

文章编号: 1004- 0609(1999) 04- 0732- 04

钢-铝固液相复合中分形几何的研究与应用^①

张 鹏¹ 杜云慧¹ 任学平¹ 康永林¹ 刘汉武² 崔建忠² 巴立民³

(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 东北大学 金属压力加工系, 沈阳 110006;

3. 鞍山汽车配件厂, 鞍山 114014)

摘 要: 研究了钢-铝固液相复合板剪切撕裂表面的分形几何特征, 并且确定了分形维数与界面剪切强度之间的关系。研究表明: 剪切撕裂表面的分形维数与界面剪切强度之间满足 $y = 26.2x + 4.2$ 。利用由直径为 1.4~1.6mm 的钢丝制成的钢丝轮对 08Al 钢板表面进行打毛处理, 可以得到最佳的钢板表面粗糙状态, 使得复合板界面剪切撕裂表面的分形维数最大约为 2.33, 从而得到复合板的最大剪切强度为 65.3 MPa。

关键词: 剪切撕裂表面; 分形维数; 打毛处理; 界面剪切强度

中图分类号: TG111.91

文献标识码: A

自从 Mandelbrot 于 1977 年在《Fractals: Form, Chance and Dimension》中正式提出分形理论以来, 在各个领域中都普遍地开展了分形几何的研究与应用。就金属断裂来讲, 已经取得了长足的进展和极大的收获, 得到的普遍规律为: 断裂表面虽然凹凸不平、极不规则, 但在一定尺寸范围内观察, 又具有鲜明的自相似特征^[1,2], 所以其不规则性可以用分形维数(表面曲折性、不确定性的量度)来定量描述^[3,4]。钢-铝固液相复合是新兴的研究领域, 作者新近通过采用浸镀助焊剂的方法, 率先实现了钢板与液态铝的直接复合^[5,6]。本文对钢-铝固液相复合板的界面剪切撕裂表面进行了研究, 获得了其分形几何特征, 确定了其不同状态下的分形维数, 并且得出了剪切撕裂表面分形维数与界面剪切强度之间的关系。

1 剪切撕裂表面的结构特征

图 1 为放大 100 倍的钢-铝固液相复合板

的界面剪切撕裂表面钢板一侧形貌的俯视扫描电镜照片, 由图可以看出撕裂形貌是由大条纹 AB , CD 等和小条纹 Aa , Bb , Cc , Dd 等构成的; 图 2 为放大 7500 倍的钢-铝固液相复合板的界面剪切撕裂表面钢板一侧形貌的俯视扫描电镜照片, 由图可以看出撕裂形貌是由大条纹 AB 和小条纹 Aa , Bb 构成的。对比图 1 和图 2 可以十分清楚地看出, 两者存在明显的相似性, 图 1 的条纹实际上是由千千万万个图 2 的条纹汇聚而成的, 所以钢-铝固液相复合板的界面剪切撕裂表面具有鲜明的自相似特征, 根据 Mandelbrot 的分形理论, 完全可以认为钢-铝固液相复合板的界面剪切撕裂表面具有分形特征。

