

文章编号: 0253-2239(2003)05-0547-05

# 强反射复杂表面随机缺陷检测照明系统分析\*

曲兴华<sup>1</sup> 何 滢<sup>1</sup> 韩 峰<sup>2</sup> 赵旭辉<sup>1</sup> 叶声华<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)  
(<sup>2</sup> 内蒙古工业大学机械学院, 呼和浩特 010062)

**摘要:** 分析了采用 CCD 光电检测法对强反射复杂表面随机缺陷进行检测时的光学照明问题。给出了缺陷显现力的具体定义。对比了平行光和均匀散射光对消除强反射光的不同作用及对不同表面缺陷的显现力。分析了使用均匀散射光作为光源时, 工件表面照度对成像质量的影响。给出了在上述条件下光照系统设计的基本原则。

**关键词:** 图像处理; 缺陷显现力; 光电检测; 照明系统; 均匀散射光

中图分类号: TP274<sup>1</sup>.3 文献标识码: A

## 1 引 言

目前, 国内外都在极力提高产品质量, 包括产品的表面质量和外观质量, 因而缺陷自动检测备受企业的关注, 并在实际生产中发挥日益重要的作用。国外, 二十世纪六七十年代就已开始了自动检测系统的研究。现在, 某些技术, 如激光扫描、超声波扫描技术、光电检测技术等已相当成熟, 自动检测系统在这些国家已相当普遍<sup>[1]</sup>。在我国, 自动检测系统与质量控制手段仍较薄弱。

在自动检测方法中, 表面缺陷的检测是一项重要的研究课题, 具有一定的技术难度。在进行表面缺陷的检测中, 经常使用面阵 CCD 光电检测系统。该系统具有受环境电磁场影响小、工作距离大、测量精度高、成本低、非接触等特点。但当该系统用于强反射复杂表面随机缺陷检测时, 由于工件表面是光滑金属层, 表面的反射光极强, 强照度下使得 CCD 成像的画面亮度失真, 对 CCD 扫描成像有很大的影响。并且工件表面宏观和微观几何形状变化多样, 表面层的形成种类也很多, 表面缺陷是随机的, 其形状和尺寸千差万别, 也给自动检测工作带来了很大的困难。因此光学系统是整个系统的重要组成部分, 对于 CCD 成像和后期的图像处理、缺陷识别工作都具有重要的影响。然而国内外针对强反射复杂表面随机缺陷检测光照系统方面所作的系统研究还

比较少。在检测复杂表面随机缺陷时光源选取及用光方面应遵循: 1) 消除强镜面反射光对成像质量的影响; 2) 消除某些缺陷产生的各向异性并且最大限度地获得各类缺陷的图像信息。本文围绕以上两方面对光学系统进行了讨论, 解决了强反射复杂表面随机缺陷检测中用光方面的技术难题, 为图像摄取和后期的图像处理及缺陷识别工作打下了良好的基础。

## 2 光滑金属表面对面阵 CCD 成像的影响

光照射到不透明物体表面时, 会产生漫反射、折射、吸收等, 还会有镜面反射光存在, 根据物体表面对光的反射情况, 可将物体分为光滑、半光滑和不光滑物体。图像中像素的亮度取决于多种因素, 其中包括物体的几何形状、光的入射角和发光强度、传感器的观察方向及物体表面的反射。不同的物体要求不同的光源及视觉条件, 而不同的光学条件又影响测量效果<sup>[2]</sup>。当被测工件表面为光滑金属时, 采用一般的照明方法很难完成任务。原因主要为: 光滑金属表面的镜面反射光极强。

金属表面工件属于半光滑物体, 不是理想的漫反射体。采用漫反射光可以使光线均匀照射到比较粗糙的物体表面上, 其表面固定点的明暗程度不随观察位置而改变。这样在采集图像上背景灰度高且均匀, 物体边缘突出, 便于提取。

