

双金属复合材料界面结合性能测试方法的研究现状及应用

李鸿娟^{1,2,3}, 郭丽平¹, 封举宁¹, 吴琼², 汪力¹, 王正才³

(1. 湖南人文科技学院 能源与机电工程学院, 湖南 娄底 417000; 2. 瓦房店轴承集团有限公司, 辽宁 瓦房店 116300; 3. 宁波职业技术学院, 浙江 宁波 315800)

摘要:主要介绍了对于双金属复合材料界面结合性能的测试方法及研究现状,并主要针对常用双金属复合材料界面结合性能测试方法所使用的范围和存在的优缺点进行了总结归纳,以期后续开发双金属材料界面结合性能的测试方法提供理论基础。

关键词:双金属复合材料;界面结合强度;测试方法;进展

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20220612

中图分类号:TB331

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2023)06-0020-05

Research Status and Application of Testing Methods for Interfacial Bonding Properties of Bimetallic Materials

LI Hongjuan^{1,2,3}, GUO Liping¹, FENG Juning¹, WU Qiong², WANG Li¹, WANG Zhengcai³

(1. College of Energy and Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000, China; 2. Wafangdian Bearing Group Co., Ltd., Wafangdian 116300, China; 3. Ningbo Polytechnic, Ningbo 315800, China)

Abstract:The testing methods and research status of the interfacial bonding properties of bimetallic materials were mainly introduced. In order to provide a theoretical basis for the development of new testing methods for the interfacial bonding properties of bimetallic materials in further, the range of application and advantages and disadvantages of commonly testing methods for interfacial bonding properties of bimetallic materials were summarized.

Key words:bimetallic materials; interface bonding strength; testing methods; progress

双金属复合材料是利用某种加工技术将两种性能不同的材料复合在一起且界面实现冶金结合的一种新型材料,包括复合管材、线材或板材,如铜-铝^[1]、铝-镁^[2]、碳钢-不锈钢^[3]复合材料等。双金属复合材料兼备了两种材料的优异性能,综合性价比高,极大地改善了单一金属的热膨胀性、冲击韧性、耐磨性、强度、硬度等性能而得到应用,目前已被广泛应用于航空、船舶、汽车制造、电力、交通、压力容器制造等重要领域。双金属复合材料的制备工艺主要有固相轧制^[4]、液/固相复合轧制^[5-6]、爆炸复合^[7]、粉末烧结^[8]

等,双金属复合材料的界面结合性能是评价其制备工艺的重要指标之一。近年来,由于双金属复合材料界面结合性能不好而引起材料失效的案例有很多,因此,复合材料的界面结合性能在实际的产品应用中存在较大的安全隐患。由于复合材料的破坏失效首先发生在结合界面处,故对于双金属复合材料界面结合强度的测试问题应予以重视。然而,针对不同双金属材料测试其界面结合性能的方法不同,本文归纳总结了不同双金属复合材料材料(板材、线材和管材)的界面结合性能测试方法,以期后期开发新方法及技术提供理论基础。

1 双金属复合材料界面结合性能的测试方法

1.1 弯曲/扭转法

弯曲法^[9-10]是一种常用的测量复合材料界面结合性能的方法,是指在试样的某一固定位置上,将试

收稿日期:2022-03-09

基金项目:湖南省教育厅优青项目(21B0787);湖南省双一流学科建设
项目(湘教通[2018]469号);湖南省娄底市科技创新计划基
金资助项目(201801);湖南人文科技学院创新创业项目(校
教通[2018]49号))

作者简介:李鸿娟(1987-),女,内蒙古通辽人,博士,研究方向:金属材料
的开发与应用;E-mail:574193213@qq.com

样朝一个方向反复进行弯折,直至试样弯曲位置出现微裂纹使试样分层或断裂,通过对比试样的弯曲次数来分析材料的界面结合性能。或采用扭转试验机将试样进行 360° 旋转,用界面开始分离时的扭转次数表征界面结合性能^[11]。Zhang 等^[12]提出了采用四点弯曲法测量薄片层状复合材料垂直于界面方向的结合强度,所测界面法向结合强度上限,约为轴向拉伸试验的 1.5 倍。

1.2 剥离测试法

剥离法是测量沿双金属复合界面把两侧金属撕开所需的力,再把剥离曲线上稳定段的剥离力除以试样的宽度即为复合材料界面处的剥离强度^[13]。目前根据该原理有拉伸剥离法、T 型剥离法和转轮剥离法等。

