



热双金属复合材料的研究现状与展望

黄念成^{1,2}, 冯波^{2*}, 冯晓伟², 李达², 陈天来³, 李国烽³, 黎小辉^{1*}, 郑开宏²

(1. 佛山科学技术学院机电工程与自动化学院, 广东 佛山 528225; 2. 广东省科学院新材料研究所/广东省金属强韧化技术与应用重点实验室, 广东 广州 510650; 3. 佛山通宝精密合金股份有限公司, 广东 佛山 528131)

摘要: 热双金属复合材料是一种利用先进复合技术,使两种及以上具有不同热膨胀系数的金属复合形成冶金结合的层状复合材料。该材料可发挥不同金属的自身性能优势,实现复合材料的性能互补,同时因其形状可随环境温度改变而调控的特性,被广泛应用于电子电器领域。随着电子科学技术飞速发展,对热双金属产品品质的要求也日益提高,总结并展望该材料在该领域的研究现状与前景意义重大。围绕电子电器领域的热双金属复合材料,综述了其制备原理、特性、组元构成、主要性能指标和制造技术。热双金属复合材料的工作原理是通过复合技术将两种及以上的金属层交替叠加并紧密结合,由于不同金属各异的热膨胀系数,当通过环境传导或自我发热方式受到热力刺激时,整个材料发生弹性弯曲变形而发生形状变化。热双金属的组元构成是影响其性能的重要因素,选择合适的金属组元可以使其具备更优异的性能。常见的组元包括钢-铝、铜-铝等,高膨胀层一般为锰铜合金,低膨胀层一般为铁镍合金。通过合理设计不同金属的层厚比例和堆叠顺序,可以调控材料的热膨胀性能和机械强度,主要性能指标包括材料的热膨胀系数、电导率和机械强度等,其中热膨胀系数决定了材料在不同温度下的形状变化程度,电导率影响了材料在电子电器中的导电性能,而机械强度则直接关系到材料的使用寿命和稳定性。制造技术是影响热双金属复合材料品质的关键因素之一,常见的制造技术包括爆炸复合、轧制复合和粉末冶金等。不同的制造技术会影响材料的结合程度、微观结构及性能稳定性,因此在选择制造技术时需要考虑到具体的应用场景和要求。最后,对热双金属复合材料未来的主要发展方向进行了展望。

关键词: 热双金属复合材料; 电子电器; 热膨胀系数; 电导率; 机械强度; 先进复合技术; 研究进展

中图分类号: TM582.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2024)02-0261-09

引文格式: 黄念成,冯波,冯晓伟,等. 热双金属复合材料的研究现状与展望[J]. 材料研究与应用,2024,18(2):261-269.

HUANG Niancheng, FENG Bo, FENG Xiaowei, et al. Research Status and Prospects of Thermal Bimetallic Materials[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(2): 261-269.

0 引言

双金属复合材料是利用先进复合技术使两种及以上不同性能的金属在界面处形成冶金结合的一种层状金属复合材料^[1-8],其可以发挥不同金属的自身性能优势,克服单一材料性能的不足,实现复合材料的性能互补^[9-14]。合理搭配不同性能的组元层,可以使双金属复合材料同时拥有多种优异性能,满足多种特定应用的需求,在石油化工、海洋工程、油气输送、航空航天、机械冶金及家用电器等领域中有着广阔的应用前景^[15-20]。在众多双金属复合材料中,有一种材料被人们称做热双金属的材料,该材料是由

两种及以上不同热膨胀系数的金属复合而成,也叫温控双金属、热敏双金属、双金属片等,其在电子电器领域中被广泛应用,从而实现温度显示、温度控制、温度补偿、程序控制、过载保护等功能^[21-26]。目前,全世界每年热双金属材料的用量都在逐步增加,据不完全统计,2022年全球热双金属用量超过 1.5×10^4 t。我国作为工业控制电器、家用电器及便携式电子产品制造大国,热双金属复合材料的用量居全球首位,占全球热双金属复合材料用量的60%以上,但面向高端应用需求的热双金属复合材料几乎全部需要从美国、日本、德国和法国等进口。

收稿日期: 2023-09-19

基金项目: 广东省科技特派员专项项目(GDKTP2021028500); 佛山市科协创新驱动助力工程项目(2021007); 广东省科协青年科技人才培养计划项目(SKXRC202301); 广东省科学院专项资金项目(2020GDASYL-20200101001)

作者简介: 黄念成,硕士研究生,研究方向为电致塑性轧制镁铝复合板。E-mail:1070684582@qq.com。

通信作者: 冯波,博士,高级工程师,研究方向为双金属复合材料。E-mail:fengbo_1989@163.com。

黎小辉,博士,特聘教授,研究方向为金属材料加工。E-mail:lixiaohui@fosu.edu.cn。

热双金属复合材料的发现可以追溯到十八世纪,已有约三百年的历史。自1956年,美国G. Durst^[28]采用室温固相复合轧制技术生产热双金属以来,该方法被许多国家相继采用并不断优化改进,使得热双金属材料的产量与品种迅速增长,材料性能也得到进一步提高^[29-31]。目前,国外生产热双金属材料的公司主要有美国铌美、日本住友、法国安普朗、德国维克德集团等,其中德国维克德集团是现有热双金属材料生产规模最大、产品种类最多的公司,其产品质量享誉全球。我国从事热双金属材料的研发始于20世纪50年代,当时国内厂家的热双金属生产水平相较国外可谓是瞠乎其后,主要体现在生产效率低下、产品质量不稳定等方面,因此较为精密的高端热双金属材料只能从国外大量进口,以满足国内市场需求^[29]。随着我国改革开放的不断深入,国内一些企业率先通过引进国外先进的热双金属材料生产线和技术,经过多年的消化、吸收及再创新,生产的热双金属材料产品种类越来越多、质量稳定性越来越高,生产规模也越来越大,生产水平位于世界前列。目前,我国生产热双金属复合材料的厂家主要有佛山通宝、温州宏丰、上海松森、温州亚大等,其中佛山通宝精密合金股份有限公司在国际上

