

# 金属断口宏观形貌表面粗糙度的定量研究

刘志栋 于斌

(兰州空间技术物理研究所,兰州 730000)

**文 摘** 基于分层层片技术重构原理利用图像处理技术和计算机图形学算法自主开发金属断裂面三维重构软件 JHX-FSR,通过软件前处理模块获取准确的断口三维空间数据场,测量断口局部区域的空间几何数据,并对断口中 20 个局部区域的断口表面粗糙度  $R_S$  和断口剖面轮廓线粗糙度  $R_L$  定量测量及统计分析。研究发现,  $R_S - R_L$  近似地呈线性关系,  $R_S$  随着断口剖面轮廓复杂程度的增加而增加,建立  $R_S - R_L$  的断口形貌几何特征关系的数学模型,金属断口三维重构对于断口形貌几何特征关系的数学模型的修正有一定的作用和意义。

**关键词** 断口形貌,表面粗糙度,剖面轮廓线粗糙度,几何特征,定量测量,定量分析,断口三维数据场

## Quantitative Study of Macroscopical Metallic Fracture Surface Roughness

Liu Zhidong Yu Bin

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

**Abstract** In the light of serial section reconstruction principle, an applied 3D reconstruction software JHX-FSR was developed by using image processing technique and computer graphics arithmetic. Precise 3D data can be obtained with pre-treating module of software. Geometrical data of local areas of fracture surface can be quantitatively measured. Fracture surface roughness  $R_S$  and fracture section contour roughness  $R_L$  of twenty local fracture surface were quantitatively measured and statistically analyzed. the relationship between  $R_S$  and  $R_L$  is linear,  $R_S$  increases with the increase of complexity degree of fracture section contour. The relationship between  $R_S$  and  $R_L$  is set, and the serial section reconstruction principle is of great significance for the modification of mathematics relationship between geometrical characteristics of fracture morphology.

**Key words** Morphology of fracture surface, Surface roughness, Fracture section contour roughness, Geometrical characteristics, Quantitative measurement, Quantitative analysis, 3D data sets of fracture surface

### 1 前言

近年来,计算机模拟及三维重构技术已经广泛地应用于材料研究领域<sup>[1~3]</sup>,金属材料研究领域中的三维空间结构的分析测量也逐渐成为热点。断口定量分析方法最早是由 El-Soundani 等人建立的<sup>[4]</sup>,这种方法将体视学理论推广应用于非平面表面,现已成为各种材料断裂研究的主要手段之一,断口轮廓形貌的特征反应了材料的力学性能和断裂机理,由断口定量分析可以提供宏观断裂力学分析无法得到的信息。Underwood 等人提出了一种不带假设的估计  $R_S$  的方法,用三个互成 120° 角的平面垂直切割断口表面,得到三根剖面迹线,在这三根迹线上进行测量即可得到断口粗糙度,这种方法建立在体视学原理基础之上,

利用计算机对一些规则面进行模拟验证,但是否能够真正用于真实的断口表面却未做进一步的验证和探讨;Wright 等通过计算机模拟不规则平面表面(非重叠的)研究断口表面粗糙度和断口剖面轮廓线粗糙度的关系<sup>[5]</sup>。基于分层切片重构实物原型的软件设计在医学、地质学等研究领域得到的广泛的应用,分层切片技术重构多晶体材料微观组织结构的技术在国内国外有相关研究<sup>[6]</sup>,而通过分层切片法重构断口却未见报道。

金属断裂表面大多是复杂的空间曲面,从几何角度考虑,可以划分为可展曲面和不可展曲面<sup>[7]</sup>,不可展曲面的几何特征参量是很难直接测量和分析的,以往根据体视学原理对断口三维重建需要最佳的图像