拉伸剥离法所用试样为非标准型,长度约 500 mm,在一端预留一定距离并用锉磨平,然后沿长度方向加工掉覆层,约为 30 mm,通过测量预留剥离段的剪切力可计算出覆层/基体界面处的结合强度。拉伸剥离法原理示意图如图 1 所示。在一个长为 30 mm、直径为 $\phi 18$ mm 的铁棒中心钻出一个和基体直径相同的圆孔,用线切割机将其沿纵向切开,在拉伸机上一边夹住双金属线,一边夹住该卡具,将覆层从基体上剥离下来。端部预留部分长度选择要适当,在保证基体不被拉断的前提下,预留部分越长越好,一般预留 2~3 mm^[5]。黄海涛等^[14]采用该测试法研究了冷轧复合后 20 钢与纯铝板的结合情况。结果表明,表面经化学处理后,压下率为 65% 时复合板的结合强度最高,达到 13.3 N/mm。于九明等^[5]采用拉伸剥离法研究了铜钢液固相复合的界面结合强度。结果表明,铜线经表面处理,在 400℃ 预热复合后,钢和铜线的结合效果最好,界面结合强度达到 95 MPa。

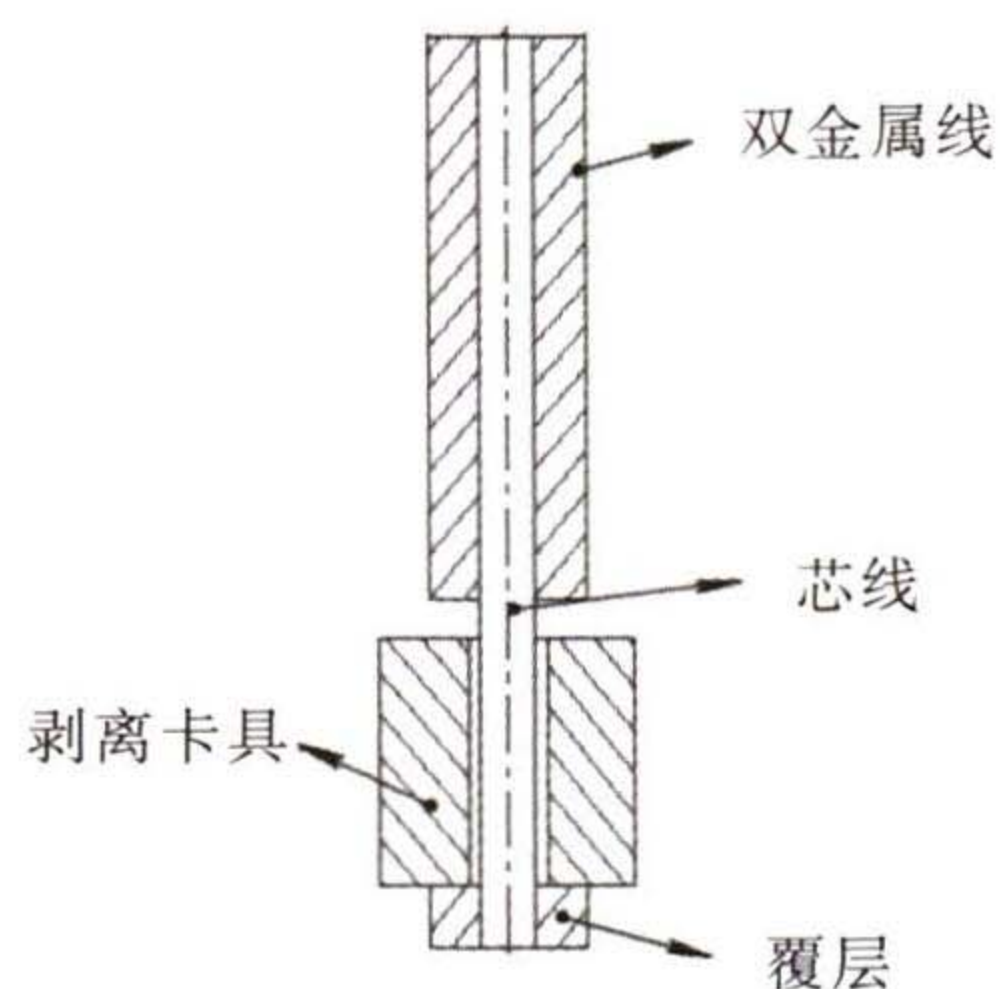


图 1 拉伸剥离法原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of the principle of stretch peeling method

