

PREPARATION TECHNOLOGY OF COPPER
CLAD ALUMINUM COMPOSITE

铜包铝复合材料制备工艺

骆俊廷 徐 岩 编著



 燕山大学出版社
YANSHAN UNIVERSITY PRESS



作者简介 |

骆俊廷，1976年生，河北丰润人，毕业于哈尔滨工业大学，博士学位，现为燕山大学教授，博士生导师。主要研究方向为材料加工技术及装备。主持国家自然科学基金面上项目、河北省自然科学基金重点项目、企业横向课题等科研项目30余项。在国内外重要学术刊物发表论文100余篇，其中SCI检索60篇。获得河北省技术发明一等奖1项，授权发明专利60项，出版教材及专著5部。



燕山大学出版社官方微信

网址: <http://press.yzu.edu.cn/>

地址: 河北省秦皇岛市河北大街西段 438 号

投稿邮箱: yandapress@163.com

联系电话: 0335-8387718

铜包铝复合材料密度小、成本低、节约铜资源，同时具有良好的导电性能，是一种高科技的节铜型国家重点推广产品，其广泛应用于自动化、航空航天、国防、高低压电器、建筑，以及冶金行业。国内外对其研究的重点是制备方法和工艺技术，对双金属结合理论及其材料组织和性能的研究相对薄弱，而这关乎制备方法和工艺技术的正确应用，并直接与产品性能的提高和推广应用紧密相连。因此，本书进一步对其进行深入研究和理论探讨，不仅有着重要的理论价值，而且对于指导生产实际和提高产品质量有着重要的实际意义。



铜包铝复合材料制备工艺

骆俊廷 徐 岩 编著

 燕山大学出版社

· 秦皇岛 ·

图书在版编目(CIP)数据

铜包铝复合材料制备工艺/骆俊廷,徐岩编著.—秦皇岛:燕山大学出版社,2021.7
ISBN 978-7-5761-0207-9

I. ①铜… II. ①骆… ②徐… III. ①铜基复合材料—铝基复合材料—制备—研究
IV. ①TB333.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 117562 号

铜包铝复合材料制备工艺

骆俊廷 徐 岩 编著

出版人:陈 玉

责任编辑:孙志强

封面设计:方志强

出版发行: 燕山大学出版社
YANSHAN UNIVERSITY PRESS

地 址:河北省秦皇岛市河北大街西段 438 号

邮政编码:066004

电 话:0335-8387555

印 刷:中国标准出版社秦皇岛印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:700 mm×1000 mm 1/16 印 张:12.25 字 数:208 千字

版 次:2021 年 7 月第 1 版 印 次:2021 年 7 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5761-0207-9

定 价:49.00 元

版权所有 侵权必究

如发生印刷、装订质量问题,读者可与出版社联系调换

联系电话:0335-8387718

前 言

铜包铝复合材料 20 世纪 30 年代起源于德国,随后在美、英、法等国得到广泛的研究和推广。铜包铝复合材料密度小、成本低、节约铜资源,同时具有良好的导电性能,是一种高科技的节铜型国家重点推广产品。铜包铝复合材料广泛应用于自动化、冶金、航空航天、国防、高低压电器、建筑及冶金等行业,主要应用产品包括高频信号传输电缆、开关柜、控制柜、变压器、保险开关、真空开关、中继系统、电机控制中心、轨道供电系统、电极校正线圈、电抗器等绕组、铁路牵引设备、高中低压配电柜、发电机组和变电站、各种铜/铝过渡接头、高低压配电柜导电排、高低压母线、汇流排、触滑线等。

本书第 1 章对铜/铝双金属复合材料进行了介绍,第 2 章介绍了铜包铝复合材料的制备方法,第 3 章和第 4 章详细地介绍了作者近年来研究的两种铜包铝复合材料的制备工艺,其中第 3 章重点介绍了铜包铝复合材料铸造-冷挤压工艺,第 4 章介绍了铜包铝复合材料的铸造-轧制工艺。

