

液体火箭发动机端面密封用石墨材料 内部缺陷检测工艺方法

庄宿国 宋春 李志宇 赵伟刚 王良

(西安航天动力研究所,西安 710100)

摘 要 介绍了石墨材料的制造工艺和缺陷类型,并结合液体火箭发动机端面密封的工作特性,阐明了端面密封用石墨材料内部缺陷检测的必要性。对目前通用的无损检测方法进行了对比分析,确定了适用于液体火箭发动机端面密封用石墨材料内部缺陷的 X 射线检测方法,并对 X 射线检测过程中图像灰度、对比度、电压、电流、滤片及积分时间等关键工艺参数的影响因素进行了对比分析,确定了石墨材料内部缺陷检测的工艺参数设置准则及高精度检测方法,实现了石墨材料内部孔隙的可视化仿真分析,并提出了一种基于图像处理的石墨材料气孔率统计计算方法,最终建立了液体火箭发动机端面密封用石墨材料内部典型缺陷的特征标样。

关键词 液体火箭发动机,石墨材料,内部缺陷,工艺参数,设置准则

中图分类号:V416.8

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.05.016

Internal Defect Detection Technology of Graphite Material for Liquid Rocket Engine Face Seal

ZHUANG Suguo SONG Chun LI Zhiyu ZHAO Weigang WANG Liang

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100)

Abstract The manufacturing process and defect types of graphite materials are introduced in this paper, combining with the working characteristics of the liquid rocket engine face seal, the necessity of testing the internal defect of graphite material for face seal is expounded. A comparative analysis is made on the present nondestructive testing methods, the X-ray detection method is the best for liquid rocket engines face seal. The key parameters of the X-ray detection such as gray scale, contrast, voltage, current, filter slice and integral time are compared and analyzed, then the process parameter setting rule and the high precision detection method of the internal defect inspection of graphite material are confirmed. And a visual simulation analysis of the internal space of graphite material is realized. And method for calculating the rate of porosity of graphite materials based on image processing. Finally the characteristics of graphite material internal defects typical of standard samples input forward of liquid rocket engine face seal are established.

Key words Liquid rocket engine, Graphite material, Internal defect, Process parameter, Setting rule

0 引言

端面密封作为液体火箭发动机涡轮泵能量传动系统的重要组件,主要用于密封液体氧化剂、燃料以及隔离燃气等,如果发生故障,将直接影响到发动机的性能和可靠性,甚至产生灾难性后果。尤其是对于我国新一代大运载液氧煤油发动机涡轮泵端面密封

而言,工作参数不断提高,振动冲击环境极为恶劣,并且工作介质具有高压、低温、强腐蚀等特点,导致端面密封摩擦副工作环境极为苛刻,因此对石墨材料性能提出了极高的要求。在高速、高压、振动冲击、高低温及强氧化等工作环境下,若石墨材料内部存在缺陷,在工作过程中会发生磨损、脱落、破碎甚至起火燃烧

收稿日期:2017-01-18

基金项目:中国航天科技集团公司基础夯实工程(ZLTS12015-1)

第一作者简介:庄宿国,1986年出生于,工程师,主要从事液体火箭发动机机械密封设计。E-mail:zhuangsuguo@163.com

等风险。目前实际生产过程中仅通过硬度、抗压强度、密度、气孔率及抗折强度等传统指标的复验,判定石墨是否合格,即使石墨材料技术指标复验合格,在发动机试车、飞行过程中仍存在较大的质量隐患,为了确保发动机的可靠性。本文结合石墨材料的制造工艺和缺陷类型,对其内部缺陷检测的工艺方法进行研究。

1 石墨制造工艺和缺陷类型

石墨材料的制造工艺对其内部缺陷的形成具有重要的影响,本文对石墨材料的压型、焙烧、石墨化以及原材料等生产工艺中易产生的缺陷类型进行了分析。

(1)压型包括单面压、双面压、挤压和等静压四种方式,由于压力方向的不同可产生不同部位的缺陷特征。其中单面压易导致上紧下松,密度不均,从而形成低密度疏松;双面压易导致上下致密,中间疏松,形成低密度疏松;挤压易产生裂纹、砂眼和低密度疏松;等静压可以保证石墨材料的密度均匀,但仍存在砂眼缺陷。

