

高硅电工钢薄板的制备

——层状复合技术的应用

姬帅 著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

高硅电工钢薄板的制备

——层状复合技术的应用

姬帅 著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书介绍了层状复合技术制备高硅电工钢薄板的不同步骤和样品的磁性能表征,具体包括铸坯制备、热加工变形、中温成形、室温成形、热处理工艺、磁性能测试和后续工艺改良等。

本书可作为高等院校金属材料工程、材料物理、材料成型及控制工程及相近专业本科生的专业基础课中的教学案例,可供材料加工工程及材料学专业硕士研究生参考,还可供材料领域相关科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高硅电工钢薄板的制备:层状复合技术的应用 / 姬帅著. —北京:中国石化出版社, 2018. 7
ISBN 978-7-5114-4939-9

I. ①高… II. ①姬… III. ①电工钢 IV. ①TM275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 147026 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号
邮编:100020 电话:(010)59964500

发行部电话:(010)59964526

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

700×1000 毫米 16 开本 12 印张 209 千字

2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定价:58.00 元

前 言

随着信息产业的高速发展，高硅电工钢已显示出更大的优越性，更适合制造高速高频电机、音频和高频变压器、扼流线圈和高频下的磁屏蔽设备等，这是由于频率越高，高硅电工钢低铁损的优势越明显。由于磁性能的提高、硅含量的增加可以大幅度减轻有关电气设备的质量和体积，因此可以调高电子和电气元件的效率和灵敏度，提高工作效率。从以上情况可以看出，高硅电工钢有着非常显著的经济效益和社会效益，有着十分广泛的应用前景。

然而，由于高硅电工钢中 Si 含量较高、有序相的出现、Si 的共价键本质等特性导致其固溶强化大、硬度高，合金变得既硬又脆；与含 Si 量较低的硅钢相比较，该合金硬度和脆性升高趋势明显，使得机械加工、力学性能明显恶化，难以采用常规的轧制方法加工成薄板，从而阻碍了其广泛应用。由于轧制脆裂问题严重，导致高硅电工钢薄板生产工艺难以取得突破性的进展。近些年，伴随着新制备工艺的出现，研究人员尝试通过避开该合金的脆性加工区来制备该合金薄板。例如，工业发达国家相继采用化学气相沉积法(CVD法)、快速凝固法、粉末压延法等来制备高硅电工钢薄板。但由于快速凝固工艺只能制备比较薄和比较窄的条带；而特殊轧制工艺由于生产过程复杂、生产成本低、品种规格有限、质量难于控制等缺点，目前仍停留在实验室研发阶段；而 CVD 工艺比较复杂，对环境污染严重，而且得到的板面质量较差，若能提高高硅电工钢合金的室温塑性，用传统的轧制方法制备该合金薄板，必将产生巨大的经济效益。

到目前为止，研究人员投入了大量的时间和精力去改善高硅电工钢的加工性能，一方面从材料的断裂本质入手，研究添加合金元素来改善合金的塑性；另一方面从工艺入手，通过改善热塑性变形条件及其后的热处理工艺，研究该合金冷加工的可能性。因此，研究出一种生产流程简单且易于大规模生产的加工方法，

就成为高硅电工钢领域研究的热点之一。

采用层状金属基复合材料技术制备高硅电工钢薄板,不仅可以简化传统工艺,而且可以突破传统工艺在加工难变形材料方面的瓶颈,同时可以扩展高硅钢的种类和规格,降低高硅钢板的生产成本,提高质量,为满足我国社会经济发展的要求做出贡献。

本书基于前人对高硅电工钢的研究工作,提出以包覆浇铸制备高硅电工钢复合板坯料为基础(普通铸造的多晶合金),设计覆层和芯层的厚度比例、Si元素和某些合金元素的质量分数,并通过热锻、热轧、温轧、冷轧等传统塑性变形工艺制备出高硅电工钢复合板(简称高硅钢复合板,下同),结合适当的扩散退火热处理工艺,得到Si元素分布均匀的高硅电工钢薄板。由于该技术所用原材料简单,不含其他的合金微量元素,因此大大降低了成本,而且只利用现有的轧制设备,不需要进行专门改造,适合现阶段的工业化生产。本书对复合技术制备的高硅电工钢薄板的磁学性能、综合力学性能等方面做进一步的研究和补充,同时力求简化高硅电工钢薄板的生产工艺流程,为工业化生产提供一种可参考的方式。