2 界面剪切撕裂表面的分形维数与剪切强度

在一定的剪切力作用下, 钢板表面的形态将决定复合板界面的应力分布状态, 影响界面

① 国家“八六三”计划资助项目 863- 715- 009- 060

收稿日期: 1998- 10- 07; 修回日期: 1999- 05- 26 张 鹏(1967-), 男, 博士后

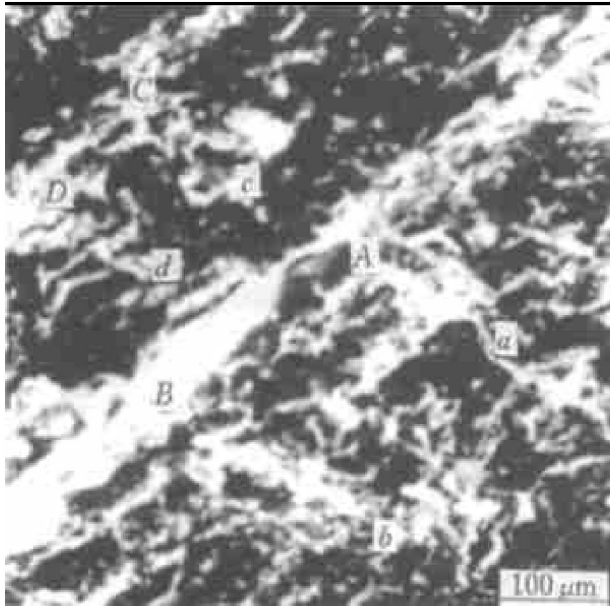


图 1 界面剪切撕裂表面钢板侧俯视形貌

Fig. 1 SEM image of interfacial shear surface of steel plate

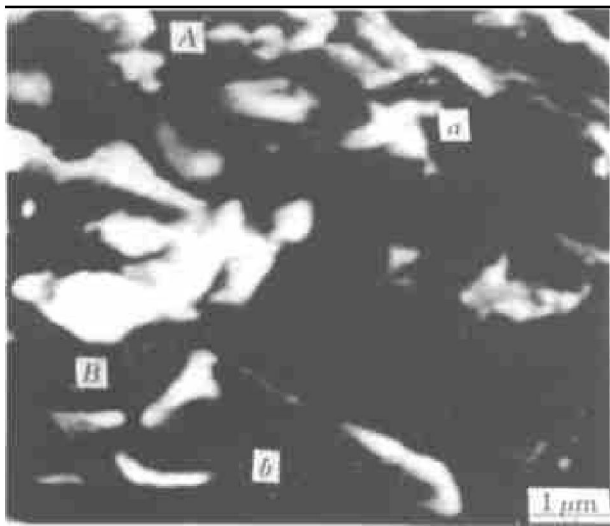


图 2 界面剪切撕裂表面钢板侧俯视形貌

Fig. 2 SEM image of interfacial shear surface of steel plate

的撕裂过程, 因此可以通过调整钢板表面的粗糙状态来实现对复合板界面剪切撕裂表面分形特征的控制。本文采用不同的打毛方式获得了不同粗糙状态的 08Al 钢板打毛表面, 进而得到了具有不同分形维数的钢-铝固液相复合板的剪切撕裂表面。对于界面剪切撕裂表面, 其分形维数越大, 则越粗糙, 其实际表面面积就

越大, 界面剪切强度(施加的剪切力与剪切撕裂表面的平面投影面积之比)也就越大, 因此, 剪切撕裂表面的分形维数与界面剪切强度之间存在一定的关系。为获得具有不同粗糙状态的钢板表面, 本文分别对 08Al 钢板进行了棕刚玉砂轮、砂布轮和钢丝轮打毛处理(见表 1)。表 1 中* 为砂轮的牌号; # 为制造砂布轮所用砂布的牌号; *d* 为制造钢丝轮所用钢丝的直径, 其单位为 mm。采用钢-铝固液相浸镀复合方法制成复合板; 采用线切割技术将复合板制成剪切试样后, 测试界面剪切强度(见表 1), 为充分利用打毛表面的沟槽效应, 试样的剪切方向垂直于钢板的打毛方向; 采用覆盖法测量试样钢板一侧剪切撕裂表面的分形维数(见表 1), 用于理论分析。