(2)焙烧易产生砂眼和裂纹,但裂纹缝隙较小一般不易发现,严重时呈层状裂纹或裂纹组。

(3)石墨化易产生砂眼和裂纹,导致密度不均,严重时可导致石墨材料外部明显开裂、几何尺寸变形^[1]。

(4)石墨原材料在生产过程中通常选取铁粉作为催化剂,若后续生产过程中酸洗不彻底及石墨化温度较低,易形成高密度夹杂缺陷。

2 无损检测

2.1 无损检测方法

目前无损检测技术已成熟应用于金属材料的内部缺陷检测中,与金属材料相比,石墨材料内部结构具有疏松、孔隙较多、晶粒粗大、密度不均、各向异性等特点,使得反映其本质特征的信息经常湮没在强动力学噪声中,检测信号的信噪比一般都较低,因而很难判断其内部细微缺陷。目前国内外材料内部缺陷检测的方法一般为超声波检测、声发射检测及X射线检测等^[2]。基于石墨材料的自身特性,X射线检测相对于其他方法,可以准确获得石墨内部状况的图像,直观分析石墨内部的缺陷结构,但其检测要求较高,与设备精度、参数设置以及后续图像处理息息相关,并且缺陷特征的判定较为复杂^[3-6]。

2.2 X射线检测

射线射入到物体时,射线的光量子将与物质原子发生一系列相互作用,使射线被吸收、散射,导致透射射线强度减弱,射线衰减的程度与射线的能量、被透射物体的厚度、密度等相关,因此X射线检测的主要工作原理为射线透过被检测物体时,有缺陷的部位与

无缺陷的部位对射线的吸收能力不同,通过检测被检测物体后射线强度的差异,来判断被检测材料内部是否存在缺陷,且缺陷尺寸越大,差异越明显^[7]。

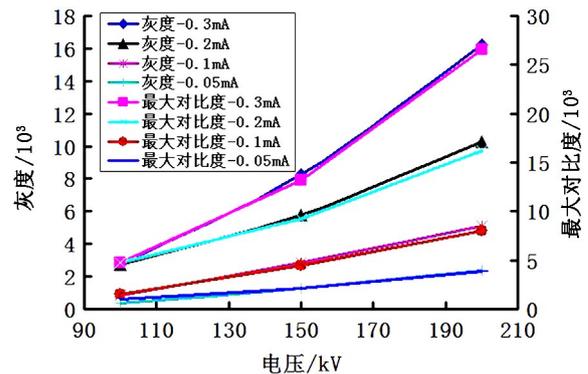
3 工艺参数对X射线检测的影响

基于微焦点X光机进行石墨材料内部缺陷的高精度检测方法研究,在X射线检测过程中电压、电流、滤片及积分时间等关键工艺参数直接影响到图像的灰度、对比度,从而影响到缺陷特征的成像效果,因此,为了更为准确的捕捉石墨材料的内部细微缺陷,需对上述关键工艺参数进行研究。

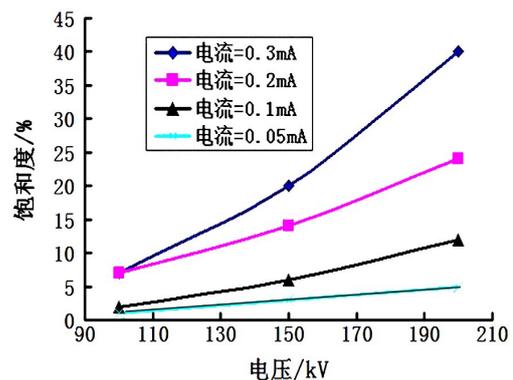
3.1 关键工艺参数设置

3.1.1 电压、电流

微焦点X光机不同于传统X光机,传统X光机是闭管式,通过准直器孔径的大小控制电子流的大小,控制焦点尺寸,完成X射线照射任务。而微焦点X光机是开管式,通过束流线圈产生束流电流,设备自动校准,因此需要研究电压、电流等因素对其成像效果的影响。如图1所示,对不同电压、电流条件下的图像灰度、对比度及饱和度等参数进行了对比分析。