本书通过铸坯制备、热加工变形、中温成形、室温成形、热处理工艺、磁性测试和后续工艺改良等方面,介绍了层状复合技术制备高硅电工钢薄板的不同步骤和样品的磁性能表征。作为专业基础课中的教学案例,本书可供高等院校金属材料工程、材料物理、材料成型及控制工程及相近专业本科生选用,或者材料加工工程及材料学专业硕士研究生选用。本书也可作为材料领域相关科研人员和工程技术人员参考用书。

本书在出版方面得到了西安石油大学优秀学术著作出版基金资助出版,在此表示感谢;同时本书在内容方面得到了陕西省高等教育学会2017年度高等教育科学研究项目(XGH17091)、西安石油大学《材料科学与工程》省级优势学科、国家自然科学基金(51704239)、西安石油大学青年科技创新项目(2016BS21)资助,在此表示感谢。

目 录

1 层状复合制备技术介绍	(1)
1.1 国内外层状复合材料技术发展	(2)
1.2 常规层状复合材料制备技术	(3)
1.3 层状复合材料制备技术新发展	(6)
1.4 层状复合材料的未来发展趋势	(7)
2 高硅电工钢介绍	(8)
2.1 适合生产高硅电工钢的复合制备技术	(9)
2.2 高硅电工钢性能介绍	(11)
2.3 高硅电工钢的应用现状	(19)
2.4 高硅电工钢薄板的制备方法	(20)
2.5 高硅电工钢薄板国内外最新研究进展	(28)
3 层状复合技术制备高硅电工钢实验探索	(30)
3.1 高硅电工钢的研究背景和意义	(31)
3.2 层状复合技术制备高硅电工钢实验探索的研究内容	(32)
3.3 层状复合技术制备高硅电工钢实验探索的技术路线	(33)
3.4 低碳钢包覆浇铸制备高硅电工钢复合铸坯	(36)
3.5 高硅电工钢复合板坯料的锻造	(40)
3.6 高硅电工钢复合板的热轧工艺	(41)
3.7 高硅电工钢复合板的温轧工艺	(42)
3.8 高硅电工钢复合板的扩散处理工艺与磁性能测试	(44)
3.9 高硅电工钢复合板的实验结果及分析	(44)

3.10	本章小结	(64)
4	高硅电工钢复合铸坯制备	(66)
4.1	高硅电工钢复合板铸坯的结构设计	(66)
4.2	高硅电工钢复合板铸坯的成分设计	(68)
4.3	高硅电工钢复合板铸坯制备的实验材料	(69)
4.4	高硅电工钢复合板铸坯的芯层制备	(70)
4.5	高硅电工钢复合板铸坯制备	(71)
4.6	本章小结	(72)
5	高硅电工钢复合板高温塑性成形	(73)
5.1	高硅电工钢复合板铸坯的锻压工艺	(73)
5.2	高硅电工钢复合板热轧工艺理论研究	(78)
5.3	本章小结	(105)
6	高硅电工钢复合板中温塑性成形	(106)
6.1	温轧前高硅电工钢复合板热处理工艺实验方案研究	(106)
6.2	复合板热处理后的显微组织分析	(107)
6.3	复合板热处理后的显微硬度分析	(112)
6.4	温轧前高硅电工钢复合板的热处理工艺	(113)
6.5	温轧工艺的制定	(114)
6.6	温轧后复合板的组织演变和结构比例变化	(120)
6.7	温轧后复合板 Si 元素变化分析	(123)
6.8	温轧后复合板表面质量分析	(124)
6.9	本章小结	(129)
7	高硅电工钢复合板室温塑性成形	(130)
7.1	高硅电工钢复合板中低温轧制变形	(130)
7.2	高硅电工钢复合板冷轧工艺制定	(133)
7.3	高硅电工钢复合板冷轧前热处理工艺	(136)
7.4	高硅电工钢复合板的冷轧薄带制备	(137)

7.5	高硅电工钢复合板冷轧后组织变化和 Si 元素含量分析	(139)
7.6	本章小结	(144)
8	高硅电工钢复合板均一化处理	(145)
8.1	Si 元素在高硅合金中的扩散机理	(145)
8.2	高硅电工钢复合板扩散退火工艺研究	(149)
8.3	本章小结	(167)
9	高硅电工钢复合板磁性能研究	(168)
9.1	高硅电工钢磁性能测试与分析	(168)
9.2	制备下批次高硅电工钢复合板的改进措施	(170)
9.3	本章小结	(171)
10	结论	(172)
	参考文献	(174)