T 型剥离法是指先将试样的覆层剥离约 70

mm,使与基层呈 T 型,然后用特制的卡具将试样固定在拉伸试验机上进行试验,获取拉伸曲线,最后用拉伸曲线上稳定段的剥离力除以试样宽度即得到剥离强度。在此方法中,试样宽度以及剥离角对试验结果有较大的影响。试样越宽、剥离角越小得到的剥离曲线越稳定,有利于复合板材界面结合强度的评价。同时,为了排除因机加工对试验结果造成影响,试样的长边必须经刨铣处理。T 型剥离法原理示意图如图 2 所示。

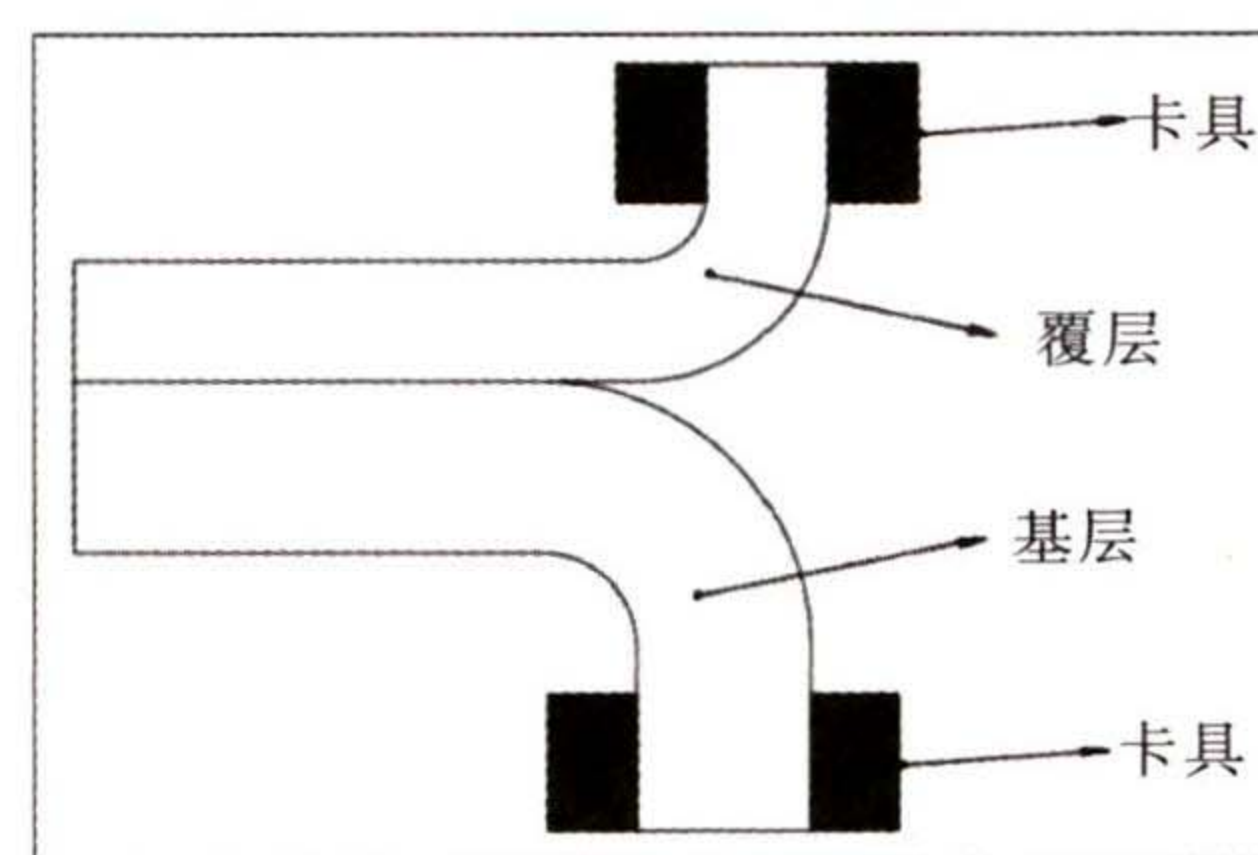


图 2 T 型剥离法原理示意图
Fig.2 Schematic diagram of the principle of T-peeling method

转轮剥离法与 T 型剥离法类似,但是转轮剥离法需将试样制成圆弧形,且需在试样两端制成两个与试样呈一定角度的圆孔,用于在转轮上固定试样。转轮剥离法对试样精度要求较高,如果剥离装置转动不顺畅,试样与转轮则不能紧密贴合,获得剥离曲线不稳定,影响试验结果。颜学柏等^[13]用转轮剥离法测试了经特殊工艺轧制的钛/铝复合板的结合强度,并提出总变形率对钛/铝轧后的结合强度起决定性作用;总变形率增大,钛/铝轧制后的结合强度急剧增加。钛/铝界面剥离强度约为 25 MPa。