相对理想的漫反射体而言, 金属表面的镜面反射光很强。使得面阵 CCD 光敏面上的曝光量超过其饱和曝光量, 所成画面亮度失真, 淹没所要检测的

\* 高等学校博士科学点专项科研基金(20020056002)资助课题。

E-mail: whby@cyou.com

收稿日期: 2002-04-01; 收到修改稿日期: 2002-06-10

缺陷的信息,如图 1 示。所以检测时要首先消除表面的镜面反射光。

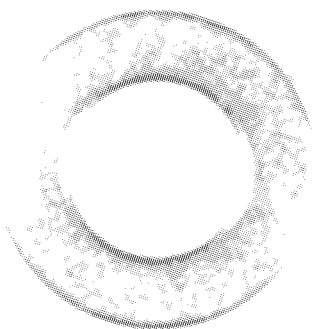


Fig. 1 Image taken under strong reflection

### 3 不同反射面上漫反射光的分布情况

理想漫反射面又称余弦辐射体,其反射光的光强分布可表示为

$$I_{\theta} = I_N \cos \theta$$

式中  $I_N$  为反射体表面法线方向的反光强度,  $I_{\theta}$  为和法线成  $\theta$  角方向的发光强度。

图 2 是用向量表示的余弦辐射体在通过法线截面内的漫反射光强度分布。但对于非理想漫反射体而言,当一束定向光入射时,漫反射光的分布只是集中在镜面反射光线的附近,垂直表面入射时如图 3 所示。从以上两图可以看出,在镜面反射光光强相同

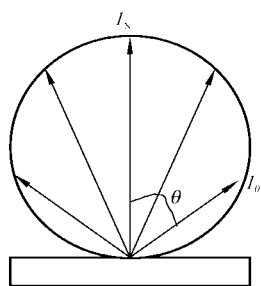


Fig. 2 Diffused light intensity distribution on ideal diffused reflecting surface

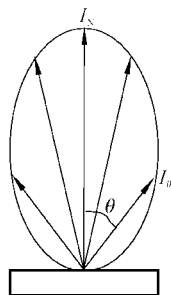


Fig. 3 Diffused light intensity distribution on non-ideal diffuse reflecting surface

的情况下,对相同的  $\theta$  角,非理想漫反射光的光强明显小于理想漫反射光的光强<sup>[3]</sup>。

### 4 平行光

平行光源是 CCD 取像常用的一种照明光源。由平行光管发射出的光束是准平行的,等效于由无穷远射来的光束。平行光具有良好的方向性和准直性。用平行光作为光源时,为了消除镜面反射光的影响,投影光轴与成像光轴要成一定的角度<sup>[4]</sup>,如图 4 所示。平行光照射到无缺陷的光滑表面时,反射光中的绝大部分为镜面反射光。镜面反射光遵循理想光路反射,没有进入 CCD。只有小部分漫反射光进入 CCD 成像,从而消除了镜面反射光的影响。在缺陷处,反射光将改变方向,使得反射光投影到 CCD 上,在 CCD 的像敏面上成像。所得到的图像如图 5(a)所示,图像的灰度级差别较大、对比度高,图像比较清晰<sup>[5]</sup>。

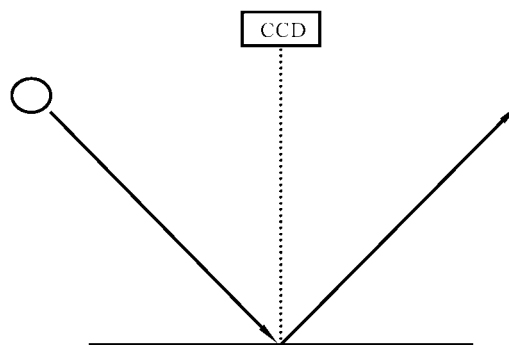
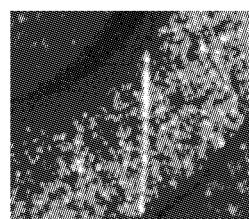
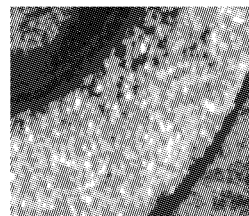