3 结果与讨论

3.1 复合板剪切撕裂表面的分形维数与界面剪切强度之间的关系

根据表 1 中的测试数据, 得到复合板剪切撕裂表面的分形维数和界面剪切强度之间的关系, 如图 3 所示, 对其进行回归分析, 得到回归方程为

$$y = 26.2x + 4.2 \tag{1}$$

式中 *x* 为分形维数, *y* 为界面剪切强度。回

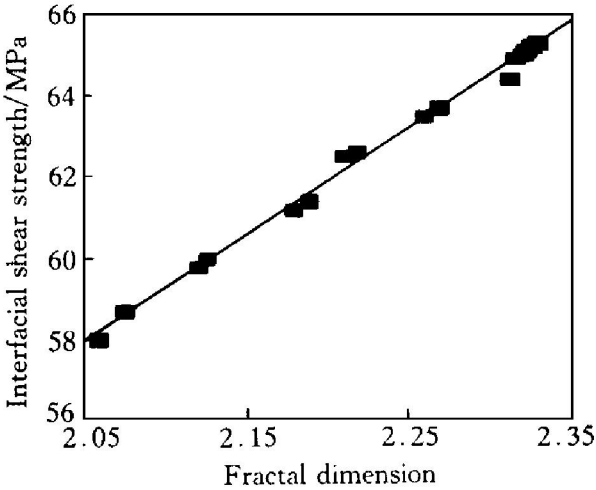


图 3 撕裂表面分形维数与界面剪切强度的关系

Fig. 3 Relation between fractal dimension and interfacial shear strength

表 1 钢板表面的打毛方式、撕裂表面的分形维数和界面剪切强度试验结果

Table 1 Roughening manner, fractal dimension and interfacial shear strength

Sample	Roughening manner	Fractal dimension	Interfacial shear strength/ MPa
1	80/ 100* sand wheel	2. 061	58. 0
2	50/ 60* sand wheel	2. 075	58. 7
3	30/ 35* sand wheel	2. 120	59. 8
4	20/ 25* sand wheel	2. 126	60. 0
5	1. 5# cloth wheel	2. 179	61. 0
6	2# cloth wheel	2. 189	61. 4
7	2. 5# cloth wheel	2. 211	62. 5
8	3# cloth wheel	2. 219	62. 6
9	3. 5# cloth wheel	2. 260	63. 5
10	d2. 2 steel wire wheel	2. 269	63. 7
11	d2. 0 steel wire wheel	2. 312	64. 4
12	d1. 8 steel wire wheel	2. 326	65. 2
13	d1. 6 steel wire wheel	2. 330	65. 3
14	d1. 4 steel wire wheel	2. 329	65. 3
15	d1. 2 steel wire wheel	2. 325	65. 2
16	d1. 0 steel wire wheel	2. 322	65. 1
17	d0. 8 steel wire wheel	2. 320	65. 0
18	d0. 6 steel wire wheel	2. 315	64. 9

归相关系数 R_1 为 0. 997 83, 说明回归方程(1) 已正确地反映了复合板剪切撕裂表面的分形维数与界面剪切强度之间的线性关系。

3. 2 讨论

对于表 1 中 1~ 13 号试样, 由于钢板表面的打毛处理方式使钢板表面逐渐由平直变得凸凹不平, 而且表面上沟槽的深度越来越大, 接触面越来越粗糙(粗糙特指接触面单位尺寸断面上接触曲线的长度大小, 接触曲线越长, 则接触面越粗糙, 图 4(b) 的接触面单位尺寸断面上接触曲线的长度比(a) 的大, 因此图 4(b) 的接触面比(a) 的粗糙), 接触面积越来越大, 使得钢- 铝固液相复合板的界面剪切撕裂表面分形维数逐渐增大, 撕裂表面越来越粗糙, 其实际表面面积越来越大, 实现剪断需要的外力越来越大, 所以界面剪切强度(施加的剪切力与剪切撕裂表面的平面投影面积之比) 也就逐渐增大。对于表 1 中 14~ 18 号试样, 由于钢丝轮的钢丝直径逐渐减小, 在本文所选的钢丝直径范围内, 钢板打毛表面沟槽的深度几乎不发生变化, 但沟槽的宽度逐渐减小, 这样一方面使

得接触曲线越来越长, 接触面越来越粗糙, 接触面积越来越大(如图 4(a) 、(b) 所示); 另一方面接触曲线尖峰之间的距离越来越小, 尖峰越来越尖, 数目越来越多。由于在进行固液相复合时, 钢铝接触面之间尖峰处产生脆性化合物^[7, 8], 这样使得尖峰脆化, 因此在外加剪切力 τ 的作用下, 铝将接触面上的尖峰拉断, 导致剪切撕裂表面的分形维数逐渐减小, 所以界面剪切强度就不断降低。由表 1 可见, 利用由