1.3 剪切强度测试法

剪切强度测试法是用界面分离所需切应力的的大小来衡量其界面的结合强度。根据其受力方式主要分为压缩剪切强度和拉伸剪切强度。对于双金属复合管材、板材,通常采用拉剪法进行试验,拉剪法试验示意图如图 3 所示。先按如图 3(a)所示位置用线切割进行取样,取样后把所取部分进行拉直加工,经

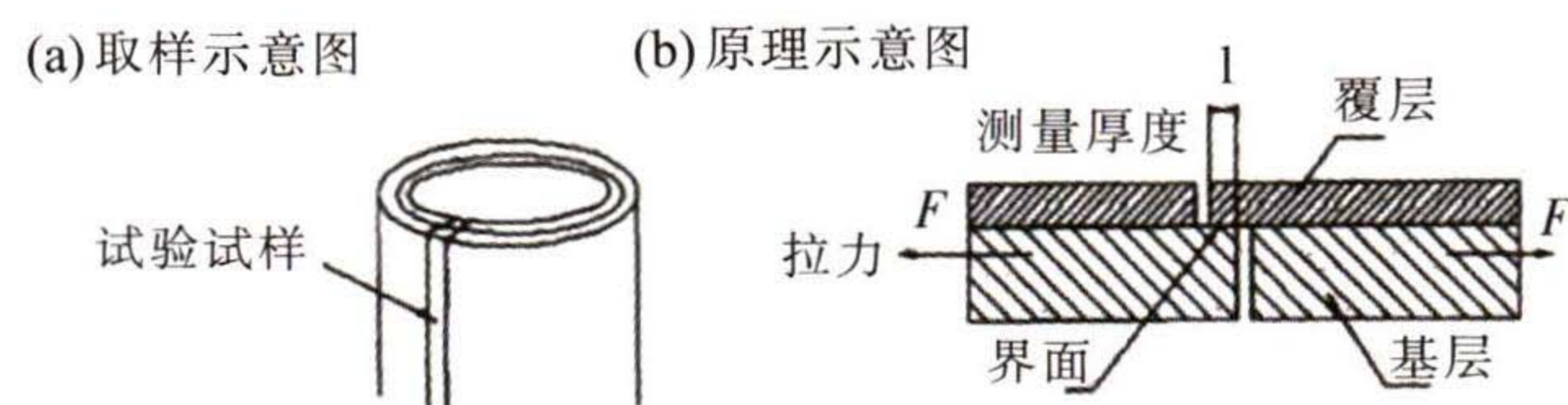


图 3 拉剪法试验示意图
Fig.3 Schematic diagrams of the experiment of the pull-shear method

加工后的试样如图 3(b)所示。在拉力试验机上对试样施加载荷,直至覆层与基层分离,测得最大拉力,再用根据剪切强度计算公式^[15]:

$$\tau = F/A \quad (1)$$

式中: τ 为剪切强度,MPa; F 为材料所剪切力,N; A 为剪切面积,mm²。用计算出的剪切强度表示双金属复合板材、管材的界面结合强度。

杨扬等^[16]和李忠文^[15]参照复合板的性能检测对 Ni-Cu 复合板试验样品进行了拉剪试验,界面结合强度随温度升高出现最大值;在 750~800℃退火 30~60 min,界面剪切强度可达 140 MPa 以上。刘少杰等^[17]提出了一种可提高铜-钢双金属铸件界面结合强度的新工艺,并用剪切强度测得经加工后的铸件结合强度可达到 131.8 MPa。冯雪楠等^[18]利用剪切试验对 Q235B/304 双金属热轧复合卷板结合强度进行了分析,同一复合板在中部位置的剪切强度值高于其他位置的剪切强度。

1.4 划痕法

划痕法是 20 世纪 30 年代发明的,用一个直径约为 $\phi 200 \mu\text{m}$ 的半球形金刚石压头在薄覆层表面上滑动,同时用自动加载机构连续增加垂直载荷 L ,当薄覆层与基体开始发生分离时的垂直载荷 L 为临界载荷,把这一临界载荷作为界面结合强度的判据^[19]。临界载荷可通过显微观察、电子探针、切向力等方法测得,但是由于划痕时薄覆层开裂、折皱、碎屑等一些原因,使得显微观察法应用受限。电子探针法适用于 2~7 μm 的硬质薄涂层的检测,切向力法主要用于 2 μm 及以下的软薄覆层结合强度的测量。近年来,常采用显微观察法与剥落一定面积薄覆层所对应的载荷表征临界载荷较为准确,其试验原理如图 4 所示,该方法通常适用于薄覆层的双金属复合材料。