Fig. 4 Principle of parallel light



(a)



(b)

Fig. 5 Comparison of different directions of parallel light. (a) Parallel light vertical with the direction of amyxis; (b) Parallel light parallel with the direction of amyxis

但由于平行光具有良好的方向性,其辐射亮度

在各方向上是不对称的。因此对各种缺陷的显现力不同。在相同条件下,当划痕或裂纹方向与平行光入射方向垂直时,图像中缺陷表现最清晰,如图 5(a)。而当划痕或裂纹走向与入射光方向一致时,在图像中几乎看不到这种缺陷,如图 5(b)。这样有可能在后期的工作中无论采用什么样的处理方法都检测不到这种缺陷。

## 5 均匀散射光

为了避免信息的丢失,考虑选用均匀散射光作为 CCD 的照明光源。

在一般情况下,面光源表面各处的辐射亮度以及该面光源各方向上的辐射亮度都是不相同的,在某点处的亮度是方向角  $\theta$  的函数。如果有这样的面光源,它在各个方向的辐射亮度都相同,称为余弦辐射体或均匀散射体。余弦辐射体的辐射亮度从各方向来看都是一样的,表面粗糙的自身发射体和被照明的散射体接近于余弦辐射体。

钨丝白炽灯发出的经过磨砂玻璃透射的光向所有方向散射,以致从各个方向看来,其亮度接近相等,可近似看作为均匀散射光。用均匀散射光作为面阵 CCD 的照明光源,在 CCD 中所获取的图像,如图 6 所示。

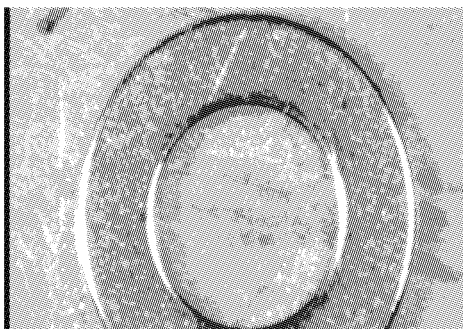


Fig. 6 Image taken under uniform scattered light

与用平行光作为光源相比较,均匀散射光的光线是非定向的,散射区域较大,从而会产生一种比较均匀的照明。结果是所取的图像的边缘柔化,灰度差和对比度都会相对小些。但是对各种缺陷的综合显现力却很好,不会丢失信息。这对于后期的处理工作非常有利。因而在本实验中采用了用钨丝白炽灯作为光源经磨砂玻璃而形成均匀的散射光。

## 6 照度与检测缺陷的显现力

本文检测的金属表面工件的大小在  $\phi 30$  mm 以

内,工件表面宏观和微观几何形状变化多样,表面层的形成种类也很多,表面缺陷是随机的,其形状和尺寸千差万别。

针对这种半光滑的复杂金属表面工件,除上述光源类型的影响外,光源的发光强度对图像的成像质量也有很大的影响。通过大量实验发现,对于缺陷检测的照明,希望在一定类型光源的光强照射下,缺陷与背景对比的差别越大越好,单纯用光强很难能说明问题,需要一个新的指标来表达它。为此,研究了缺陷的显现力指标。

进一步实验研究了发光强度不同的均匀散射光对表现各种不同缺陷的作用。调节钨丝灯的电压来得到不同发光强度,用照度计测量工件表面的照度值。当光圈一定时,反射光的强度随着照度的增加而增加。在强照度下(高于 1000 Lx)CCD 成像的画面亮度失真。不同的入射光照度对不同缺陷的表现能力有所不同的。调节光源的输入电压得到不同照度的入射光,通过照度计获得准确的照度值,单位为 Lx。缺陷显现力  $\Delta V$  是指缺陷区域的平均灰度  $V'$  与整幅图像的平均灰度  $V$  的差值。

