.0	+16.6
1.20	1.35	0.9	+12.5
2.30	2.50	0.75	+8.6

通过试验及所绘制的曲线可以得出以下结论：

- a. 不同类型的内窥镜对缺陷的放大效果不同；
- b. 内窥镜物镜对缺陷的放大作用随焦距的增加而快速减弱，且不同直径的缺陷减弱的效果不同：直径在 1mm 以下的缺陷，在焦距达到 6mm 以后，随着焦距的增加，缺陷的放大倍数变化趋缓；
- c. 缺陷在 5mm 焦距内测得的相对尺寸与实际尺寸数值接近；
- d. 用图像软件对图像进行放大时，缺陷的相对尺寸数值不变。

2.2.5 试验误差分析

- a. 系统误差：因在检测并形成图像进行捕捉及存贮时，系统对缺陷的图像经过了多次放大，故会对检测结果产生影响；
- b. 随机误差：在对图像进行尺寸测量时，每次选取的测量起点和终点都有一定的随机性；在对焦距进行测量时也会产生误差；探头与缺陷的角度等各种其它随机因素，对定量的结果都必然会产生相应的影响。

上述试验的分析结果表明，在进行了相应的

检测试验、研究分析、剖切对比和曲线修正等工作之后，可以采用小直径光纤内窥镜在较小的焦距下实现对缺陷的测量。虽然在检测结果上还存在一定的误差，但已实现了对缺陷尺寸的定量检测，而且缺陷尺寸越大时，其相对误差越小。对缺陷尺寸的定量测量能够满足检测要求。

3 检测应用情况

在经过上述内窥镜对产品内腔多余物和内表面缺陷的定性、定量检测方法的研究分析工作完成之后，开始着手将这些检测方法有计划地应用于产品的实际检测中。

3.1 发动机气路、液路系统多余物检测

发动机的管路系统承担着传输工作介质的重要任务，其作用类似于发动机上的动脉血管。为确保发动机的质量及可靠性，要求对配套导管内表面进行内窥镜检查，不允许有多余物、裂纹等各种缺陷存在。内窥镜检查分两次进行：

- a. 导管成型后进行第一次检查，主要检查导管内表面质量，如裂纹、划伤、折迭、起皮、锈斑等；
- b. 经过打压试验及球头焊接等工序，在导管装配前进行第二次检查，主要检查焊渣、金属及

非金属多余物、裂纹等。

内窥镜检测工艺条件:

内窥镜探头: $\phi 2.4\text{mm}$ 光纤镜 IF2D5-12;
 $\phi 4.1\text{mm}$ 光纤内窥镜 IF4D5-15;
 $\phi 1.2\text{mm}$ 针状镜 K12-09-00-45;

光源: 150W 冷光源 ILK-5;

成像: 413 万像素数码相机 C4040+转接口 AK-DC2+AI-DC2;

记录: PIV 笔记本电脑+PHOTOSHOP 图像处理软件。

图 17 为某 $\phi 10\text{mm}$ 导管内多余物的内窥镜检测图片,使用的内窥镜为日本 OLYMPUS 公司生产的 $\phi 4.1\text{mm}$ 光纤内窥镜,型号为 IF4D5-15,测量焦距为 5mm,得到多余物相对尺寸为 0.31,查图 16,则多余物的实际尺寸为 0.34mm。因排除导管多余物的方法是用细铜丝在一端绑上柔软的绸布沾上酒精从导管一头穿过到另一头拉出,以达到排除和清洗的目的。故一般情况下,对于内窥镜检查出的细纱、细丝状非金属多余物和一些其它细小的脏物,均采用多次拉除或吹除的方法排除,而不进行破坏检查。因此,更多检查到的细小多余物无法进行测量尺寸与实际尺寸的对比。

图 13 为用内窥镜对某发动机集液器环进行检查时发现的在车加工集液器孔时产生的金属多余物和集液器环焊缝焊漏上的凹陷。使用的内窥镜为日本 OLYMPUS 公司生产的 $\phi 4.1\text{mm}$ 光纤内窥镜,型号为 IF4D5-15;集液器环直径为 $\phi 65\text{mm}$,材料为 1Cr18Ni9Ti;用定量方法测得多余物尺寸为 2.8mm(横向+纵向)。因集液器管入口处较小,只能采用小直径的内窥镜探头进行检测。由于在此集液器内,类似图 13 上的金属多余物有多个,不仅无法用器械进行抓取,而且在敲击并用吸尘器吸出后,也无法进行实物与检测图的对比。在经过清除工作之后,再用内窥镜进行检查,金属多余物均已排除。

鉴于上述统计和实际检测情况,用内窥镜对液体火箭发动机的气路、液路系统进行多余物检测和监控是可行的。但由于多余物一般都是活动的,且因为在多余物排除之后并不影响产品正常使用,因此,要对多余物的检测情况进行零件对比,通常是无法做到的。