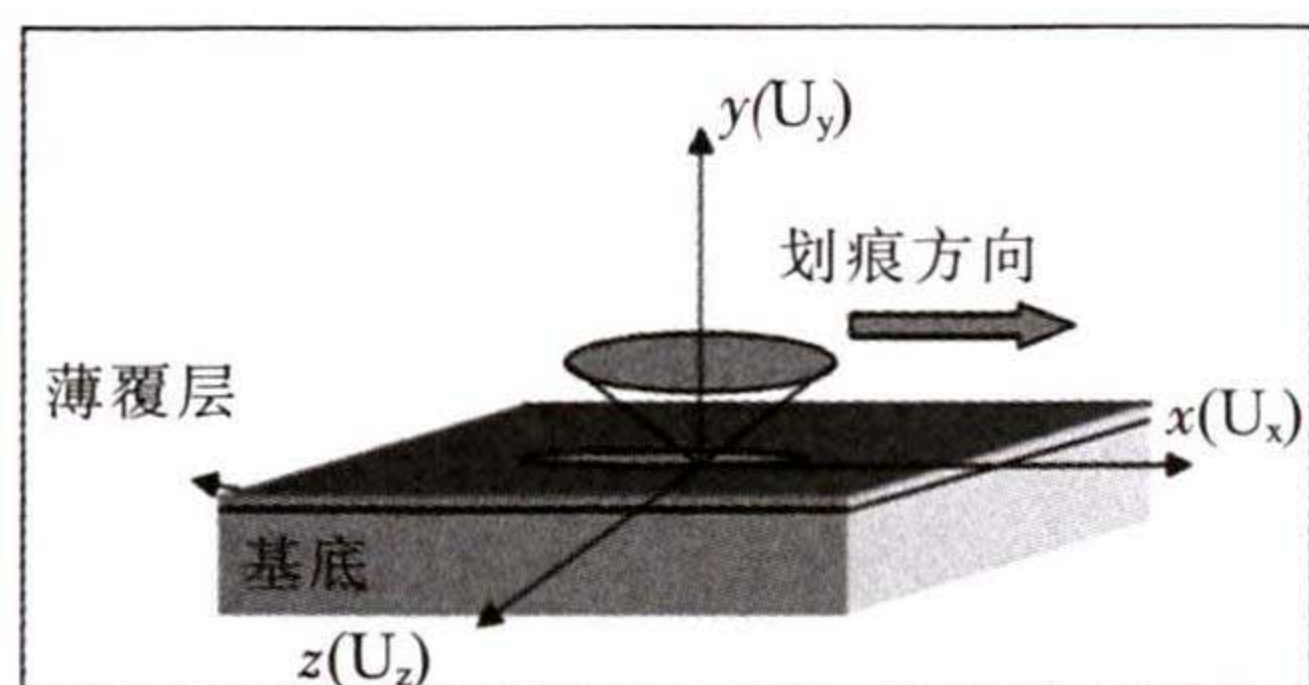


图 4 划痕法试验原理图

Fig.4 Schematic diagram of scratch method test

彭冰川^[20]采用理论与试验相结合的方法,建立了划痕法表征薄覆层材料界面结合性能模型的基本框架,试验结果与理论计算得出的 BTN 薄覆层界面

结合强度基本吻合。朱文贤等^[21]采用划痕法对 Ag-Cu/Ti 基体双覆层体系的结合强度进行了测试,研究发现其结合强度分别随着覆层厚度、划痕速度、加载速率的增大而降低。葛继平等^[22]用划痕法测定了 Ni-P 合金镀层的结合力,观察了划痕侧面镀层的失效形式,分析了临界载荷 L_c 、平均应力、B-W 公式在评定结合强度时的适用性。结果表明,用临界载荷和平均应力评定镀层结合强度是有条件的,如外来因素一致时,才能用临界载荷来评定结合强度的大小。

1.5 压痕法

压痕法是用压头以一定载荷压在复合金属界面上,载荷较低时复合材料共同发生变形,当达到一定载荷时界面开裂,此时的载荷称为临界载荷。临界载荷的大小表征了复合材料界面处抵抗开裂的能力,即表征界面结合强度。根据压头位置不同,可分为表面压痕法、界面压痕法、侧面基底压痕法^[20],压痕法原理示意图如图 5 所示。其中,覆层表面压入法受基体硬度影响较大^[23],使用受限。界面压入法可评定覆层与基体之间的界面结合强度,目前应用在测试复合材料界面结合性能较为普遍。