1 层状复合制备技术介绍

从近代以来,随着各行各业科学技术突飞猛进的发展,同时伴随着环境巨大的变化,人类对生活中材料提出了更为严格、苛刻的要求。肖纪美院士在所著的《材料宏观导论》中说“材料学科久远而永恒的命题是性能。宇宙中的物质,能够成为材料,首先,并且永恒地因为它具有能为人类服务的性能!”。作为复合材料大家族中的金属基复合材料在设计上综合了各成分组元的优点,在一定程度上弥补了各成分组元的不足,比起单一金属或合金,金属基复合材料具有无法比拟的优异综合性能,该研究课题已成为当今材料科学家们的研究热点之一。层状金属复合材料是利用复合技术使两种或两种以上物理、化学、力学性能不同或差异明显的金属之间实现牢固的冶金结合而得到的一种新型金属复合材料。其中的各层金属仍保持各自原有的特性,但其整体的物理、化学、力学性能比单一金属或合金得到了很大程度的提高,比如,抗腐蚀性能、拉伸和冲击性能等。

层状金属复合材料包括金属复合管、复合棒、复合板等,由于该类合金材料具有其中各自组元的特殊物理化学性能,在航天、石油、化工、锅炉、电力、运输等多个领域得到了较高度重视,应用前景十分广阔。经过近几十年来的研究发展,层状复合材料的制备工艺多种多样,其产品种类也日益繁多。未来的金属层状复合材料在新的复合加工方法、复合机制、使用性能等方面还需要进行大量的系统研究,根据现在的发展情况,分析原因如下:

(1) 主要是实现制备技术的产业化推广和批量化。目前除热轧、爆炸复合、浇铸复合等少数制备技术之外,大多数制备工艺的研究还缺乏系统化、控制化,仍然停留在实验室研发阶段。

(2) 为了提高层状复合材料的整体综合性能,采用联合式的复合材料制备工艺,将多种制备工艺的优点综合利用,将是未来的主要发展趋势。同时,由于层状复合材料制备技术,在其结构设计、成形过程等方面具有很大的独特性,随着材料制备领域各个学科之间的不断介入、渗透,这些制备技术还可应用于其他领域方面。采用复合材料制备技术,可以简化传统的制备工艺、突破传统工艺在加工某些难变形材料方面的瓶颈,甚至可以拓宽人们对于传统材料变形机理、组织

构成等新的认识。

早期关于层状金属复合材料的研究主要集中在制备工艺和其综合性能方面。按照金属复合材料成形时的各组分材料的状态,可以分为固-固复合和固-液复合两种。固-固复合主要是指两种或者多种组元以固态形式进行的结合,而固-液复合则是其中一种组元金属以液相形式与另外一种金属进行直接的结合。经过中外学者几十年的不断研究和研发,层状金属基复合材料的制备和生产工艺已经逐渐得到改良。各种固相或者液相之间的复合工艺不断出现,不同组元组合而成的新型复合材料也不断更新,以此来满足越来越高的产品需求。未来的金属层状复合材料在新的复合加工方法、复合机制、使用性能等方面还需要进行大量的系统研究。

1.1 国内外层状复合材料技术发展

层状金属基复合材料是由两种或者两种以上金属组成的,具有各组元材料的性能优点的新型材料,是当今材料科学界的研究热点之一,具有极大的性能优势和应用前景。这种材料的结合,既保持了其中基层金属的原有特性,又表现出了功能复层金属在耐腐蚀、耐高温、导电、导热、强度、韧性、耐磨性等方面的独特性能优势,被广泛地应用于电力、锅炉、油气运输、矿山开采、核电、航空航天、刀具五金等诸多个领域^[1]。

自 20 世纪 30 年代起,国外在层状金属基复合材料方面的研发具有代表性的国家是美国和日本。美国开始了镍复合板、不锈钢复合板等层状金属基复合材料领域的研究,并制定了 ASTM A263、A264 等相关的标准,在这一领域的研发和生产企业主要是一些大的公司,比如杜邦公司、路易斯维尔公司、俄勒冈公司、DMC 公司等^[2,3]。日本在 20 世纪 40 年代开始了生产不锈钢复合板,是全球生产复合钢板最多的国家,主要集中在以下公司,如新日铁、旭化成、神户制钢、川崎制铁、住友金属等都是研发和生产复合钢板的代表性企业^[4,5]。