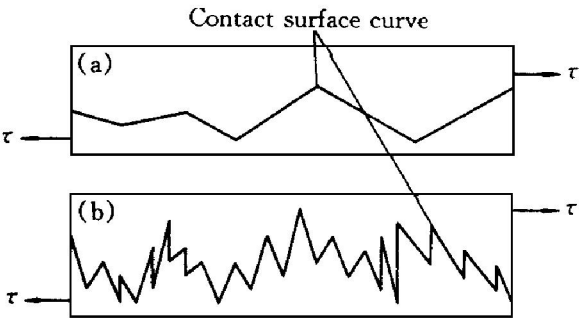


图 4 钢铝接触面断面分析图

Fig. 4 Schematic diagram of steel aluminum contact cross surface

直径为 $d1. 4\sim 1. 6$ mm 的钢丝制成的钢丝轮对

08Al 钢板表面进行打毛处理, 可以得到最佳的钢板表面粗糙状态, 使得复合板界面剪切撕裂表面的分形维数最大约为 2.33, 从而得到复合板的最大剪切强度为 65.3 MPa。

总之, 钢板的表面粗糙状态影响着复合板界面剪切撕裂表面的分形维数, 复合板的界面剪切强度随着剪切撕裂表面分形维数的增大而增大, 它们之间存在如公式(1)所描述的线性关系。

4 结论

(1) 钢-铝固液相复合板的界面剪切撕裂表面具有分形特征。

(2) 复合板剪切撕裂表面的分形维数与界面剪切强度之间的关系为

$$y = 26.2x + 4.2$$

其中分形维数 x 的最大值约为 2.33, 剪切强度 y 的最大值约为 65.3 MPa。

REFERENCES

- 1 Mandelbrot B B, Passoja D E and Paullay A J. *Nature*, 1984, 308: 721.
- 2 Mu Zaile(穆在勒) and Long Qiwei(龙期威). *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报), 1988, 24(2): A142.
- 3 Underwood E E and Banerji K. *Mater Sci Engng*, 1986, 80: 1.
- 4 Pande C S, Richards L E, Louat N *et al.* *Acta Metall*, 1987, 35: 1633.
- 5 Zhang Peng(张 鹏), Cui Jianzhong(崔建忠) and Du Yunhui(杜云慧). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报), 1996, 32(12): 1275.
- 6 Zhang Peng(张 鹏), Cui Jianzhong(崔建忠) and Du Yunhui(杜云慧). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报), 1997, 33(7): 869.
- 7 Zhang Peng(张 鹏). PhD Dissertation. Shenyang: Northeastern University, 1998.
- 8 Li Cuiping(李翠萍) and Liu Xingtian(刘兴田). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报), 1989, 25(5): 382.

Study and application of fractals in steel-aluminum solid to liquid bonding

Zhang Peng¹, Du Yunhui¹, Ren Xueping¹, Kang Yonglin¹,
Liu Hanwu², Cui Jianzhong², Ba Limin³

1. School of Materials Science and Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China

2. Department of Metal Forming, Northeastern University, Shenyang 110006, P. R. China

3. Anshan Automobile Fittings Factory, Anshan 114014, P. R. China

Abstract: The fractal characteristic of the shear surface of steel-aluminum solid to liquid bonding plate was studied, and the relationship between fractal dimension and interfacial shear strength was determined. The results showed that the relationship between fractal dimension and interfacial shear strength was $y = 26.2x + 4.2$ and when the 08Al steel plate was coarsened by steel wire wheel which was made up with steel wire whose diameter was 1.4~1.6 mm, the optimum coarsen condition of the steel plate surface could be got, that was, the maximum shear surface fractal dimension of the bonding plate interface was 2.33, and the maximum interfacial shear strength of the bonding plate was 65.3 MPa.

Key words: shear surface; fractal dimension; coarsen treatment; interfacial shear strength

(编辑 袁赛前)