本书内容主要取材于先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室、燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室、塑性成形工程系的科研成果以及作者所指导的几位研究生的学位论文。在此,特向硕士研究生徐岩、赵双敬、李建勇等在完成学位论文工作中的创造性贡献致以谢意,同时对博士研究生郝增亮、硕士研究生李建勇在本书的撰写编辑过程

中所作出的贡献表示感谢。本书第3章和第4章的绝大部分内容主要为作者多年科研成果的凝练,同时书中还大量引用了一些国内外学者的研究成果,在此也致以谢意。

本书部分章节内容已经授权中国发明专利:一种铜包铝线成形工艺(专利号:ZL.200810054748.4)。本书在编写过程中也得到了燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室和先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室的大力支持,在此表示感谢。

铜包铝复合材料目前仍处于发展之中,一些概念、理论、技术还在不断地更新,加之作者水平有限,不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 铜铝双金属复合材料概述	1
1.1 双金属复合材料	1
1.1.1 现代工业技术对金属材料的要求	1
1.1.2 复合材料的定义和分类	1
1.2 双金属材料复合机理	4
1.2.1 结合机理	4
1.2.2 结合机制	5
1.3 铜铝双金属复合材料	6
1.3.1 铜包铝复合线材及其特性	6
1.3.2 铜铝复合接头材料及其特性	7
1.3.3 铜包铝复合板材及其特性	8
1.4 铜铝双金属复合材料的发展	10
1.5 铜包铝复合材料的应用	11
1.5.1 铝包铝线在射频同轴电缆中的应用	11
1.5.2 铜包铝线在汽车布线中的应用	13
1.5.3 铜包铝线电力电缆的应用	14
第 2 章 铜包铝复合材料的制备方法	15
2.1 引言	15
2.2 爆炸复合法	15
2.2.1 爆炸复合法工艺分析	15
2.2.2 爆炸复合法工艺过程	17
2.3 轧制复合法	18
2.3.1 轧制复合法工艺特点	19
2.3.2 轧制复合法实例分析	19
2.4 爆炸-轧制复合法	22
2.4.1 爆炸-轧制复合法工艺特点	22
2.4.2 爆炸-轧制复合法实例分析	23

2.5	连续挤压法	25
2.5.1	连续挤压法工艺特点	26
2.5.2	连续挤压法实例分析	27
2.6	包覆焊接法	31
2.6.1	包覆焊接法工艺特点	32
2.6.2	包覆焊接法实例分析	33
2.7	挤压拉拔-轧制复合法	35
2.8	焊接法	35
2.8.1	扩散焊接法工艺特点	36
2.8.2	搅拌摩擦焊工艺特点	37
2.8.3	磁脉冲焊接工艺特点	38
2.9	反向凝固法	40
2.9.1	反向凝固法工艺特点	40
2.9.2	反向凝固法实例分析	41
2.10	铸轧复合法	45
2.10.1	铸轧复合法工艺特点	45
2.10.2	铸轧复合法实例分析	45
2.11	浇铸复合法	50
2.11.1	浇铸复合法工艺特点	50
2.11.2	浇铸复合法实例分析	50
2.12	电磁连铸法	53
2.12.1	电磁连铸法工艺特点	53
2.12.2	电磁连铸法实例分析	54
2.12.3	铜坯电磁连铸技术分析	55
2.13	喷射沉积复合技术	56
2.13.1	喷射沉积复合技术工艺特点	57
2.13.2	喷射沉积复合技术实例分析	58
2.14	双流铸造法	62
2.15	水平连铸法	65
2.15.1	水平连铸法工艺特点	65
2.15.2	水平连铸法实例一分析	66