已跻身热双金属制造前三强,以及国内电接触材料领军企业,其旗下热双金属产品的国内市场占有率为65%,主要客户包括正泰、施耐德、西门子等低压电器知名企业^[32]。本文详细介绍了热双金属材料的工作原理与特性、热双金属的组元构成及材料的主要性能指标及和制造技术,展望了热双金属材料的发展趋势。

1 热双金属的工作原理与特性

热双金属材料组元层的热膨胀系数不同,这使得其在温度变化时会发生形变。热双金属材料工作原理是通过环境传导热量或自我发热方式(一般是通电自热)获取温升,组元层间因热膨胀系数的差异导致整个材料出现弹性弯曲变形,此时材料会将热能转化为机械能。图1为热双金属材料受热前后的状态示意图^[33]。从图1可见,初始状态的热双金属是由两种不同热膨胀系数的金属A和B通过复合技术形成的,二者长度相同,假设A的热膨胀系数较大、B的热膨胀系数较小,当热双金属材料受热时,随着温度的升高A侧和B侧都将伸长,但由于A侧热膨胀系数较高,其伸长程度比B侧更大,这导致A、B两侧发生不一样的伸长形变,最终直条元件弯曲成弧形,弧形外侧为高膨胀系数的金属A。

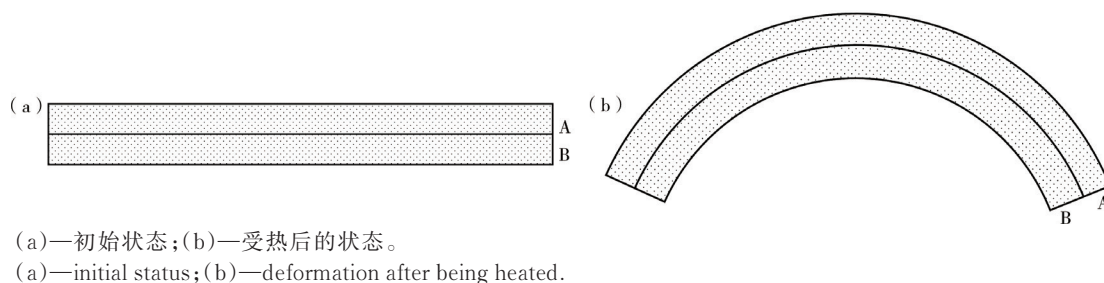


图1 热双金属材料受热前后的状态示意图^[33]

Figure 1 Initial status before it was heated and deformation after being heated of thermal bimetal

2 热双金属的组元构成

热双金属的组元主要由主动层、被动层及中间层构成,其是影响材料的性能的主要因素,选择合适的金属组合可以使得材料具有更优异的性能。

2.1 主动层

热双金属复合材料的主动层为高膨胀合金。在早些时候,因瓦合金的主动层使用黄铜合金,1934年法国科学家Krall发现了高锰合金Mn72Cu18Ni10,该合金的热膨胀系数室温下高达 $28 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,是热双金属发展史上继因瓦合金后又一里程碑的发现^[34]。主动层合金在室温至 $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ 温度范围内除应具有很高的膨胀系数、平均线膨胀系数高于 $15 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 外,还应具有在使用温度范围内不会引起

膨胀特性明显变化的相变特性,以及弹性模量与被动层相近。

2.2 被动层

热双金属复合材料的被动层为膨胀合金,也称热膨胀合金,是由元素周期表中Ni、Co、Fe等过渡族元素组成的某些合金。由于被动层合金具有铁磁性,在一定的温度范围内具有被称为因瓦效应的反常热膨胀行为,因此与高膨胀合金搭配可以获得各式各样的热双金属材料。值得一提的是,因瓦效应是1896年由法国物理学家C. E. Guialme发现的,因瓦合金也由此得名,该合金室温下的膨胀系数低至 $1.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ^[35]。这个发现为热双金属日后的发展奠定了坚实的基础,是热双金属发展史上重大的发现。

2.3 中间层

热双金属复合材料的中间层位于主动层与被动层之间,是第3个组元层。一般来说,它中间层只作为分流层出现在电阻型热双金属中,起到平衡材料

整体电阻率的作用。中间层材料大体为纯镍、纯铜等。

常用热双金属主动层、被动层及中间层的主要合金化学成分及性能列于表1和表2^[36]。

表1 常用热双金属组元合金的化学成分
Table 1 Chemical elements of common thermal bimetal components