(a) 电压



(b) 电流

图1 电压、电流对X射线成像的影响

Fig.1 Effect of voltage and current on X-ray imaging

在相同电流条件下,随着电压的升高,图像的灰度、对比度及饱和度等数值均会不断增大,同样在相同电压条件下,随着电流的升高,图像的灰度、对比度及饱和度等数值也会不断增大,并且在高电压及高电流条件下各参数的增长速率明显高于低电压及低电

流条件。

电压、电流等单因素无法准确分析 X 射线成像的影响因素,为此本文采用电压和电流的乘积即射线功率进行对比分析。如图 2 所示,随着功率降低,图像均匀度及清晰度越来越差,缺陷特征越来越模糊,当 $P=60\text{ W}$ 时,裂纹缺陷尺寸为 0.202 mm ,与实际裂

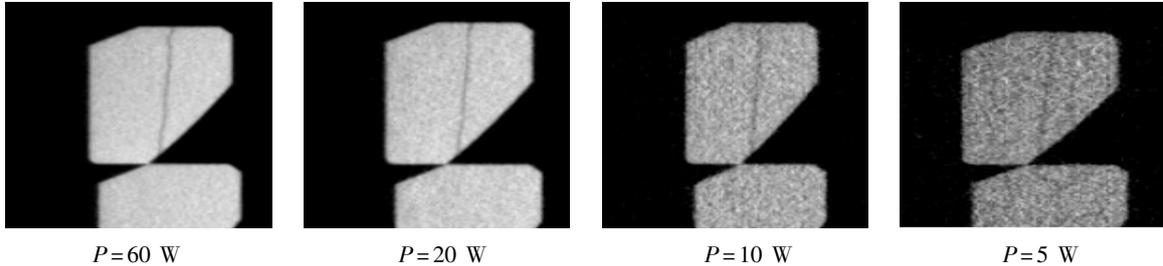


图 2 不同功率下的缺陷检测结果

Fig. 2 Defect detection results under different power conditions

3.1.2 滤片

滤片的作用是降低背景,提高峰背比,并过滤干扰峰、杂散峰,提高探测器的计数准确率。因此在 X 射线检测过程中,滤片的选择尤为重要,它直接关系到图像的均匀度及缺陷的清晰度,本文对常用的 Al、Fe、Cu 三种滤片进行对比,分析结果如图 3 所示,采用 Al 滤片,图像的灰度、对比度及饱和度最高,而采用 Cu 滤片,图像的灰度、对比度及饱和度最低,其结果与滤片的密度成反比。

图像及缺陷特征如图 4 所示,Al 滤片的图像结果最优,因此,建议采用密度略高于石墨的 Al 滤片。

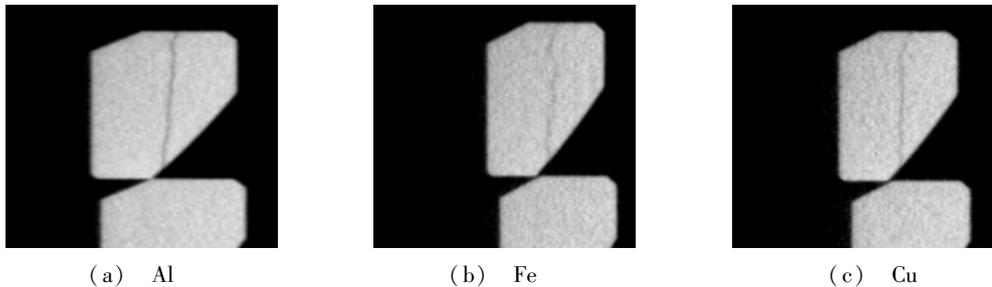


图 4 不同滤片条件下的缺陷检测结果

Fig. 4 Defect detection results under different filter conditions

3.1.3 积分时间

积分时间直接关系到射线照射强度,在电流、电压相同情况下,积分时间越长,图像灰度越高,X 射线照射的剂量越大。本文在电压 = 220 kV ,电流 = 0.3 mA 的条件下,分别对积分时间为 300 、 400 、 600 及 800 ms 进行了对比分析。如图 5 所示,随着积分时间的增加,图像灰度、对比度及饱和度越来越高,其图像及缺陷特征如图 6 所示,当积分时间为 400 ms 时,图像均匀度及缺陷特征最优。