2.15.3 水平连铸法实例二分析	70
第3章 铜包铝复合材料铸造-冷挤压工艺	77
3.1 引言	77
3.2 铜包铝复合线材铸造-冷挤压生产工艺	77
3.2.1 铸造-冷挤压成形工艺的提出	77
3.2.2 拉拔与挤压成形工艺中的坯料受力情况分析	78
3.2.3 冷挤压生产工艺设计	79
3.2.4 冷挤压生产工艺流程	80
3.3 挤压过程中的计算与主要工艺参数分析	80
3.3.1 计算确定挤压毛坯尺寸	80
3.3.2 挤压力的计算	81
3.3.3 挤压速度的计算	82
3.3.4 冷挤压模具的设计	83
3.3.5 异形截面铜管铜包铝线设计	85
3.4 铜包铝复合线材挤压成形的数值模拟	86
3.4.1 几何特征和有限元模型的建立	86
3.4.2 材料属性的设置	86
3.4.3 模拟控制的设定及网格的划分	87
3.4.4 边界条件的处理	88
3.4.5 工况设置及求解运算	89
3.4.6 模拟结果分析与讨论	90
3.5 U形槽的模拟	105
3.5.1 几何特征和有限元模型的建立	105
3.5.2 材料属性的设置	106
3.5.3 模拟控制的设定及网格的划分	106
3.5.4 外部边界条件的处理	108
3.5.5 模拟结果分析与讨论	109
3.6 铜包铝线冷挤压成形的试验研究	116
3.6.1 挤压试验过程	117
3.6.2 试验装置	118

3.6.3	坯料的制备	119
3.6.4	润滑	120
3.6.5	试验结果与模拟结果对比分析	121
3.7	铜包铝复合材料的微观结构分析	124
3.7.1	引言	124
3.7.2	金相试验	125
3.7.3	微观组织分析	126
3.7.4	铜包铝线界面相研究	132
3.7.5	挤压成形制品的力学性能测试	134
3.7.6	变形分区模型的建立	139
第4章	铜包铝复合材料铸造-轧制工艺	141
4.1	引言	141
4.2	铜包铝复合板材轧制变形的理论分析	142
4.2.1	铜包铝复合板材铸造-轧制工艺的制定	142
4.2.2	铜包铝复合板材铸造-轧制工艺流程编制	142
4.2.3	轧制条件假设	142
4.2.4	轧制变形区及变形区主要参数	143
4.2.5	轧辊咬入轧件的条件	145
4.2.6	最大压下量的计算方法	146
4.2.7	轧制时的前滑与后滑	147
4.2.8	中立角 γ 的计算	149
4.2.9	铜铝复合轧制过程中金属流动规律	151
4.2.10	铜铝轧制复合时轧制压力的计算	153
4.3	铜包铝复合材料铸造-轧制成形的有限元模拟	155
4.3.1	Marc有限元数值模拟的建模步骤	155
4.3.2	铜包铝排轧制模拟结果分析与讨论	157
4.4	铜包铝排轧制成形试验研究及微观结构分析	167
4.4.1	轧制试验过程	167
4.4.2	金相试验	167
4.5	Cu/Al固-液铸轧数值模拟及界面复合机理	170

4.5.1 Cu/Al 固-液铸轧工艺	171
4.5.2 Cu/Al 固-液铸轧数值模拟	172
4.5.3 固-液铸轧试验及界面结合机理分析	174
4.6 层状金属复合板带铸轧复合技术研究	175
4.6.1 固-液铸轧复合工艺	175
4.6.2 液-液铸轧复合工艺	176
4.6.3 铸轧复合机理	179
参考文献	181