合金牌号	化学成分 w/%										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Zn	Co	Fe
Mn75Ni15Cu10	≤0.05	余量	≤0.50	≤0.030	≤0.020	—	14.0—16.0	9.0—11.0	—	—	≤0.80
Ni20Mn6	≤0.05	5.5~6.5	≤0.30	≤0.020	≤0.020	—	19.0—21.0	—	—	—	余量
Ni22Cr3	0.25—0.35	≤0.60	≤0.30	≤0.025	≤0.025	2.0—4.0	21.0—23.0	—	—	—	余量
Cu62Zn38	—	—	—	—	≤0.010	—	—	60.5—63.5	余量	—	≤0.15
Ni36	≤0.05	≤0.060	≤0.30	≤0.020	≤0.020	≤0.5	35.0—37.0	—	—	≤0.50	余量
Ni50	≤0.05	≤0.060	≤0.30	≤0.020	≤0.020	≤0.5	49.0—51.0	—	—	≤0.50	余量
Ni42	≤0.05	≤0.060	≤0.30	≤0.020	≤0.020	≤0.5	41.0—43.0	—	—	≤0.50	余量
Cu	—	—	—	≤0.010	≤0.040	—	—	≥99.9	≤0.005	—	≤0.005
Ni	≤0.15	—	—	≤0.015	—	—	≥99.3	≤0.15	—	—	≤0.15

表2 常用热双金属组元合金的性能
Table 2 Mechanical performances of common thermal bimetal components

组元	合金牌号	平均线热膨胀系数 (25—100℃)/10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹	平均线热膨胀系数 (25—200℃)/10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹	电阻率/ (μΩ·cm)	弹性模量/ GPa	密度/ (g·cm ⁻³)	硬度 (HV)
主动层	Mn75Ni15Cu10	≥25.2	≥26.2	160—180	120	7.26	200—260
	Ni20Mn6	≥18.0	≥19.0	74.0—82.0	167	8.10	235—295
	Ni22Cr3	≥17.8	≥18.8	74.0—82.0	170	8.12	270—340
	Cu62Zn38	≥18.0	≥18.5	6.8—7.4	108	8.9	185—230
被动层	Ni36	≤1.9	≤2.7	77.0—84.0	147	8.12	200—255
	Ni50	≤10.8	≤10.8	77.0—86.0	150	8.20	200—255
	Ni42	≤6.0	≤5.8	59.0—67.0	147	8.14	200—255
中间层	Cu	16.5—17.9	16.8—18.2	1.7—1.9	117—138	8.92	—
	Ni	12.7—13.8	12.9—14.0	8.1—8.8	207	8.90	—

3 热双金属的主要性能指标

3.1 线性温度范围

热双金属复合材料的弯曲位移与温度变化曲线整体不呈线性相关,但在某特定温度范围内二者的关系基本是线性的。实际弯曲位移与依据温曲率计算得出的位移结果相差小于5%,这个温度范围就被称作线性温度范围^[37]。

3.2 使用温度范围

使用温度范围包含了线性温度范围,该温度范围的上限一般低于材料的居里温度^[37]。在使用温度范围内,热双金属随温度的变化而发生变形,该变形为弹性变形,使用性能保持不变。

3.3 热敏感性指标

3.3.1 温曲率

温曲率指的是单位厚度的热双金属片,在每变化单位温度时其纵向中心线的曲率变化。温曲率是热双金属的一个关键指标,其测量方法根据被测材料厚度的不同有所差异。当被测热双金属板材的厚度不足0.3 mm时,采用平螺旋法测量温曲率^[37],剩余情况均采用简支梁法(见图2)^[38]。温曲率 F 计算

$$F = \frac{8\delta}{t_2 - t_1} \times \left[\frac{D_2}{L^2 + 4D_2\delta + 4D_2^2} - \frac{D_1}{L^2 + 4D_1\delta + 4D_1^2} \right] \quad (1)$$

其中, δ 为试样厚度(mm),

D_1 、 D_2 为温度 t_1 、 t_2 时的试样两支点间中点位置的垂直位移(mm), L 为试样测量长度(两支点间的长度)(mm), t_1 、 t_2 分别为测量初始及终了温度($^{\circ}\text{C}$)。

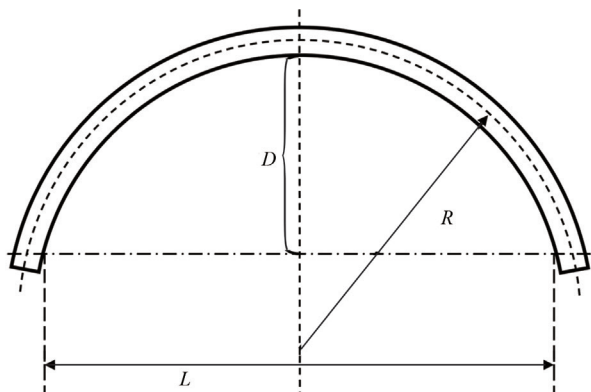


图2 温曲率测量简支梁法示意图

Figure 2 Measurement process of Flexivity

3.3.2 比弯曲

比弯曲(K)是描述尺寸为单位厚度和单位长度的热双金属片,其一端固定,当温度变化 1°C 时自由端的挠度变化的变化量。采用悬臂梁法测量比弯曲,其测量示意图如图3所示^[38]。

温曲率与比弯曲都是衡量热双金属热敏感性的指标,但比弯曲与温曲率对比有明显的缺点。在比弯曲测试过程中,由于材料受约束力与约束方式的影响较大,导致测量误差较大,因此数据的复现性较差。目前,世界上大部分国家与地区的标准、行业标准及公司标准均采用温曲率作为热双金属的热敏感性考核指标,而仅将比弯曲视为参考指标^[37]。