收稿日期:2009-02-06;修回日期:2009-04-14

作者简介:刘志栋,1974 年出生,高级工程师,主要从事航天压力容器的设计研究。E-mail:evanwu@163.com

特征匹配算法,而且对于断口实际形貌在投影面有交叠区域的复杂断口形貌往往不能精确重建,所以迫切需要一种新的方法重建断口形貌。

## 2 断口三维数据场的获取

通过软件前处理模块得到断口的三维数据场,其中算法包括断口切片轮廓线特征提取、几何校正、切片数据匹配、插值和数据整合等操作。图1(a)为实际断口宏观形貌,图1(b)为图1(a)中 ABCD 区域的切片重构,显示了切片重构的原理,坐标单位的换算公式见式(1)。图2为断口的三维重构结果。

$$1 \text{ pixel} = (1/3) \times 10^{-4} \text{ meter} \quad (1)$$

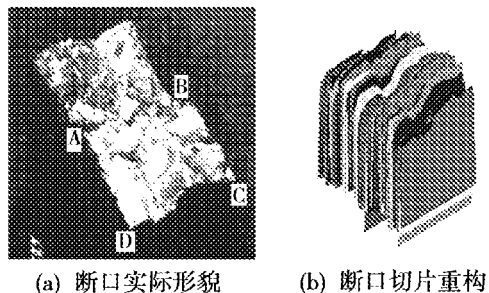


图1 断口形貌和断口切片数据可视化

Fig. 1 Real fracture surface and 3D reconstruction of serial sections

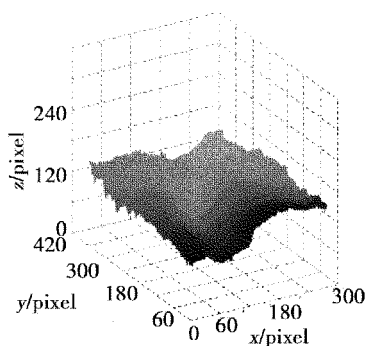


图2 断口的三维重构

Fig. 2 Three-dimensional reconstruction of fracture surface

图3为断口形貌重构旋转及三维数据场的可视化结果。

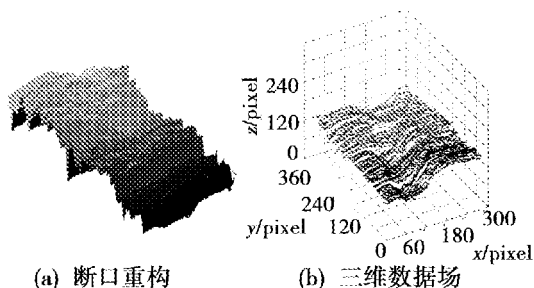


图3 断口重构旋转和断口三维数据场的可视化

Fig. 3 Three-dimensional reconstruction of rotary fracture surface and 3D vector of fracture surface

## 3 断口表面粗糙度推导

断口具有分形特点,断口局部形貌几何特征和整体形貌几何特征具有自相似性质,本文通过20个断口局部区域的  $R_s$  和  $R_L$  的测量,统计并研究断口宏观相貌尺度的  $R_s - R_L$  关系。

### 3.1 断口局部区域定量可视化

通过软件定量分析模块可以对断口局部区域进行定量可视化和定量形貌几何特征测量,图4为断口宏观形貌的俯视图,图5为图4中局部断口形貌的定量可视化结果,图5(a)、(b)分别对应图4的abcd和efgh区域。

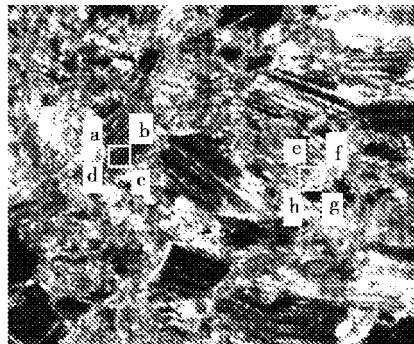


图4 断口俯视图的光学显微镜宏观形貌

Fig. 4 Optical microscope image of fracture surface

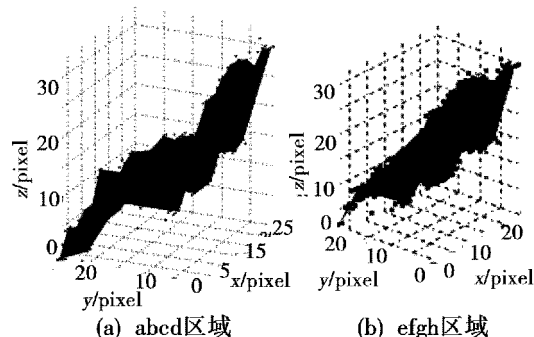


图5 断口局部矩形区域的定量表征

Fig. 5 Quantitative visualization of local area of fracture surface

### 3.2 断口局部形貌的面积测量

软件通过断口三维数据场重构断口宏观形貌,断口重构采用三角面片拼接的方式,断口整体形貌面积以及断口局部形貌的面积为所拼接三角面积的总和,已知三角面片的顶点空间坐标,得到三边长度,利用海伦公式计算三角面片面积,断口局部形貌面积即为三维空间中拼接的三角面片面积的总和,面积计算公式如式(2)。