纹尺寸相符,当 $P=40\text{ W}$ 时,裂纹缺陷尺寸为 0.16 mm ,缺陷特征开始模糊,但当 $P=5\text{ W}$ 时,已无法确认裂纹缺陷尺寸。因此在石墨材料内部缺陷检测过程中,为了更为准确的获得石墨材料的缺陷特征,在增大电压、电流的同时,要兼顾射线功率的变化。当 $P=60\text{ W}$ 时,石墨材料内部缺陷特征最为清晰。

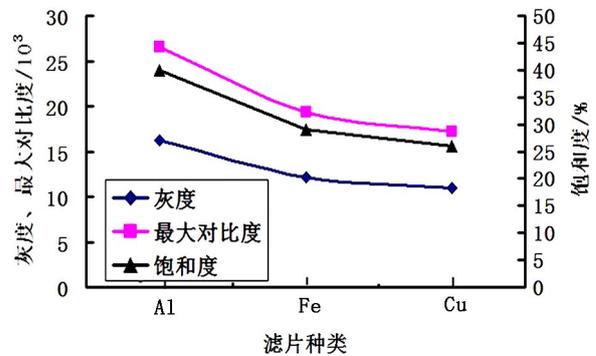


图 3 滤片对 X 射线成像的影响

Fig. 3 Effect of filter on X-ray imaging

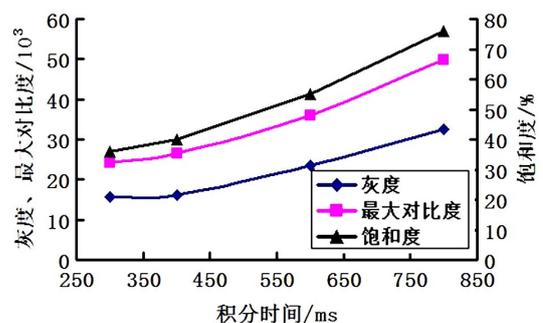


图 5 积分时间对 X 射线成像的影响

Fig. 5 Influence of integration time on X-ray imaging

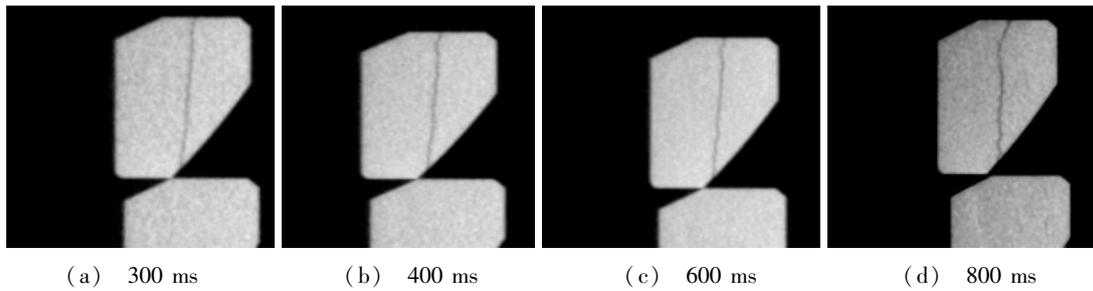


图6 不同积分时间条件下的缺陷检测结果

Fig. 6 Defect detection results under different integration time conditions

3.2 检测精度试验验证

为了验证上述工艺参数设置方法的准确性,采用线切割及钻孔工艺,在石墨材料上加工不同尺寸的缺陷,对设定尺寸缺陷进行检测,验证上述检测方法的

精度,试验件缺陷分为条形和圆形两种形式,如图7所示。

试验结果如图8所示,缺陷特征检测精度良好,条形及圆形缺陷检测尺寸均与设定尺寸重合。



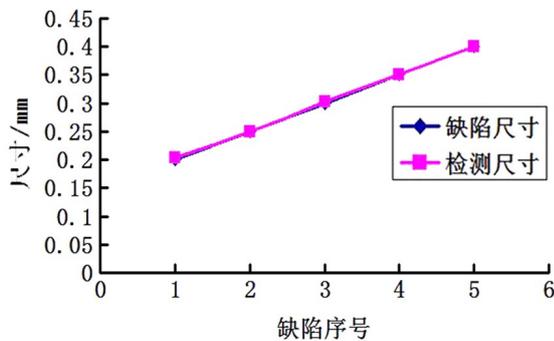
(a) 条形缺陷



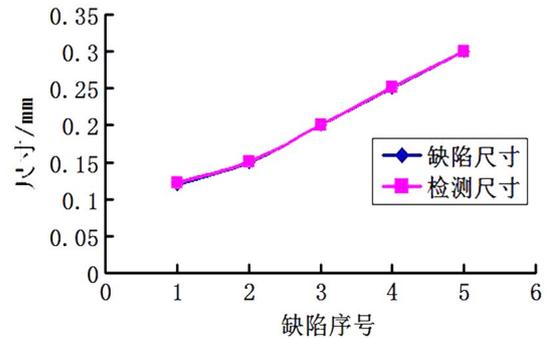
(b) 圆形缺陷

图7 不同缺陷试验件

Fig. 7 Test pieces with different defect



(a) 条形缺陷



(b) 圆形缺陷

图8 不同缺陷检测精度对比

Fig. 8 Comparison of different defect detection accuracy

3.3 内部孔隙仿真分析及应用

石墨气孔率分为开口气孔率和闭口气孔率,目前水煮法可以粗略计算开口气孔率的大小,闭口气孔率只能间接以密度的形式反映,采用本文缺陷检测方法,可以有效捕捉石墨材料内部气孔分布情况。依据上述关键工艺参数的设置准则,对两种常用的液体火箭发动机石墨材料的内部孔隙进行了仿真分析,仿真

结果如图9所示,材料一内部孔隙较少,而材料二内部存在较多的细微孔隙。其主要原因为材料一的生产工艺以中间相碳微球为原料,采用自烧结工艺研制而成,通过调整组分内 β 树脂含量可以具有良好的自粘结性,其结构致密,因此其材料一的组织结构为准单相。而材料二采用传统的炭/石墨材料的生产工艺,采用煅焦等固体原料和煤沥青等黏结剂,经过混