表3 热双金属带材的性能参考值

Table 3 Mechanical performance reference values of thermal bimetal

牌号	热敏性能			电阻性能		其他性能参考值			
	温曲率 F 标称值 (20—130 $^{\circ}\text{C}$)/ 10^{-6}°C	允许偏差 %		电阻率 ρ 标称值 (20 $\pm 5^{\circ}\text{C}$)/ ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	允许偏差 %	比弯曲 K 标称值 (20—130 $^{\circ}\text{C}$)/ 10^{-6}°C	线性温度/ $^{\circ}\text{C}$	允许使用温度/ $^{\circ}\text{C}$	弹性模量 E (20 $\pm 5^{\circ}\text{C}$)/ GPa
		I级	II级						
5J39110	39.1	± 5	± 7	113	± 5	20.8	-20—150	-70—200	≥ 113
5J28140	28.0	± 5	± 7	140	± 5	14.5	-20—150	-70—200	≥ 113
5J28120	28.5	± 5	± 7	125	± 5	15.3	-20—200	-70—250	≥ 122
5J2780	27.0	± 5	± 7	80.0	± 5	14.3	-20—180	-70—350	≥ 147
5J2580	25.2	± 5	± 7	80.0	± 5	13.8	-20—100	-70—350	≥ 147
5J2880	28.5	± 5	± 7	78.0	± 5	15.1	-20—180	-70—350	≥ 147
5J2613	26.8	± 5	± 7	13.0	± 10	14.6	-20—180	-70—250	≥ 98
5J2616	26.9	± 5	± 7	16.0	± 10	14.3	-20—180	-70—250	≥ 98
5J1817	18.8	± 8	± 10	17.0	± 10	10.0	-20—180	-70—400	≥ 152

4 热双金属的制造技术

目前,热双金属的复合方法有很多种,其中主要

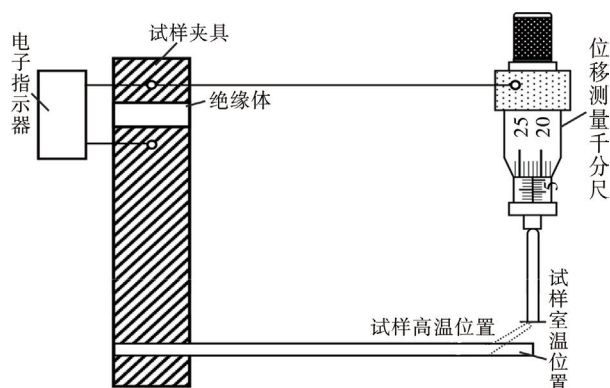


图3 悬臂梁法示意图^[38]

Figure 3 Cantilever beam method measuring Specific Deflection

3.4 电阻率

电阻率是衡量热双金属产品特性的一个重要指标。当热双金属通电时,焦耳效应会使得材料本身发热,产生的热量与电阻率成正比,而热双金属恰好是热敏感材料,这将直接影响材料的物理使用特性,从而影响其热膨胀动作特性。其次,电阻率也会影响电流的大小。由此可知,电阻率对于热双金属的重要程度不言而喻^[37]。

3.5 弹性模量

弹性模量是指在热双金属弹性极限内,其应力与相应的应变之比,是热双金属的一个重要指标之一,在计算热双金属的热力时需要用到弹性模量。弹性模量由材料的成分和变形量所决定^[37],表3为常用热双金属性能的参考值汇总^[36]。

分为3大类,即固-固相复合法、固-液相复合法(熔合法)、液-液相复合法(双浇法)。本文重点介绍熔合法、

双浇法及固-固相复合法中的爆炸法、板式热轧法、高温固相复合和可控气氛热复合的原理及优缺点。

4.1 固-液复合法(熔合法)

熔合法是通过利用两组元间的熔点差异,将低熔点合金加热至熔融状态,使其熔焊在高熔点合金上的一种复合方法,此法仅适用于两组合金熔点差异悬殊的热双金属^[39]。由于低熔点合金表面易形成许多小缩孔,需要对其表面进行再加工,这样会导致成材率低及成本比较高,使得该方法的应用受到了诸多限制^[40]。

4.2 液-液复合法(双浇法)

双浇法是在熔合法的基础上发展而成的,也叫双流铸造法。双浇法也是利用组元合金熔点的差异,采用两次浇注完成金属间的结合。首先在特殊

的模具内浇注低熔点金属,待其凝固后再提高模具内的抽板,形成浇注空间,完成高熔点金属的浇注,最终形成铸态双金属^[41]。双浇法因制备工艺复杂,以及材料性能的一致性、稳定性差,极大地限制了其推广应用^[40]。

4.3 固-固复合法

4.3.1 爆炸法

爆炸法的原理是利用炸药爆炸瞬时超高压和超高速冲击能,使组元层产生剧烈的塑性变形,从而使待结合面呈波浪状,扩大新鲜的结合面积。爆炸瞬间会产生极大压力,导致高压摩擦,释放的大量热能使得材料周边迅速升温,从而降低塑性变形抗力,最终形成金属层间的良好固态冶金结合界面^[27,42-44]。图4为爆炸复合装置示意图^[45]。