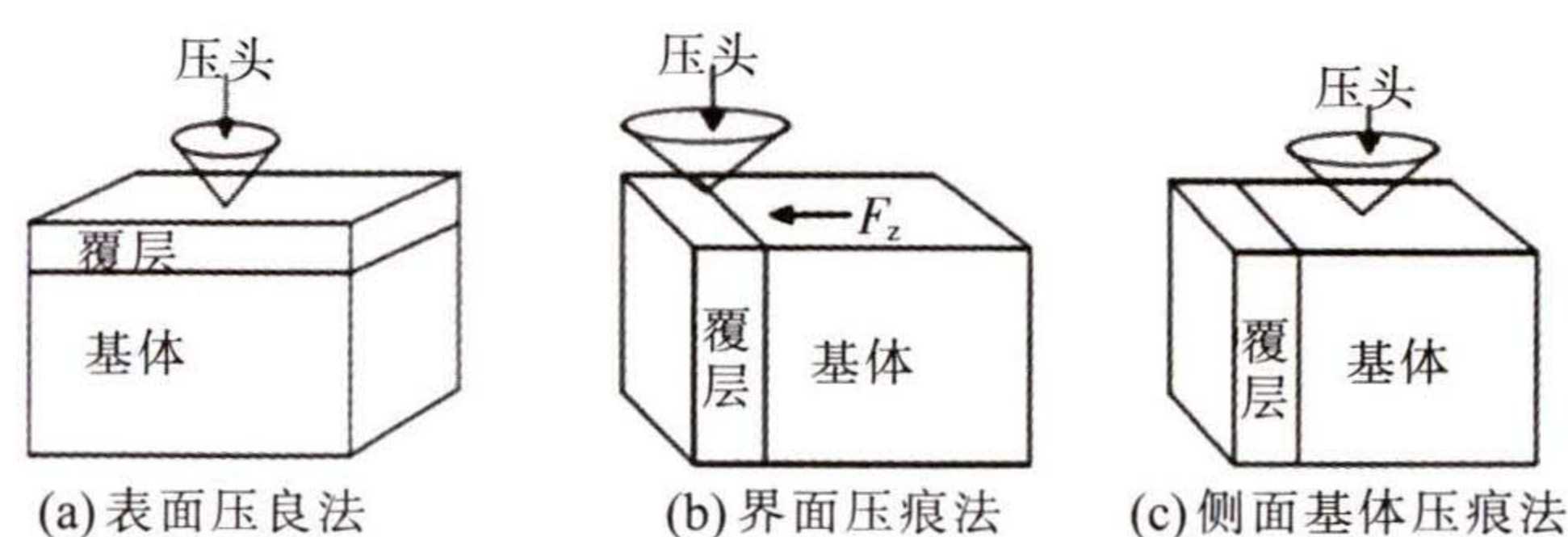


图 5 压痕法原理示意图

Fig.5 Schematic diagram of the principle of indentation method

随着载荷的增大,裂纹扩展速率也逐渐增大,当压入载荷足够大时,界面处裂纹长度与载荷值呈正比,其斜率表征了界面抗裂纹扩展能力,根据临界载荷与侧向裂纹沿界面扩展速率来评价双金属复合材料的界面结合强度。李河清等^[24]研究了压痕法的 Chiang 模型和 Evans 模型,针对现有模型的不足之处,提出了有限元分析与压入试验相结合的方法,可以对界面结合强度进行一个较为全面的表征。

1.6 其他方法

目前除了上述方法以外,双金属复合材料的界面结合性能测试方法还包括利用了电磁感应技术的离心力法^[25-27]、借助计算机技术的有限元分析法^[28]和利用超声波的无损检测超声波法^[27,29]等一些现代计算方法。

2 界面结合强度主要测试方法的优缺点、应用及研究进展

目前，双金属复合材料界面结合性能的常用测

试方法主要包括剥离法、剪切强度测试法、弯曲 / 扭转法等，每种方法均存在自身的优缺点及适用领域。常用的几种双金属复合材料界面结合性能测试方法优缺点及应用见表 1。

表 1 常用几种双金属复合材料界面结合性能测试方法优缺点及应用
Tab.1 Advantages, disadvantages and applications of several commonly used test methods for interfacial bonding properties of bimetallic composites