捏、轧片、磨粉、压制、焙烧、浸渍、石墨化等工序来制造,材料的增密补强主要依靠多次浸渍沥青-炭化工

艺,因此其材料的结构完整性较差,且呈现多相结构。

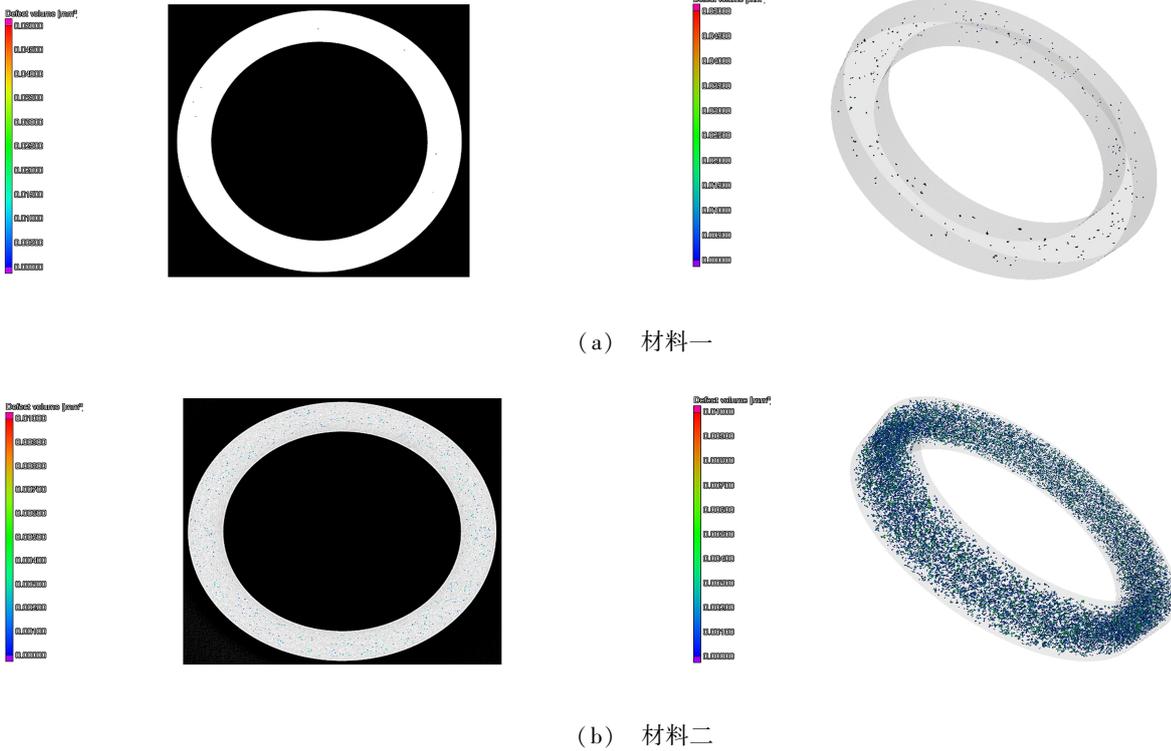


图9 不同材料内部孔隙仿真结果

Fig.9 Simulation results of internal voids of different materials

基于本文的内部缺陷检测方法,提出了一种基于图像处理的石墨材料气孔率统计计算方法,对两种材

料(气孔率分别为0.024%、1.487%)的内部孔隙进行了统计分析,如图10所示。

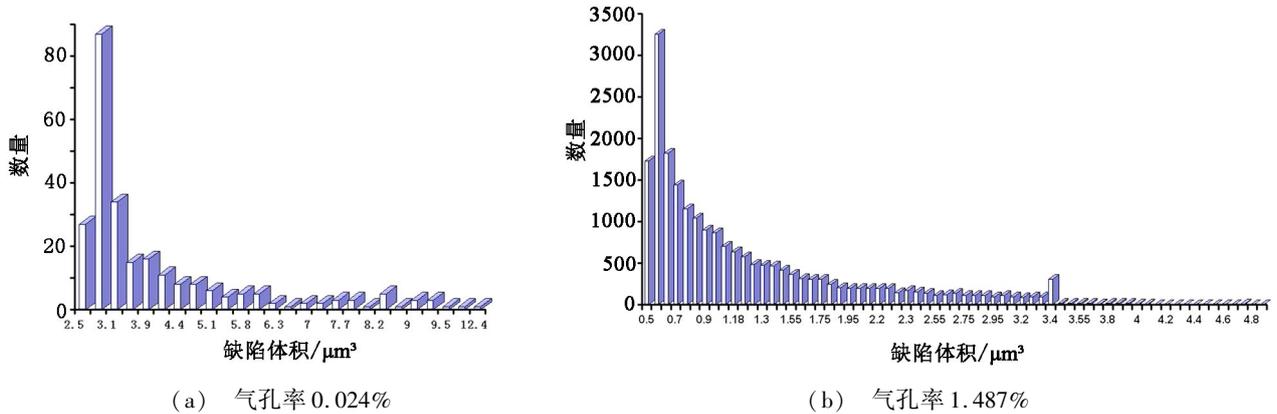


图10 不同材料内部孔隙统计数据

Fig.10 Statistical data of internal voids of different materials

4 典型缺陷特征判定

基于上述理论分析及关键工艺参数设置准则,精确捕捉完成了裂纹、砂眼、低密度疏松及高密度夹杂等典型缺陷,其缺陷特征分析如下。

(1) 裂纹

裂纹缺陷为产品影像上有不规则的黑色纹路,其

特征是走向、位置和大小不规则,形状呈细长,一端或两端呈尖锐状,多为宽度很小,且有变化的缝隙,容易与其他缺陷相区别,属于窄缝型缺陷,如图11(a)所示。

(2) 砂眼

砂眼缺陷为产品影像上有点状黑色区域,其特征

是位置大小不固定,边界光滑,其形状可能是圆形、椭圆形或长方形,黑度一般都较大,特征清晰,属于体积型缺陷,如图 11(b)所示。

(3) 低密度疏松

低密度疏松缺陷为产品影像上存在局部浅黑色区域,其特征是边界不规则,一般呈片状,颜色介于材

料与背景色之间,是体积型缺陷,如图 11(c)所示。

(4) 高密度夹杂

高密度夹杂缺陷为产品影像上存在局部亮点区域,其特征是颜色较亮,位置和大小不固定,边界不规则,其亮度远大于材料及背景色,特征清晰,是体积型缺陷,如图 11(d)所示。