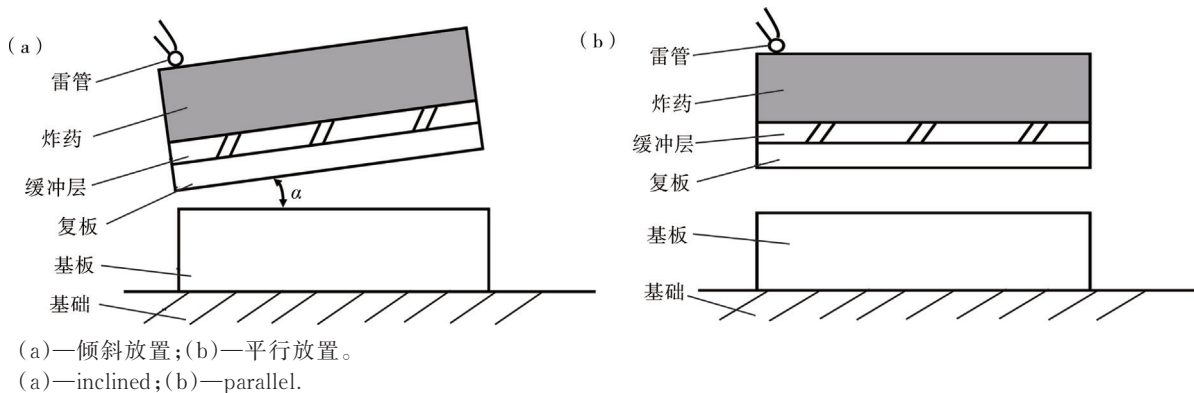


图4 爆炸复合装置示意图

Figure 4 Device of explosive welding

爆炸复合与其他常用的金属复合方法相比具有显著的优势,该方法适用于热膨胀系数、熔点、强度等物理化学性能差异巨大的金属间进行结合,并且设备简单、成本花费小,复合板的结合界面也具有良好结合强度^[46]。但是,爆炸复合也存在一些明显的缺点,如爆炸现场污染环境、爆炸大多在露天进行、机械化程度低、劳动条件差、不适宜连续生产、无法精确控制复合过程中的参数等,这极大地限制了其规模化应用^[40]。

4.3.2 板式热轧法

板式热轧法,首先将待复合的各组元板材先进行表面处理,去除表面的氧化物及其他污渍,待露出新鲜的金属表面后叠放组元板,然后焊接板材边侧使各组元板的相对位置固定,随后放入箱炉内加热几分钟到几个小时不等,最后取出板材放入热轧机中轧制变形而实现复合^[47]。板式热轧法流程简单、设备要求不高、能耗低,适于生产的热双金属品种较多。复合板坯在轧制过程中,炉中温度必定下降,随

着轧制时间越长温度下降程度越大,这就使得材料的塑性成型能力极不稳定,最终使复合板成形效果无法达到预期^[27,48]。

4.3.3 室温固相复合

室温固相复合也叫做连续冷复合,顾名思义是在室温下进行轧制的,仅靠轧辊间的巨大压力将组元板复合在一起。实际上在轧制过程中,轧辊给予材料的巨大压力会使得界面附近释放大量的热能,导致与轧辊接触的材料周围温度急剧升高。室温固相复合流程一般分为3步^[27]:(1)表面处理,将原始板坯的表面打磨干净,去除污渍、油渍和氧化物等,使材料表面露出新鲜的待结合界面,同样也增大待结合界面面积,使得下一步复合能更易实现冶金结合;(2)轧制复合,将原始板坯平稳放入轧辊,大压下量使得板坯牢牢复合在一起;(3)扩散退火,强化结合强度,将材料放入退火炉中保温,根据材料种类不同设定不同的退火温度和时间,而后出炉使材料自然冷却^[49]。目前,在世界范围内,室温固相复合

依旧是生产热双金属最为广泛的工艺,该法能制造出厚度均匀、性能稳定的热双金属^[50-51]。

4.3.4 可控气氛热复合

可控气氛热复合是在室温固相复合的基础上发展而来,该法比室温固相复合所生产的产品性能更为优越^[52]。可控气氛热复合的流程与室温固相复合大致相同,不同的是在轧制前让原始板坯进入保护气氛炉中通入特殊气体加热,以改善材料塑性成形能力,同时也防止待结合界面氧化^[53-55]。图5为可控气氛热复合流程示意图^[56]。

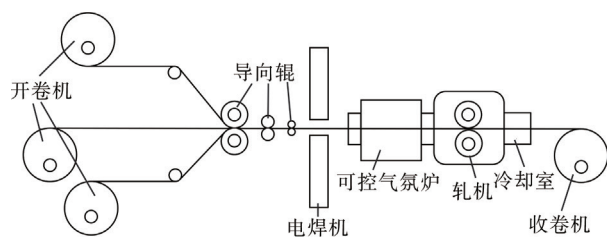


图5 可控气氛热复合装置示意图

Figure 5 Device of controlled atmosphere hot bonding

可控气氛热复合法与室温固相复合法相比具有很多优点,如材料复合强度高、物理性能稳定、尺寸精度高、不同组元的加热温度不同、可生产出多品种热双金属材料。(1)复合强度高。可控气氛热复合后的材料即使不经过扩散退火,其界面的结合强度也已远优于室温固相复合扩散退火后的材料^[27]。如可控气氛热复合工艺生产的5J2780合金的结合强度远高于室温固相复合的5J2780合金,虽然室温固相复合的5J2780合金经扩散退火处理后结合强度逐步升高,但依然达不到可控气氛热复合产品的水平(见图6)^[56]。(2)物理性能稳定。比弯曲和电阻率为热双金属的两个重要物理性能,这两个参数稳定性的好坏直接决定着低压电器产品的质量,如果这两个参数的稳定性差势必给电器生产厂家的校验工作带来困扰,甚至影响元件的动作精度而导致元件产生误动作。决定热双金属比弯曲和电阻率的主要因素为原材料和热双金属的厚度比,因此应尽量保持原材料的性能及热双金属厚度比的稳定。对于复合过程而言,由于组元层屈服强度存在差值及加工硬化现象存在,往往会产生变形不稳定的现象,导致结合面起伏,复合时变形率越大结合面起伏就越大,热双金属的厚度比就越不稳定。室温固相复合时结合面的变形率高达80%,而可控气氛热复合时结合面要平缓得多,变形率最高只有40%,这就是可控气氛热复合产品物理性能较稳定的一个重要原因。(3)尺寸精度高。热双金属材料的尺寸公差,对元件