方法	优点	缺点	应用(适用领域)
剪切强度测试法	操作简单,试样制备容易	对试样加工精度要求高;拉剪时复层强度需高于界面结合强度	广泛应用于各类层状复合材料界面结合强度的测试
转轮剥离法	数据稳定、可靠、精确、灵敏便于读取	试样加工精度要求高	适用于薄的双金属复合板结合强度测试
T 型剥离法	可操作性强、试样加工简单	测试结果影响因素较多	适用于有一定厚度的覆层的复合材料界面结合强度的测试
划痕法	操作简单、测试结果可量化、重复性好、监测手段较多,结果分析方便	失效形式复杂、只能反映局部位置的结合强度,不能反映界面整体的结合强度	适用于硬质工具软覆层、装饰膜及 DLC 膜等薄覆层 / 基体界面结合强度的测试
弯曲 / 扭转法	可快速比较不同复层材料结合强度的强弱	不能得出具体结合强度值,一种定性的测试方法	应用广泛
压痕法	使用方便,试样制备简单,可操作性强	压头附近应力状态复杂,对测试结果有影响	适用于复层硬度较高的复合材料界面结合强度的分析
离心力法	不需要粘接	复层厚度、材料,加速度对结合强度的影响未知	适用于单层薄覆层及形状规则的零件
超声波法	无损检测,不损坏样品	局限性较大	适用于复层较厚且附着力不大的复合材料

近年来，随着新材料的出现以及科学技术的发展，越来越多的非传统测试手段应运而生。井玉安等^[30]参照 GB/T 6396—2008 和 ASTM A 264 设计了一种操作方便、数据精度高的薄规格双金属复合板抗剪强度的测试方法及测试装置，并对薄规格双金属复合板的抗剪强度进行了测试，测试结果符合 GB/T 6396—2008；Zhang 等^[12]提出了用四点弯曲法测量薄片层状复合材料垂直于界面方向的结合强度；此外，邱博等^[31]综述了国内外研究学者对结合强度进行研究的理论模型，并对界面结合强度的有限元分析法进行了论述；刘国平等^[32]综述了铜 / 铝双金属复合材料界面结合性能提升方面的新进展。由此可见，越来越多的科研工作者们关注双金属复合材料的界面结合性能测试技术的发展并对不同复合材料界面结合性能发展现状进行综述，为开发不同双金属复合板材、线材和管材等的界面结合性能测试提供更为合理、可靠的测试方法提供理论依据。

3 结语与展望

(1) 综述了双金属复合材料界面结合性能的测

试方法，包括传统方法以及随着科技进步探索出的新方法，主要包括弯曲 / 扭转法、剥离测试法、剪切强度测试法、划痕法、压痕法等。

(2) 综合分析了每种测试方法的优缺点，并给出了适合的测试领域。

(3) 目前双金属复合材料界面结合性能的测试方法中只有剪切强度法与压痕法已有既定的测试标准，未来发展将对于其他方法的测试标准开展研究，同时为开发新的测试方法奠定基础。

参考文献：

[1] 张红安. 钢 / 铝、铜 / 铝复合材料的制备及性能研究[D]. 镇江:江苏大学,2007.

[2] 杨文武. Al/Mg/Al 复合板的制备及其界面行为与性能的研究[D]. 太原:太原理工大学,2019.

[3] 李海斌,黄庆学,周存龙,等. 热轧碳钢 / 不锈钢复合板结合界面碳钢的组织演变[J]. 材料热处理学报,2014,35(4):57-61.

[4] 李鸿娟,谭峰亮,刘宝刚,等. 基于固相轧制复合法制备的铜包钢线组织和力学性能研究[J]. 热加工工艺,2020,49(16):86-89.

[5] 于九明,方晓英,孝云祯. 铜 / 钢液固相复合界面的结合强度[J]. 材料研究学报,2000(6):661-664.