整幅图像的平均灰度

$$V = \sum_{f=0}^{255} \left( f \times \frac{n_f}{n} \right)$$

缺陷区域的平均灰度

$$V' = \sum_{f=0}^{255} \left( f \times \frac{n'_f}{n'} \right)$$

显现力

$$\Delta V = V - V'$$

其中  $f$  为图像的灰度级数, $n$  为整幅图像的总像素数, $n'$  为缺陷区域图像的像素数, $n'_f$  为灰度级为  $f$  的像素数。

通过实验,得到照度与各种缺陷显现力的关系。表一给出了三种典型缺陷(划痕、砂眼、刀痕)的显现力值和照度值。图 7 中所示为这三种典型缺陷的照度值与显现力关系的曲线。在工件表面的照度值低于 30 Lx 时,由于工件表面反射到 CCD 像敏面上的光照度低于 CCD 器件的灵敏阈<sup>[6]</sup>,较暗部无法测出,获得图像的整体灰度偏暗,降低了画面亮度的层次产生测量误差,如图 8(a)所示。工件表面照度值在 50~80 Lx 之间时,对各种缺陷的显现力值都比较高,显现力是均匀的,并且在此照度下获得图像的灰度分布特性良好。如图 8(b)所示。照度值高于 100 Lx 时,获得图像的整体灰度偏亮,也降低了灰度的层次易产生误判。如图 8(c)所示。通过分析比