第 1 章 铜铝双金属复合材料概述

1.1 双金属复合材料

1.1.1 现代工业技术对金属材料的要求

近几十年来,随着现代工业生产技术的进步,许多产品的工作环境正朝着承受高温、高压和强烈的化学物质作用的方向发展,这就对材料的性能提出了更高、更严格的要求。首先,要求材料具有更高的强度、更高的韧性和更小的比重;其次,为发展航空航天及众多其他工业技术,对提高金属材料的耐热性能提出了迫切要求;再者,要求提高合金的耐腐蚀性能,并要求具有较低廉的价格。对于这些性能要求而言,若仅靠某一种材料是难以实现的,所要求的性能有时在同一材料上又是相互矛盾的,所以把物性各异的材料复合起来,形成一种适合于工程设计应用的新的复合材料,这早已成为材料科学领域广受关注的一个重要发展方向。另一方面,随着机械装备向大型化发展和使用环境的日益苛刻,特别是铜、铬、镍资源的日趋匮乏,以节约稀缺资源为主要目的的复合金属材料的使用更趋广泛,并显示出了十分突出的经济效益。

1.1.2 复合材料的定义和分类

复合材料是由两种或两种以上的宏观均一,但特性不同的材料通过复合工艺而成的一种多相材料。复合材料可以是一个连续物理相与一个连续分散相的复合,也可以是两个或者多个连续相与一个或多个分散相在连续相中的复合,复合后的产物为固体时才称为复合材料,若复合产物为液体或气体时,就不能称为复合材料。复合材料既可以保持原材料的某些特点,又能发挥组合后的新特性,它可以根据需要进行设计,从而最合理地达到所要求的使用性能。

复合材料具有如下特性:

(1) 定义中强调了组元材料的宏观均一准则,这就排除了前面过细的划分,将复合材料的定义域限制在一个合适的范围之内。

(2) 复合材料的组分是人们有意选择和设计的,是一类性能可以人工设计的新

型材料,这就和天然复合材料区别开来。

(3) 复合材料的性能取决于每种组分及其相应的含量,但却是其中任一组分所不完全具备的。

随着材料品种不断增加,人们为了更好地研究和使用的材料,需要对材料进行分类。材料的分类方法较多,如按材料的化学性质分类,有金属材料、非金属材料之分;如按物理性质分类,有绝缘材料、磁性材料、透光材料、半导体材料、导电材料等;按用途分类,有航空材料、电工材料、建筑材料、包装材料等。

复合材料的分类方法也很多,常见的有以下几种:

(1) 按基体材料类型分类

聚合物基复合材料:以有机聚合物(主要为热固性树脂、热塑性树脂及橡胶)为基体制成的复合材料。

金属基复合材料:以金属为基体制成的复合材料,如铝基复合材料、铁基复合材料等。

无机非金属基复合材料:以陶瓷材料(也包括玻璃和水泥)为基体制成的复合材料。

(2) 按增强材料种类分类

可以分为:玻璃纤维复合材料;碳纤维复合材料;有机纤维(芳香族聚酰胺纤维、芳香族聚酯纤维、高强度聚烯烃纤维等)复合材料;金属纤维(如钨丝、不锈钢丝等)复合材料;陶瓷纤维(如氧化铝纤维、碳化硅纤维、硼纤维等)复合材料。

(3) 按用途分类

复合材料按用途可分为结构复合材料和功能复合材料。目前结构复合材料占绝大多数,而功能复合材料具有广阔的发展前景。21 世纪将会出现结构复合材料与功能复合材料并重的局面,而且功能复合材料更具有与其他功能材料竞争的优势。