$$S = \sum_{i=1}^n [L_i(L_i - A_i)(L_i - B_i)(L_i - C_i)]^{1/2} \quad (2)$$

式中,  $S$  表示断口表面面积,  $i$  为三角面片的序号,  $L_i$ 、 $A_i$ 、 $B_i$  和  $C_i$  分别第  $i$  个三角面片的周长的一半和三角面片的三边边长,  $n$  为三角面片的个数。

通过式(2)计算得到图5局部形貌的面积分别为933.17和1086.73 pixel<sup>2</sup>。

### 3.3 断口局部形貌表面粗糙度计算

断口表面粗糙度  $R_s$  的定义如式(3)所示,断裂表面的真实面积为  $S$ ,正投影面积为  $A$ (断面上重叠部分的投影不重复计入)。而在本文中面积结果中可以做到实际形貌的计算。

$$R_s = S/A \quad (3)$$

通过式(3)计算图5断口局部区域表面粗糙度,详细几何数据如表1所示。

表1 断口局部形貌表面粗糙度的计算结果

Tab.1 Calculated results of  $R_s$

区域	实际曲面面积/pixel <sup>2</sup>	投影面积/pixel <sup>2</sup>	$R_s$
A区[图5(a)]	933.17	625.00	1.4931
B区[图5(b)]	1086.73	500.00	2.1735

### 3.4 断口剖面轮廓线粗糙度的计算

断口轮廓线粗糙度  $R_l$  描述断口轮廓的几何平均行为,属于断口轮廓的总体参量,计算公式如式(4)。

$$R_l = L/L_0 \quad (4)$$

式中, $L$ 为断口轮廓线的实际长度, $L_0$ 为断口轮廓线的投影长度。图6显示抽取的6条剖面轮廓线数据及其投影线数据的可视化结果。

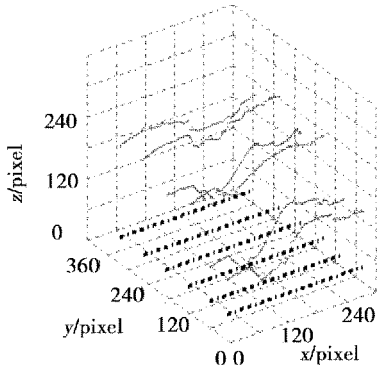


图6 断口剖面轮廓线和投影线数据可视化  
Fig.6 Three-dimensional reconstruction of contour data and its projective data

剖面轮廓线长的计算公式如式(5)。

$$L = \sum_{i=1}^n [(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2]^{1/2} \quad (5)$$

式中, $L$ 为剖面轮廓线长, $i$ 为断口三维数据场的信息点的序号, $n$ 为轮廓线信息点的个数, $(x_i, y_i, z_i)$ 和 $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ 分别为第*i*个第*i*+1个信息点的空间几何坐标。

根据式(4)和式(5)就可以计算断口及其局部区域的剖面轮廓线粗糙度,图7显示了断口轮廓线粗糙度在三维数据场中沿y轴方向的变化规律。断口局部区域的剖面轮廓线粗糙度计算方法同上述整体断口区域的计算方法一致。

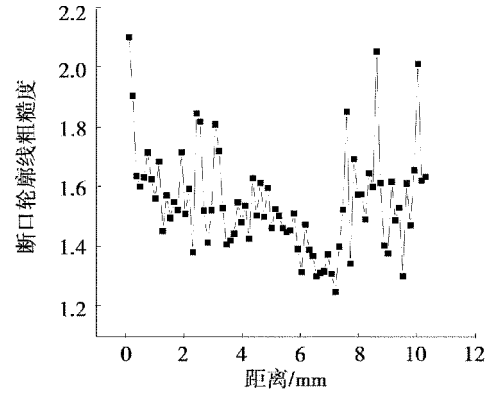


图7 断口轮廓线粗糙度沿y轴方向的变化曲线  
Fig.7 Roughness curve of fracture surface contour along y axis