的性能有极其重要的影响。对于悬臂梁形元件而言,厚度公差直接影响着元件的单位温度挠度,宽度公差直接影响到有电流通过元件的温升。如佛山通宝精密合金股份有限公司的在可控气氛热复合轧机上装有自动厚度控制系统,在精轧机上装有先进的轧机管理系统,使生产的热双金属产品的厚度公差小于美国ASTM标准,同时该生产线还配有高精度的分条机和热双金属的精整设备,使热双金属的宽度公差横向弯曲、纵向弯曲及耐蚀性等指标得以保证。(4)不同组元单独选择不同的加热温度。由于复合板的各组元不一样,因此他们的最佳变形温度也不一样,从而使热加工温度也存在显著差异,这就使得原始板坯在轧制过程中的变形性能达不到预期效果^[27]。一般的热加工技术很难解决上述问题,而可控气氛热复合采用了特殊的独立加热方式,使得各组元均处于自身的最佳变形温度,这也变相地减少了能耗。此外,在轧制复合前的保护气氛炉中通入惰性气体或还原性气体加热组元,降低组元氧化,使复合界面更好地结合,大幅度降低轧制压力^[27]。(5)热双金属材料品种多样化。可控气氛热复合能够对热双金属复合组元进行独立加热,这使得采用室温固相复合无法生产的一些热双金属产品成为可能,丰富了现有的热双金属产品种类。

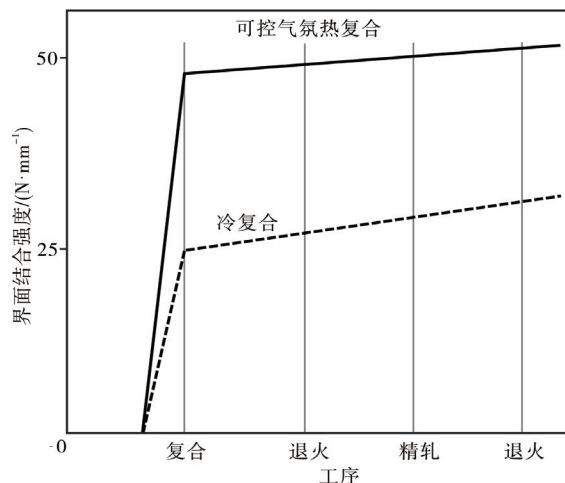


图6 冷复合与可控气氛热复合生产5J2780热双金属结合强度对比

Figure 6 5J2780 bonding strength comparison between one produced by cold rolling and one by controlled atmosphere hot bonding

5 结语

热双金属因价格低廉、结构简单、安全可靠等优点,被广泛地应用于各种热敏元件中,其在温控装置、电子电器、阀门开关等领域中具有不可替代的作用。热双金属历经百年发展,产品的基本性能和生

产工艺基本成熟,产品品种和性能基本能满足市场需求。随着新一代信息技术的快速发展,电子元器件逐步向便携化、集成模块化、多功能化、智能化等方向迈进,这也对体积小、动作灵敏、控温精确、重复性好、高精密的超薄型热双金属材料提出了更高的性能需求。

(1)目前,市场对超薄热双金属材料需求量大,而国产材料由于纯净度差、非金属夹杂多、界面结合弱、板形及尺寸精度控制技术落后、产品性能一致性和稳定性差,难以满足电子电器行业高端产品对超薄热双金属材料的迫切需求。因此,如何进一步提升超薄型热双金属的板形/尺寸精度及性能可靠性,是未来热双金属研究的主要方向之一。

(2)随着科学技术和电子电器行业的高速发展,热双金属的服役条件日益苛刻,不仅要求材料具有更高的敏感性,还要求具有更高的工作温度范围及满足恶劣环境条件(如耐蚀、耐冲刷、耐磨、抗震等)的需求。因此,开展高敏感/耐高温/耐腐蚀等高性能热双金属的研发也是未来热双金属的主要方向之一。

参考文献:

- [1] ZHOU L, ZHAO J W, JIA, F H, et al. Numerical and experimental investigation on the forming behavior of stainless/carbon steel bimetal composite [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101: 1075-1083.
- [2] FENG B, XIN Y C, GUO F L, et al. Compressive mechanical behavior of Al/Mg composite rods with different types of Al sleeve [J]. Acta Materialia, 2016, 120: 379-390.
- [3] FENG B, XIN Y C, HONG R, et al. The effect of architecture on the mechanical properties of Mg-3Al-1Zn rods containing hard Al alloy cores [J]. Scripta Materialia, 2015, 98: 56-59.
- [4] FENG B, XIN Y C, SUN Z, et al. On the rule of mixtures for bimetal composites [J]. Materials Science Engineering A, 2017, 704: 173-180.
- [5] FENG B, XIN Y C, YU H H, et al. Mechanical behavior of a Mg/Al composite rod containing a soft Mg sleeve and an ultra hard Al core [J]. Materials Science Engineering A, 2016, 675: 204-211.
- [6] XIN Y C, HONG R, FENG B, et al. Fabrication of Mg/Al multilayer plates using an accumulative extrusion bonding process [J]. Materials Science Engineering A, 2015, 640: 210-216.
- [7] WU Y, FENG B, XIN Y C, et al. Microstructure and mechanical behavior of a MgAZ31/Al7050 laminate composite fabricated by extrusion [J]. Materials Science Engineering A, 2015, 640: 454-459.
- [8] FENG X W, LI J X, ZHENG Z B, et al. Mechanical properties and fracture mechanism of Fe/Cu composite sheets with Al interlayer after annealing treatment [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2023, 30: 1888-1895.
- [9] AI X L, DANG Y H, JIANG X Q, et al. The effect of Ti particles addition on the microstructure and mechanical behavior of MgAZ31/Al6082 composite sheets [J]. Materials, 2023, 16: 2844-2855.
- [10] DANG Y H, LIU S L, AI X L, et al. Microstructure and mechanical behavior of Mg-based bimetal plates with high formability sleeve by co-extrusion [J/OL]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2023. <https://doi.org/10.1007/s40195-023-01567-y>.
- [11] FENG B, SUN Z, WU Y, et al. Microstructure and mechanical behavior of Mg-ZK60/Al-1100 composite plates fabricated by co-extrusion [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 842: 155676-155685.
- [12] GHOLAMI M D, SALAMAT M, HASHEMI R. Study of mechanical properties and wear resistance of Al-1050/brass (70/30)/Al-1050 composite sheets fabricated by the accumulative roll bonding process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 71: 407-416.
- [13] ZHAO J H, SHANG-GUAN J J, GU C, et al. Microstructures and mechanical properties of TC4/AZ91D bimetal prepared by solid-liquid compound casting combined with Zn/Al composite interlayer [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(4): 1144-1158.
- [14] 孟飞, 果世驹, 杨霞, 等. 粉末冶金制备添加20%铜的316L不锈钢/铜复合材料工艺研究[J]. 粉末冶金工业, 2006, 16(4): 1-4.
- [15] 吴坪安, 曹占义, 包晓军, 等. 铜/锌复合材料阻尼性能研究[J]. 材料工程, 2006, z1: 360-365.
- [16] 宋克兴, 张亚, 张彦敏, 等. 压力条件下固-液复合法制备铜/锌复合材料的研究[J]. 材料导报, 2014, 28(10): 16-19.
- [17] 朱映玉, 陈剑明, 刘宏萱. 铜包钢双金属线的应用及其制备工艺研究进展[J]. 材料研究与应用, 2015, 9(4): 216-221.
- [18] 李秀青, 宋延沛. 双金属复合轧辊铸造工艺的研究现状与展望[J]. 材料研究与应用, 2010, 4(3): 164-168.
- [19] 付晓鹏, 梁伟, 李线绒, 等. 镁/铝异种材料连接界面的显微组织与结合强度研究[J]. 材料研究与应用, 2009(1): 23-27.
- [20] 黎小辉, 孙炜翔, 李晓沛, 等. 镁铝合金层状复合材料研究现状与制备技术[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(4): 636-642.