3.2 发动机气路、液路系统导管的内表面质量检测

对 68 根钛合金导管进行了内表面质量内窥镜检测。检测结果见表 2。

表 2 钛合金导管内表面质量检测结果

Tab.2 Quality testing results for titanium pipe inner surface

导管直径 /mm	数量 /根	划伤 /处	裂纹 /处	折迭 /处	锈蚀 /处	焊接缺陷 /处
6	12	6	0	1	3	2
8	12	5	1	0	2	1
10	20	8	0	0	2	0
12	16	2	0	0	0	1
20	8	5	0	0	1	0

3.3 毛刺去除情况检测

在发动机系统内,各类阀门对推进剂或控制气体的贮存、输送、调节起着非常重要的作用。是发动机上的精密组件,也是最易发生故障的组件之一。大部分阀的结构简单,内腔质量可进行目视检查。但电磁阀阀芯、电动气阀阀体内的相交孔处由于在加工过程中容易产生毛刺,又因为孔径小、孔深等原因,无法进行目视检查。这些

毛刺脱落形成多余物后,将可能影响阀芯、阀座间的密封,引起泄漏,也可能在阀芯与阀体的配合面之间造成阀芯卡死,进而导致阀门无法完成其特有功能,因此需要应用内窥镜进行检测。

图 18 为某电磁阀阀芯内窥镜检测照片。该阀体有两对相交孔,直径仅 $\phi 2.0\text{mm}$ 。以前对该阀体多采用工艺保证的方法控制毛刺,即通过采用合理的加工工艺及加工后增加去除毛刺的工序

(如手工去毛刺、热能去毛刺、磨料流去毛刺)来消除毛刺。要对相交孔处进行质量检查,唯一有效的方法是进行内窥镜检测。

内窥镜检测工艺条件如下:

内窥镜探头: $\phi 1.2\text{mm}$ 针状镜(K12-09-00-45);

光源: 150W 冷光源(ILK-5);

成像: CCD 摄像头(WAT-211H+视频采集卡 MPEG-1/-2);

记录: PIV 笔记本电脑+PHOTOSHOP 图像处理软件。

对图 18 所示的阀芯检测到的毛刺直径进行测量,焦距为 5mm,其相对尺寸为 0.16,查图 14,得毛刺实际尺寸为 0.15mm。

另外,在对这类电磁阀进行内窥镜检测时,经常发现类似金属亮点的显示,开始判断为金属屑,但其随着内窥镜头的移动并不改变位置,多次检查后进一步分析,认为是孔壁上的凹面在侧向光线照射下反射形成的亮斑,剖切结果证实了这点。孔壁上的凹凸面为加工过程中金属屑挤压形成。

3.4 气瓶、贮箱焊缝焊漏及飞溅的检测

在发动机系统内,气瓶的作用是贮存高压气体,采用真空电子束焊将上、下半球对接而成。由于材料焊接时熔融金属很难汽化,并迅速凝固,在焊缝周围的瓶壁上形成大小不一的飞溅。这些附着在容器壁上的焊接飞溅及焊瘤、氧化皮如果未被清洗或去除掉,一旦在运输或振动等力学环境的影响下脱落,成为多余物,则可能堵塞管路系统,影响正常工作。气瓶进气口直径为 $\phi 6\text{mm}$,因此采用如下内窥镜检测工艺条件:

内窥镜探头: $\phi 1.2\text{mm}$ 针状直杆镜 K12-09-00-45+ $\phi 4.1\text{mm}$ 光纤镜;

光源: 150W 冷光源 ILK-5;

成像: 413 万像素数码相机 C4040+接口 AK-DC2、AI-DC2;

记录: PIV 笔记本电脑+PHOTOSHOP 图像处理软件。

图 19 为气瓶内表面焊漏、飞溅的内窥镜检测照片。

贮箱由上下半球焊接而成,是发动机贮存燃料的部件。由于贮箱内囊为橡胶材料,若与之接

触的焊缝表面粗糙,则极易磨损贮囊,造成燃料泄漏。因此要求采用内窥镜检查焊缝内表面质量。

3.5 测压管孔毛刺检测

在焊接测压管的位置,钻有 $\phi 3\text{mm}$ 的通孔,钻孔时产生的金属屑是造成多余物的主要原因。同时,在钻孔后,孔边沿处会产生翻边毛刺,若不予以排除,在工作时,会由于温度和压力升高随时脱落,可能造成堵塞,影响正常工作。由于形腔情况根本无法用目视观察;而测压管孔因孔径较小,也无法对孔内边沿处的翻边毛刺的去除情况进行仔细检查,因此,用内窥镜对形腔内部及测压管孔进行检测成为目前最有效的检测方法。图 20 为测压管孔翻边毛刺内窥镜检测照片。