### 3.5 断口表面粗糙度分析计算

在断口中抽取40个局部区域进行断口形貌特征的定量可视化,图8(a)显示断口40个局部区域的选取,图8(b)显示图8(a)的俯视图。

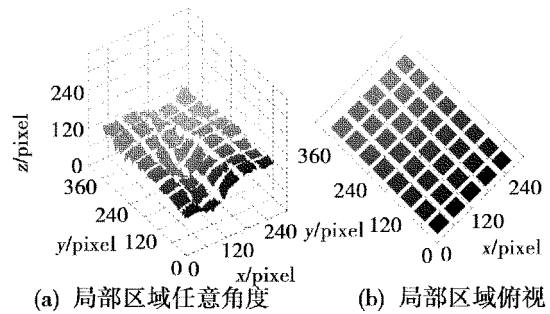


图8 断口局部区域的可视化  
Fig.8 Three-dimensional reconstruction of local area of fracture surface

断口局部区域表面采用式(2)计算,局部区域的投影面积均为1276 pixel<sup>2</sup>;断口局部区域表面粗糙度采用式(3)计算;断口局部区域剖面轮廓线粗糙度采用式(4)的计算;本文从中抽取20组数据进行分析推导,图9显示为断口局部剖面轮廓线粗糙度和表面粗糙度的对应关系。

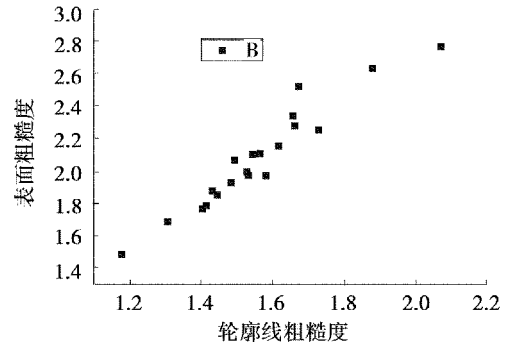


图9 断口局部剖面轮廓线粗糙度和表面粗糙度的对应关系  
Fig.9 Relationship between section contour roughness and surface roughness of fracture surface

由于 $R_s$ 难以直接测量,而 $R_L$ 较易获取,所以通过建立 $R_s - R_L$ 关系,推导 $R_s$ 值。很多人已研究了 $R_s - R_L$ 关系,并建立了相应的数学模型,大都是基于断口形貌几何特征测量结果的数据统计或根据断口计算机模拟技术来实现,某些研究人员提出了 $R_s - R_L$ 几个线性的关系式,如下:

Chermant and Coster<sup>[8]</sup>:

$$R_s \approx 1.75R_L - 0.75 \quad (6)$$

Wright and Karlsson<sup>[9]</sup>:

$$R_s \approx 1.57R_L - 0.57 \quad (7)$$

Underwood<sup>[10]</sup>:  $R_s \approx 1.52R_L - 0.27$  (8)

Gokhale and Underwood<sup>[11]</sup>:

$$R_s \approx 1.16R_L \quad (9)$$

文献[12]提出了一个在断口几何特征定量分析研究领域中被认为与实际情况吻合较好的断口剖面轮廓线粗糙度和断口表面粗糙度的函数关系式。

$$R_s = \frac{4}{\pi}(R_L - 1) + 1 \quad (10)$$

通过分层切片法针对复杂断口轮廓线的表面重建,从而获取较高精度的断口重构结果,对 $R_s - R_L$ 关系统计计算并对结果进行分析。借鉴于以往的研究,以及本文对断口结果的计算和验证,断口表面粗糙度和断口剖面轮廓线粗糙度近似成线性关系,本文拟建立 $R_s$ 和 $R_L$ 的线性关系式见式(11):