较,综合得到在被检测工件表面照度为 50~80 Lx 时 对各种缺陷的显现力是均匀的。

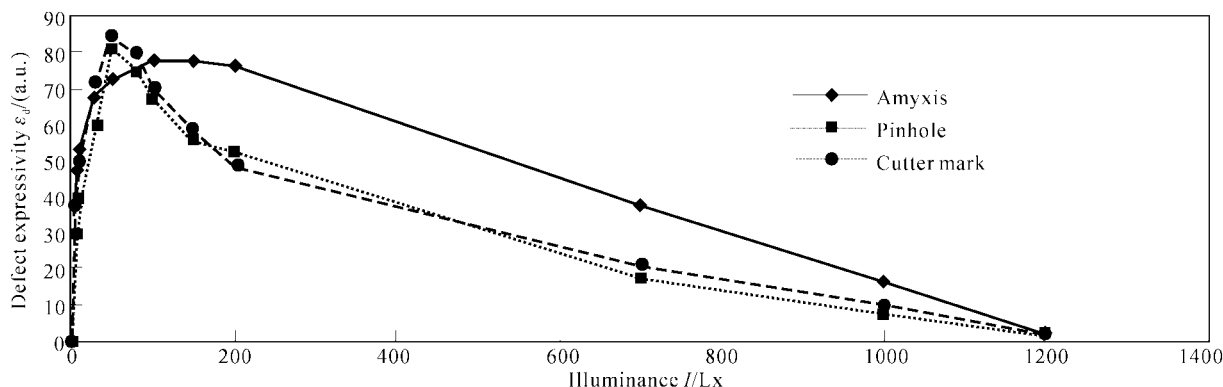


Fig. 7 Relations between luminance and defect expressivity of three defects

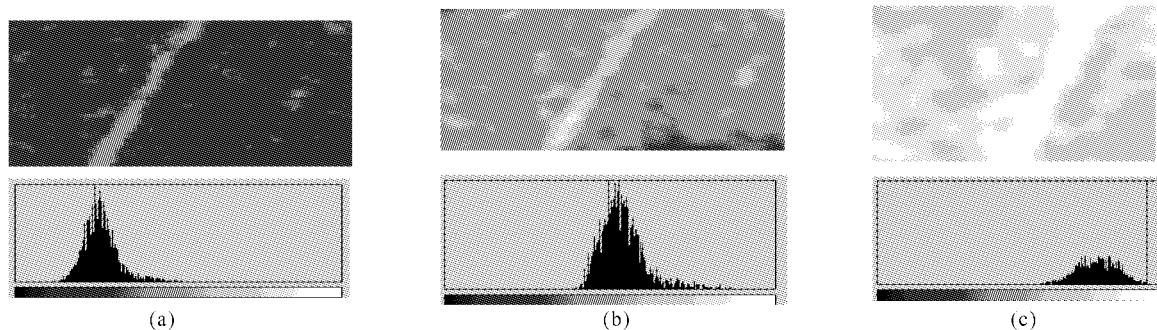


Fig. 8 Comparison of images and histogram acquired under different luminance. (a) Image and histogram of 10 Lx; (b) Image and histogram of 50 Lx; (c) Image and histogram of 200 Lx

Table 1. Luminance and defect expressivity of three defects

Defect expressivity Defects	Luminance /Lx		
	Amyxis	Pinhole	Cutter mark
0	0	0	0
5	48	30	38
10	53	40	50
30	68	60	72
50	73	81	85
80	76	75	80
100	78	67	70
150	78	56	59
200	76	52	49
700	38	18	21
1000	16	8	10
1200	2	2	2

**结束语** 通过实验和分析表明,用 CCD 光电检测法对强反射复杂表面随机缺陷进行检测时,采用均匀散射光作为照明光源,可以克服光亮金属表面反光

特性对 CCD 成像的影响。光源照射到工件表面的照度在 50~80 Lx 时,能够最大限度地获得各类缺陷的图像信息消除了某些缺陷的各向异性。从而解决了强反射复杂表面随机缺陷检测中用光方面的技术难题,为图像摄取和后期的图像处理及缺陷识别工作打下了良好的基础。

参 考 文 献

- 1 Wright P J, Rheinhorn S, Some D. Design and application of Gray Field/sup TM/ Technology for Defect Inspection Systems. Advanced Semiconductor Manufacturing Conference. 2001 IEEE/SEMI, 2001
- 2 Badger J C, Enright S T. Automate surface inspection system. *Iron and Steel Engng.*, 1996, (3):48~51
- 3 Vascotto M. High speed surface defect identification on steel strip. *Metallurgical Plant and Technology*, 1996, (4):70~73
- 4 Liu Cheng, Gao Shumci. Digital speckle photography based on image procession. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 1999, **10**(10):1396~1400 (in Chinese)
- 5 Du Ying, Zhang Guoxiong, Li Zhen. Influence of metal surface on optical non-contace probe. *Opto-Electronic Engineering (光电工程)*, 2000, **27**(5): 62 ~ 65 (in

Chinese)

Publishing Company of Tianjin University, 2000 (in Chinese)

6 Wang Qingyou, *CCD Application* (CCD 应用技术). Tianjin;

## Illumination System for Detecting Random Defects on Strongly Reflective and Complex Surfaces

Qu Xinghua<sup>1</sup> He Ying<sup>1</sup> Han Feng<sup>2</sup> Zhao Xuhui<sup>1</sup> Ye Shenghua<sup>1</sup>

1 *State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072*  
2 *Mechanical College, Inner Mongolian Polytechnic University, Hohhot 010062*

(Received 1 April 2002; revised 10 June 2002)

**Abstract:** The illumination methods related closely to detect random defects on strongly reflective and complex surfaces with CCD detection are discussed. A concept of defect expressivity is developed and the dependency of image quality on luminance is illustrated in the condition of scattered light. Based on the comparisons between parallel light and uniform scattered light, it is concludes that uniform scattered light is much better than parallel light in reducing the mirror reflection and good at revealing the various surface defects. The design principles under those particular conditions are presented.

**Key words:** image processing; defect expressivity; photoelectronic detection; illumination system; uniform scattered light