内窥镜检测工艺条件如下:

内窥镜探头: $\phi 2.4\text{mm}$ 光纤镜 IF2D5-12;

光源: 150W 冷光源 ILK-5;

成像: 413 万像素数码相机 C4040+接口 AK-DC2;

记录: PIV 笔记本电脑+PHOTOSHOP 图像处理软件。

对图 20 的毛刺进行测量,内窥镜用 $\phi 1.2\text{mm}$ 针状镜,测量焦距为 5mm,测得的相对尺寸为 0.4mm,查图 14,则得毛刺的实际尺寸为 0.3mm。

4 结论

(1) 经过对多项产品进行的内窥镜检测表明,内窥镜检测应用于液体火箭发动机各重要零、部、组件的内部质量和多余物检测不仅是完全可行的,而且是必要的。

(2) 通过积累和制作典型缺陷样件,并作为检测缺陷的对比试样,可实现对缺陷的定性检查。

(3) 采取将内窥镜检查到的缺陷图像转变为数字图像,通过计算机图像处理软件测量其相对尺寸,并查定量对应曲线,可测量缺陷尺寸大小,测量的数据范围可满足检测要求。

参考文献:

- [1] 邓键,钎焊[M],北京:机械工业出版社,1979.



图 1 某产品内腔表面裂纹
Fig.1 Surface crack of cavity

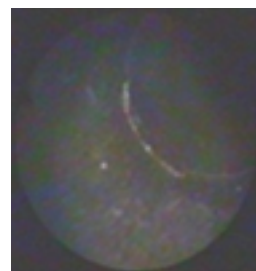


图 2 某导管焊缝未焊透内窥镜检测图
Fig.2 Incomplete penetration welds of pipe checked by endoscope