$$R_s \approx AR_L + B \quad (11)$$

用origin软件对数据进行直线拟合,图10显示为数据直线拟合的结果,拟合直线的斜率 $A$ 为1.57242,截距为-0.37559,线性相关系数为0.95969,结果带入式(11),最后得到断口表面粗糙度与断口剖面轮廓线粗糙度的关系式见式(12)。

$$R_s \approx 1.57242R_L - 0.37559 \quad (12)$$

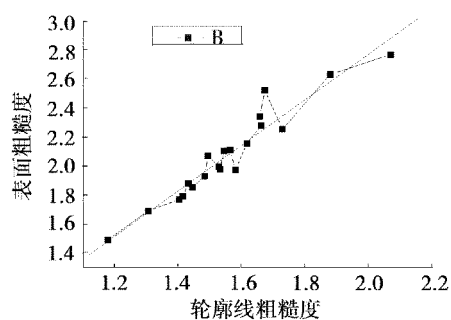


图10 表面粗糙度和轮廓线粗糙度数据的直线拟合

Fig. 10 Linear fit of data of surface roughness and contour roughness

### 3.6 实验数据分析

对于已建立的 $R_s - R_L$ 的函数关系,可以近似地计算金属断口表面粗糙度。通过图10可知, $R_s - R_L$

近似呈线性关系,线性拟合所得 $R_s - R_L$ 线性相关系数 $R$ 为0.95969, $R_s - R_L$ 曲线数据分布有很高的线性趋势,所以可以得出金属断口宏观形貌尺度 $R_s - R_L$ 近似呈线性关系。

通过对若干金属断口宏观形貌重构和局部区域定量统计分析,当 $R_L$ 递增时 $R_s$ 数值并不总是单调递增的,如图10中当 $R_L$ 在1.4~1.7, $R_s$ 数值总是围绕式(12)计算结果上下波动,所以 $R_L$ 并不是唯一影响 $R_s$ 的几何参量。从几何角度分析,断口形貌非常复杂,而 $R_L$ 和 $R_s$ 分别由断口剖面轮廓一维和断口表面二维形貌特征获取,使 $R_s - R_L$ 关系难以建立数学模型,只能通过 $R_L$ 近似地表示 $R_s$ , $R_s - R_L$ 近似呈线性关系。

## 4 结论

(1)分层切片法三维重构技术可以获取准确的断口三维数据场,为金属断口的形貌几何特征定量测量提供准确的空间几何数据。

(2) $R_s$ 随着断口剖面轮廓复杂程度的增加而增加, $R_s - R_L$ 近似地呈线性关系。

(3)通过对 $R_s$ 和 $R_L$ 数学模型的建立及分析,断口三维重构技术对断口的形貌几何特征的计算和分析以及几何特征关系数学模型修正都有一定意义。

## 参考文献

- 1 于斌,靳庆臣,刘志栋. 金属断口宏观形貌三维重构研究. 兵器材料科学与工程,2009;32(3):79~83
- 2 于斌,靳庆臣,刘志栋等. 三维重构技术在断口几何特征定量测量中的应用. 航天制造技术,2009;26(3):14~17
- 3 刘栋,颜云辉,张坚等. 金属断口表面定量测量与三维重建. 仪器仪表学报,2004;25(4):608~610
- 4 El-Soundani S M. Metallography,1974;7:271~311
- 5 李小武,田继丰,康雁等. 断口表面粗糙度的定量分析. 金属学报,1995;31(7):311~317
- 6 杨志刚,李旭东,于斌. 多晶体材料微观组织结构的计算机重构. 工程图学学报,2009;22(1):1~4
- 7 林大钧. 曲面面积求解方法研究. 浙江工业大学学报,2000;28(增刊):10~14
- 8 Chermant J L, Coster M. Review quantitative fractography. J Mater. Sci.,1979;14
- 9 Wright K, Karlson B. Topographic quantification of non-planar localized surfaces. J Micros.,1983;(1):37~51
- 10 Underwood E E. Estimating fracture characteristics by quantitative fractography. J Metals.,1986:106~118
- 11 Gokhale A M, Underwood E E. A new parametric roughness equation for quantitative fractography. Acta Stereol.,1986;8(1):43~52
- 12 钟群鹏,赵子华. 断口学——中国工程院院士文库. 北京:高等教育出版社,2005:114

(编辑 吴坚)