结构复合材料主要用作承力和次承力结构,要求质量轻、强度和刚度高,且能耐受温度,在某些情况下还要求具有膨胀系数小、绝热性能好或耐介质腐蚀等性能。

结构复合材料按不同基体分类和按不同增强体形式分类如图 1-1、图 1-2 所示。

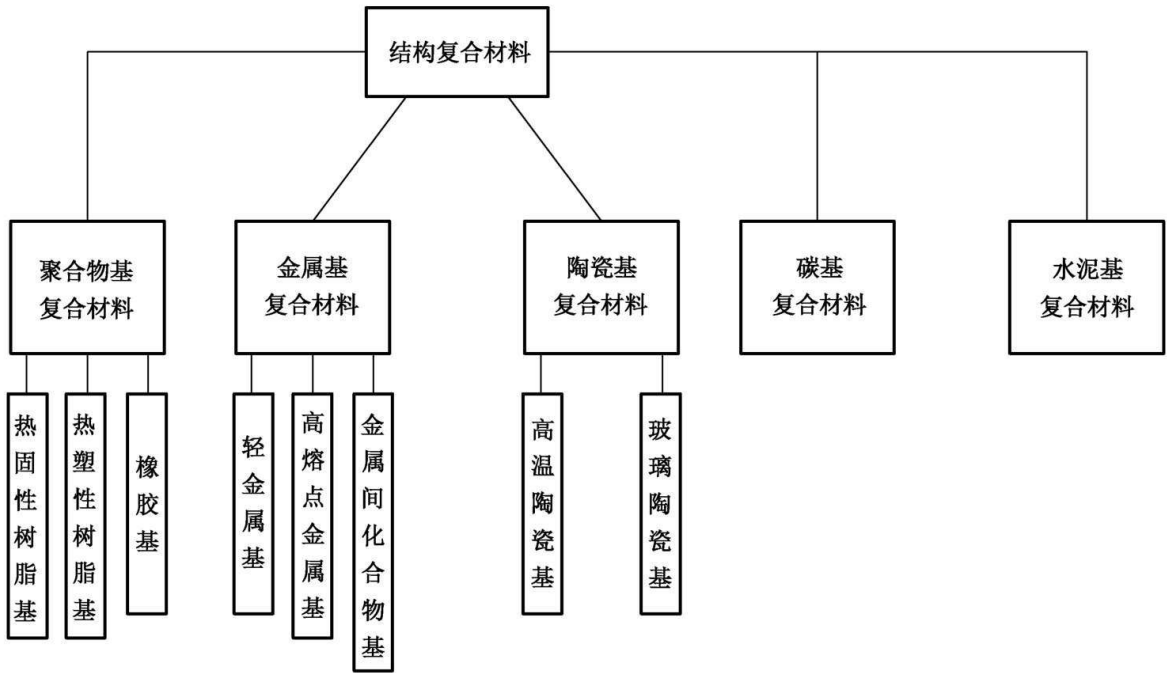


图 1-1 结构复合材料按不同基体分类

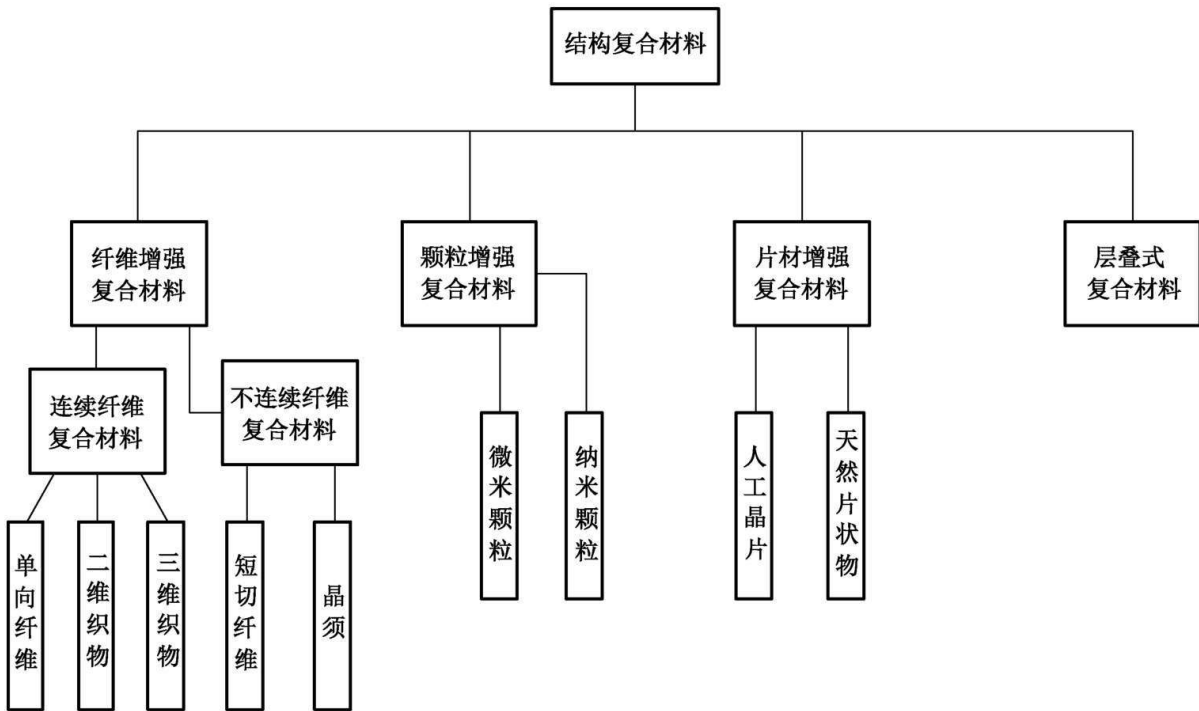


图 1-2 结构复合材料按不同增强体分类

功能复合材料指具有除力学性能以外其他物理性能的复合材料,即具有各种电学性能、磁学性能、光学性能、声学性能、摩擦性能、阻尼性能以及化学分离性能等的复合材料。

1.2 双金属材料复合机理

1.2.1 结合机理

双金属固相复合机理极为复杂,众多科研工作者从不同角度进行了研究,提出了各种结合机理,主要有以下理论:

1. 薄膜理论

薄膜理论认为,金属间结合并不取决于材料本身的性能,而取决于被复合金属表面的状态,只要除去被复合金属结合面上的油污及氧化膜,在变形过程中使被复合金属表面相互接近到原子间力的作用范围内,即可形成复合。当金属变形时,硬而脆的氧化膜被粉碎而裸露出清洁的金属层,当其相互接近到原子间力的作用范围时,就牢固地结合在一起。

2. 位错理论