图 3 某导管内壁上的折迭检测照片
Fig.3 Fold photo checked on pipe inner wall

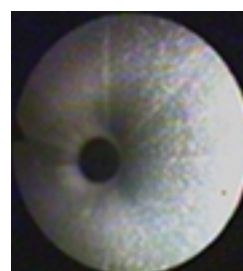


图 4 拉线
Fig.4 Bracing wire

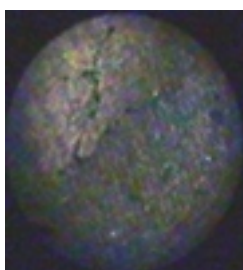


图 5 起皮
Fig.5 Scaling

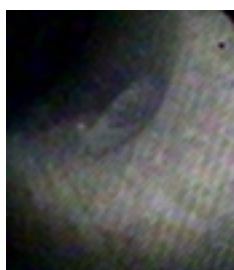


图 6 内表凹坑
Fig.6 Dent of inner surface

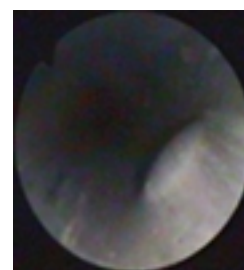


图 7 内表凸起
Fig.7 Boss of inner surface

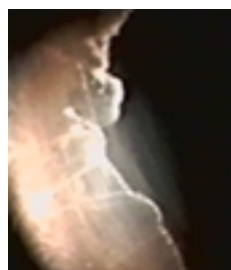


图 8 渣状焊漏
Fig.8 Poor penetration with slagging

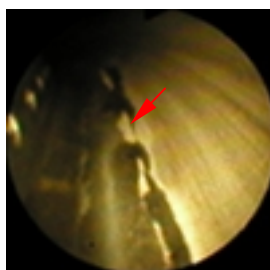


图 9 焊漏凹陷
Fig.9 Poor penetration dent



图 10 内咬边
Fig.10 Internal undercut



图 11 锈蚀斑

Fig.11 Rusty spot

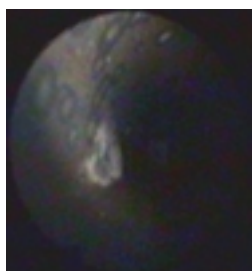


图 12 腐蚀斑

Fig.12 Corrosion spot

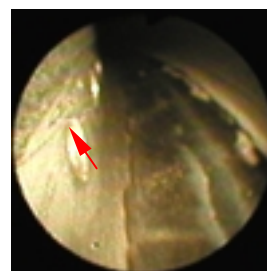
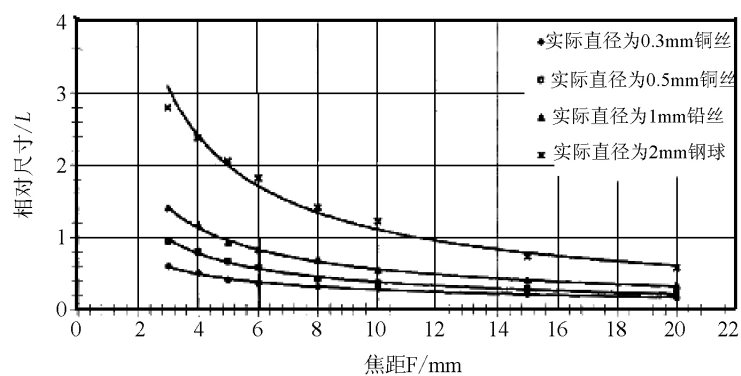
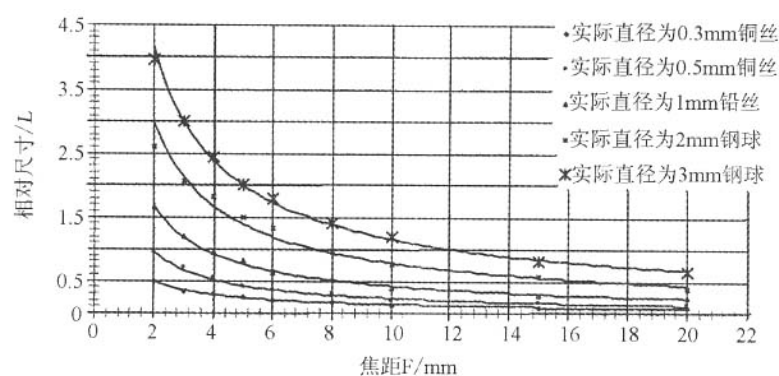


图 13 某产品内多余物及焊漏凹陷

Fig.13 Residual substance and poor penetration

图 14 $\phi 1.2\text{mm}$ 的针状直杆镜定量对应关系曲线Fig.14 Quantitative corresponding dependence curve by $\phi 1.2\text{mm}$ pin straight rod mirror图 15 $\phi 2.4\text{mm}$ 的光纤内窥镜定量对应关系曲线Fig.15 Quantitative corresponding dependence curve by $\phi 2.4\text{mm}$ optical fiber endoscope

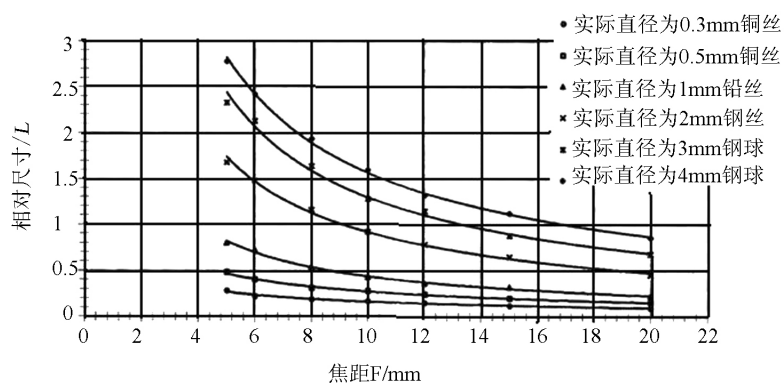
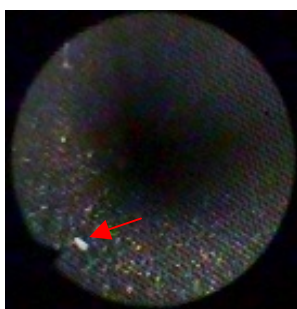
图 16 $\phi 4.1\text{mm}$ 的光纤内窥镜定量对应关系曲线Fig.16 Quantitative corresponding dependence curve by $\phi 4.1\text{mm}$ optical fiber endoscope

图 17 导管内多余物

Fig.17 Residual substance in pipe

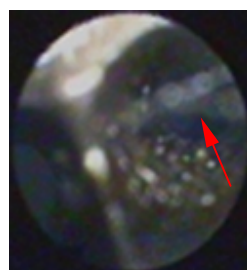


图 18 某型号电磁阀阀芯内窥镜检测照片

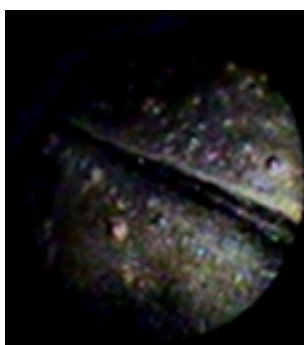
Fig.18 Photo checked by endoscope
for solenoid valve spool

图 19 气瓶内表面焊漏、飞溅的内窥镜检测照片

Fig.19 Photo checked by endoscope for poor penetration
and splashing of inner surface in gas cylinder

图 20 测压管孔翻边毛刺内窥镜检测照片

Fig.20 Photo checked by endoscope for hole
flange rag of pressure tube

(编辑: 王建喜)