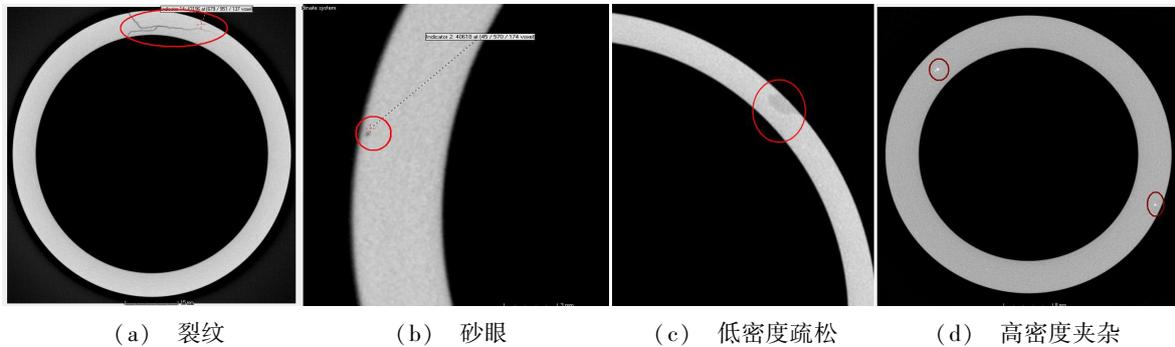


图 11 典型缺陷特征标样

Fig. 11 Typical defect characteristic standard

5 结论

本文结合液体火箭发动机端面密封的工作特性,阐明了端面密封用石墨材料内部缺陷检测的必要性,并结合石墨材料的制造工艺,归纳了石墨材料内部缺陷的主要类型。深入研究了 X 射线关键工艺参数对石墨材料内部缺陷特征检测的影响,并进行了检测精度试验验证。

(1) 在相同电流条件下,随着电压的升高,图像的灰度、对比度及饱和度等数值均会不断增大,在相同电压条件下,随着电流的升高,图像的灰度、对比度及饱和度等数值也会不断增大,并且在高电压及高电流条件下各参数的增长速率明显高于低电压及低电流条件,根据试验数据分析当功率 $P=60\text{ W}$ 时,石墨材料内部缺陷特征最明显。

(2) 在石墨材料内部缺陷检测过程中,石墨缺陷特征的清晰度与滤片的密度成反比,密度略高于石墨的 Al 滤片效果最优。

(3) 随着积分时间的增加,图像灰度、对比度及饱和度越来越高,当积分时间为 400 ms 时,图像均匀度及缺陷特征最优。

基于本文提出的关键工艺参数设置准则,对两种常用的液体火箭发动机端面密封石墨材料,进行了内

部孔隙的可视化仿真分析,提出了一种基于石墨材料的气孔率统计计算方法,并结合两种材料的生产工艺,对材料的气孔率进行了统计分析,最终建立了液体火箭发动机端面密封用石墨材料内部缺陷检测的特征标样,确保密封产品石墨材料良好,有效预防在发动机试车、飞行过程中因石墨材料内部缺陷发生故障,提高了发动机质量和可靠性。

参考文献

- [1] 李平,陈锐,李婉秋. 石墨制品的超声波无损检测技术[J]. 炭素,1997,19(4):32-36.
- [2] 韩立新. 碳素材料内部缺陷的检测方法探讨[J]. 湖南农机,2013,40(5):58-59.
- [3] 李平. 电炭制品 X 射线无损检测[J]. 炭素,2008,30(1):30-34.
- [4] 南京达,高景宽,余养怡. 红外无损检测技术在碳基复合材料内部缺陷检测中的应用[J]. 炭素,1990,12(2):22-25.
- [5] 周贤,刘义伦. 炭素制品缺陷的 X 射线自动检测技术研究[J]. 光学精密工程,2006,14(3):503-506.
- [6] 江师. 某石墨环的超声波 C 扫描检测研究[D]. 中北大学,2012.
- [7] 韩跃平. X 射线视觉自动检测技术及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2012.