当金属内部产生协调一致的塑性变形时,位错迁移到金属表面,从而使金属的氧化膜破除,并形成高度只有一个原子间距的小台阶。把金属接触表面上出现位错看作是塑性变形阻力的减小,因而有利于金属的结合。

3. 扩散理论

该理论认为金属在 0.6~0.8 倍的熔融温度下相结合时的界面间存在一层很薄的原子相互扩散区域,这一相互扩散层保证了优质的结合。这一理论也存在缺点,因为据此推断,如果增加相互扩散层的宽度,应能提高结合强度,但事实并非完全如此。如:钢/铝的复合界面间随着扩散层的增加,容易形成 FeAl 组分的金属间化合物,且是脆性的而破坏了结合性能。

4. 能量理论

能量理论认为金属间的结合中并不存在扩散过程,其结合的条件是处于金属接触区的原子必须具有一定的能量,只有当原子的能量达到这一值时,金属原子间才能形成金属键,进而其间的界面消失而相互结合。众所周知,加热可以提高金属原子的能量,因而能够促进金属间的结合,但是,当温度进一步提高时会由于氧化的存在而影响结合。另外,金属的结合是与异种金属的物理化学性能紧密相关的,即并不是每一种金属间都能实现结合,这一点用能量理论是无法解释的。

5. 再结晶理论

在高温或大变形条件下,金属接触面中的原子在晶格中重新排列,从而形成同属于两层金属的共同晶粒而结合。但是,如钢/铝或不锈钢/铝复合材料,由于它们的再结晶温度相差悬殊,即当铝发生再结晶相变时,因为钢的再结晶温度较高而很