- [6] 季策. 双金属复合管固—液铸轧复合工艺及复合机理研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2017.
- [7] 陈瑞. 爆炸复合的研究进展[J]. 煤矿爆破, 2015(4):31-34.
- [8] 文小浩, 丁小芹, 韩小云, 等. 放电等离子烧结制备 M42 粉末高速钢 /45 钢双金属复合材料 [J]. 机械工程材料, 2010, 34(6): 51-53.
- [9] 章跃. 四点弯曲法评价气相沉积薄膜与基体结合强度的探索[J]. 真空, 1992(3):4-8.
- [10] 颜高升. 弯曲法表征热障涂层界面断裂行为的研究 [D]. 镇江:江苏大学, 2017.
- [11] 吴庆美, 王德庆, 高扬. 铜包钢线界面结合强度测试方法[J]. 金属功能材料, 2011, 18(6):31-34.
- [12] Zhang Jianjun, Liang Wei, Liu Yiming, et al. A novel testing approach for interfacial normal bond strength of thin laminated metallic composite plates[J]. Materials Science Engineering A, 2014, 590:314-317.
- [13] 颜学柏, 李正华, 李选明, 等. 轧制参数对钛 / 铝轧制复合板的结合强度和剥离面 SEM 形貌的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 1991(4):36-45.
- [14] 黄海涛, 王辉. 钢铝双金属复合板的轧制及其界面分析[J]. 热加工工艺, 2019, 48(11):57-61.
- [15] 李忠文. 钛—钢扩散复合界面组织与性能的研究[D]. 大连:大连交通大学, 2005.
- [16] 杨扬, 陈忠平, 李大河, 等. Monel 合金 /Cu 爆炸复合棒界面的微观组织和力学性能[J]. 焊接学报, 2008(8):53-56.
- [17] 刘少杰, 张国伟, 王明杰. 提高铜钢双金属铸件结合强度的新工艺[J]. 热加工工艺, 2015, 44(23):101-102.
- [18] 冯雪楠, 周勇, 田磊, 等. Q235B/304 双金属热轧复合卷板结合强度测试分析[J]. 焊管, 2018, 41(8):30-34.
- [19] 冯爱新, 张永康, 谢华琨, 等. 划痕试验法表征薄膜涂层界面结合强度[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2003(2):15-19.
- [20] 彭冰川. 划痕法表征薄膜材料界面结合性能[D]. 湘潭:湘潭大学, 2009.
- [21] 朱文贤, 石宗利, 王振清, 等. Ag-Cu/Ti 双金属膜结合强度及应力研究[J]. 兰州铁道学院学报, 2002(6):40-43.
- [22] 葛继平, 郑林, 王学芝, 等. 划痕法测 Ni-P 合金镀层结合力的研究[J]. 热加工工艺, 1991, 30(6):34-36.
- [23] 李龙, 周德敬. 薄复层层状复合材料界面结合的定量评价方法[J]. 中国材料进展, 2016, 35(11):863-871.
- [24] 李河清, 蔡珣, 马峰, 等. 压痕法测定薄膜(涂层)的界面结合强度[J]. 机械工程材料, 2002(4):11-13.
- [25] 孙畅, 李龙, 周德敬. 层状复合材料界面结合强度非传统评价方法[J]. 材料导报, 2017, 31(11):59-67.
- [26] James K J, Normann R A. International conference of the IEEE engineering in medicine & biology society [C]//USA: IEEE Standards Board, 1993:1563-1564.
- [27] Lian D, Suga Y, Kurihara S. An ultrasonic testing method for detecting delamination of sprayed ceramic coating[J]. Thermal Spray Technol., 1996, 5(2):128-133.
- [28] 李龙, 祝志超, 周德敬. 有限元分析在金属层状复合材料开发中的应用[J]. 南方金属, 2015(6):1-9.
- [29] 王礼营, 王贝, 张磊, 等. 爆炸复合接头防锈铝 / 防锈铝层界面结合品质的超声检测[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(6):109-111.
- [30] 井玉安, 董海雪, 孙本良, 等. 薄规格双金属复合板剪切强度的测试方法[J]. 热加工工艺, 2011, 40(12):103-106.
- [31] 邱博, 邢书明, 董琦. 颗粒增强金属基复合材料界面结合强度的表征:理论模型、有限元模拟和试验测试[J]. 材料导报, 2019, 33(5):862-870.
- [32] 刘国平, 王渠东, 蒋海燕. 铜 / 铝双金属复合材料研究新进展 [J]. 材料导报, 2020, 34(7):7115-7122. 

关于热加工工艺聘请编委的通告

为了顺应“十四五规划”这个新时期,促进热加工工艺期刊发展,热加工工艺编辑部特聘请新一届编委:2021-2025 届编委。

热加工工艺期刊由中国船舶集团主管,中国船舶集团热加工工艺研究所(十二所)和中国造船工程学会船舶材料委员会主办,创刊于 1972 年。主要报道铸造、锻压、焊接、金属材料及热处理等领域的试验研究论文。在国内外具有较大影响,是金属学及金属工艺类全国中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,常年被中国知网数据库收录。

为进一步加强与外界合作与学术交流,发挥专业技术媒体的平台作用,更好地服务于热加工工艺领域,推广交流新技术,加强科技成果向生产力转化,推动技术进步,提高行业经济效益,特聘请具有一定造诣的专家、学者和具有一定代表性的单位负责人担任本刊编委。专家应该具备高工、研究员及以上职称,学者应该具备副教授、教授及以上职称。热烈欢迎相关领域院士担任本刊编委。编委享有以下权利:颁发编委证书;优先发表论文;获赠期刊;编委成就宣传。

如您愿意担任本刊编委,请您索取并填写本刊编委申请登记表。

本刊邮箱:rjggy@vip.163.com

联系电话:029-38316274(李编辑) 029-38316271(编务李老师) 029-38316052(张主编)