- [21] 张常龙, 彭元虎, 郇维亮, 等. 热双金属盘螺旋光指针温度计设计[J]. 实验技术与管理, 2015, 32(11): 102-104.
- [22] 骆宇锋, 高应俊, 赵中华, 等. 环状约束光纤热双金属片 F-P 腔温度传感器[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(2): 98-100.
- [23] 许文良, 何为龙. 低压电器热过载保护及热双金属片仿真设计[J]. 电器与能效管理技术, 2021(6): 41-46.
- [24] 王铁冬, 隋强. 利用热双金属片对矩形波导谐振腔温度补偿方法的研究[J]. 北京广播学院学报(自然科学版), 2005, 12(3): 17-22.
- [25] MAURELLI L, MAZZOLENI M, PREVIDI F. Modeling and simulation of bimetallic strips in industrial circuit breakers [J]. IFAC-Papers OnLine, 2021, 54(7): 803-808.
- [26] ZELENKA M. Calculation and measurement of thermostatic bimetal deflection in molded case circuit breaker [C]. Yinchuan:EEICT, 2016: 467-471.
- [27] 徐卓辉. 热双金属的先进制造技术及发展方向[J]. 电工材料, 2009(2): 35-40.
- [28] DURST G. A new development in metal cladding [J]. The Journal of The Minerals, Metals Materials Society (TMS), 1956(8): 328-333.
- [29] 彭伟锋, 秦智, 张静, 等. 热双金属材料的研究进展[J]. 金属材料研究, 2017, 43(1): 42-52.
- [30] KUO A Y. Thermal stresses at the edge of a bimetallic thermostat [J]. Journal of Applied Mechanics, 1989, 56(3): 585-589.
- [31] CHANG F V. Thermal contact stresses of bi-metal strip thermostat [J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 1983(4): 363-376.
- [32] 孔德泽. 通宝公司发展战略的实施方案研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [33] 李晓丽. 热双金属在电器产品中的设计应用[J]. 电器工业, 2011(3): 72-76.
- [34] 蔡平海. 热双金属综述[J]. 上海钢研, 1991(5): 1-19.
- [35] 李青禄, 胡笛川. 因瓦合金的特性及应用前景[J]. 机械管理开发, 2007(6): 34-35.
- [36] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 4461-2020 热双金属带材[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [37] 霍志文. 双金属在低压电器的设计应用及常见问题分析[J]. 电工材料, 2009, (1): 31-38.
- [38] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 8364-2008 热双金属热弯曲试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [39] 魏正明, 陈兰. 用中频炉重熔熔合法生产锰铝合金[J]. 中国锰业, 2002, 20(4): 40-42.
- [40] 朱永伟, 谢刚朝. 层压金属复合材料的加工技术[J]. 矿业工程, 1998, 18(2): 70-74.
- [41] 李继文, 张国赏, 魏世忠, 等. 双金属液-液复合耐磨板锤的工艺研究[J]. 铸造, 2010, 59(3): 300-303.
- [42] 李星昆, 何建萍. 复合板爆炸焊工艺研究现状及展望[J]. 轻工机械, 2021, 39(4): 1-4.
- [43] MALAKHOV A, SAIKOV I, DENISOV I. Brass/Invar bimetal by explosive welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114: 357-364.
- [44] SAIKOV I V, MALAKHOV A Y, SAIKOVA G R, et al. Influence of explosive welding parameters on the structure of interface in brass-invar thermobimetal [J]. Inorganic Materials: Applied Research, 2020, 11: 448-452.
- [45] 韩小敏, 王少刚, 黄燕. 金属爆炸焊的研究现状及发展趋势[J]. 电焊机, 2016, 46(4): 112-117.
- [46] KUMAR P, KUMAR S G, SARAVANAN S, et al. Significance of the interlayer in explosive welding of similar and dissimilar materials: Review [J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2023, 59(3): 253-278.
- [47] 郭俊俊, 石振基. 热轧法对钢/铝板界面组织及力学性能影响的研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(17): 26-30.
- [48] 张雪. 热双金属复合工艺及其发展趋势[J]. 西安邮电学院学报, 1999, 4(2): 67-70.
- [49] 张静, 谢东辉, 彭伟锋, 等. 室温固相复合热双金属的性能及界面特性[J]. 金属材料研究, 2022, 48(3): 28-36.
- [50] 田广民, 李选明, 赵永庆, 等. 层状金属复合材料加工技术研究现状[J]. 中国材料进展, 2013, 32(11): 696-701.
- [51] 于朝清, 易立, 徐永红, 等. 高精度温控双金属及其制造技术研究[J]. 电工材料, 2013(2): 44-48.
- [52] 王岸民. 层状金属可控气氛保护热复合技术及设备研究[J]. 上海金属, 2007, 29(6): 42-46.
- [53] 徐卓辉. 特殊型热双金属材料的制造与设计[J]. 电工材料, 2003(4): 29-34.
- [54] 董运涛, 张家毓, 李选明. 钛/钢双金属的可控气氛热复合工艺初探[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(S2): 141-144.
- [55] 徐卓辉, 唐国翌. 铝/镍层状复合金属的工艺制备技术研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(2): 296-300.
- [56] 王海平, 王乃千. 热双金属生产的新工艺-可控气氛热复合[J]. 低压电器, 1996(5): 54-58.

Research Status and Prospects of Thermal Bimetallic Materials

HUANG Niancheng^{1,2}, FENG Bo^{2*}, FENG Xiaowei², LI Da², CHEN Tianlai³, LI Guofeng³, LI Xiaohui^{1*},
ZHENG Kaihong²

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528225, China; 2. Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences/ Guangdong Provincial Key Laboratory of Metal Toughening Technology and Application, Guangzhou 510650, China; 3. Foshan Tongbao Electrical Precision Alloy Co., Ltd., Foshan 528131, China)

Abstract: Thermal bimetallic composite material is a material formed by using advanced composite technology to combine two or more metals with different thermal expansion. This composite material combines the physical properties of different metals and exhibits a characteristic of changing shape with temperature variation, hence it finds extensive applications in the field of electronics and electronic appliances. With the rapid development of science and technology, the demand for the quality of thermal bimetallic products is increasing, making research and development in this field of significant importance. This paper reviews the principles, characteristics, compositions, main performance indicators and manufacturing technologies of thermal bimetallic materials. Firstly, the principles and characteristics of thermal bimetallic materials are at the core of research. These materials are formed by alternating layers of two or more metals, tightly bonded through composite technology. Due to the different coefficients of thermal expansion of various metals, the material undergoes shape changes when subjected to thermal stimuli. Secondly, the composition of thermal bimetallics is an important factor affecting their performance. Choosing the appropriate metal combination can result in superior performance of composite materials. Common compositions include steel-aluminum, copper-aluminum, etc. By designing the thickness ratio and stacking sequence of different metals reasonably, the thermal expansion performance and mechanical strength of the material can be controlled. The main performance indicators include the coefficient of thermal expansion, electrical conductivity, mechanical strength, etc. The coefficient of thermal expansion determines the extent of shape change of the material with temperature variation, electrical conductivity affects the electrical performance of the material in electronic devices, and mechanical strength directly relates to the material's lifespan and stability. Manufacturing technology is one of the key factors affecting the quality of thermal bimetallic composite materials. Common manufacturing techniques include explosive bonding, roll bonding, powder metallurgy, etc. Different manufacturing techniques affect the degree of material bonding, microstructure, and performance stability, thus specific application scenarios and requirements need to be considered when choosing manufacturing techniques. Finally, this paper discusses the main future development directions of thermal bimetallics.

Keywords: thermal bimetal; manufacturing technology; development trends; electronic appliances; expansion coefficient; advanced composite technology; electrical conductivity; research progress

(学术编辑:孙文)