我国的层状金属基复合材料的开发和生产相比起国外的发达国家起步较晚,开始于 20 世纪 60 年代,根据国内的需求,我国最初的复合板生产方法主要是爆炸复合和轧制复合,主要的科研单位有营口中板厂、上海钢铁三厂、秦皇岛板材厂、太原钢铁公司、宝鸡有色金属加工厂、大连造船厂、洛阳 725 研究所、北京有色金属研究总院、东北大学、北京科技大学等。经过几十年的发展,我国在层状复合材料的制备技术和新材料研发方面,均取得了较大的进步。

1.2 常规层状复合材料制备技术

各层组元金属之间的结合过程是层状金属复合材料的生产工艺的核心环节, 否则材料的完整性较差。传统的层状复合材料生产工艺, 按照其结合时的各组元材料的状态, 可以分为固-固复合和固-液复合两种。前者主要是指两种或者多种组元材料之间以固体状态进行的结合, 而固-液复合则是其中一种组元金属以液相的形式与另外一种固态形式的金属进行直接的结合^[6]。下面简单介绍下上述两大类复合制备技术。

1.2.1 固-固复合

(1) 轧制复合法

轧制复合法作为一种金属层状复合的工艺方法在 20 世纪 30 年代就引起了科研人员的关注^[7]。轧制复合可以大致分为热轧复合和冷轧复合两种, 均具有很多突出的优点, 例如工艺流程短、生产效率高、能耗低、操作简便、成材率高、生产成本低等^[8]。因此, 非常适合进行多种复合板的多规格、批量化生产, 具有极为广阔的发展前景^[9]。常见的低碳钢、合金钢, 以及有色金属如铝、镁、镍、铜、钛等的复合板材均可以用这种方法生产^[10-14]。由于复合板中基、复层材料性能往往差异较大, 在轧制变形的各个阶段中, 二者之间均表现出强烈的相对塑性变形和附加应力场等特征^[15]。轧制复合的变形过程可分成两个阶段, 一个是初始阶段, 即结合阶段; 另一个则是结合后的轧制变形阶段, 此时的第二拉伸主应力和切应力对界面的结合是不利的, 有可能导致界面的开裂^[16-18]。轧制复合往往需要进行表面处理和退火强化处理等工艺, 也可能存在界面残余应力、板形控制、结合强度不足等工艺问题^[19]。

(2) 爆炸复合法

金属爆炸复合是利用炸药作能源, 将两种或者两种以上的金属材料焊接成一体的金属加工工艺^[20]。金属爆炸复合法起源于 1944 年美国人 Carl 的爆炸成形试验^[21], 其优点是材料组合的适应性强, 且不改变组合材料的成分及状态, 界面的结合强度很高^[22]。其产品具有良好的再加工性能, 对板面的大小、形状及生产批量具有很高的灵活性, 不需要成套复杂设备。爆炸复合具有自清理作用, 因此也不需要特别的表面处理工艺^[23]。爆炸复合的产品界面上, 有可能出现周期

性分布的金属间化合物^[24,25]，同时也会产生巨大声响和冲击波，对环境产生刺激和污染。另外，爆炸复合技术由于生产效率不高，也不适于连续生产^[26]。

(3) 扩散焊接法

扩散焊接的原理是将复合材料的各组元加热到其熔点 0.5~0.7 的温度时，在尽量使各组元不出现变形的程度下加压，使它们之间紧密接触，并且利用界面出现的原子扩散而实现结合^[27]。扩散焊接法适用于一些难复合的高温合金，特别是铸造高温合金。利用这种方法可获得与基体性能一致的接头性能，避免组元的宏观变形，接头残余应力小。但扩散焊接品界面的力学性能较差，且对生产设备的要求也较高^[28]。扩散焊接法可以分为无助剂自扩散焊接、无助剂异扩散焊接、有助剂扩散焊接、过渡液相扩散焊接和相变超塑性扩散焊接^[28]。

(4) 超声波焊接技术

超声焊接技术是通过层状结合在一起的材料的待连接区施以静态压合力与高频超声震动而使材料结合起来的工艺方法。超声震动与静态压合力相结合使待连接工件之间产生动态剪应力，当这些剪应力足够大时在界面处就会产生塑性变形。两材料接触表面的氧化膜及有机物膜在震动能的作用下粉碎并分散开来，产生干净的接触面，从而获得纯基体材料间紧密的原子接触，形成固态冶金结合^[29]。超声焊接技术用于加工金属层状复合材料，具有加工范围广、能耗少、速度快、效率高等诸多优点，是一种具有广阔应用前景的新型加工技术^[30]。

1.2.2 液-固复合

(1) 铸造复合法

铸造复合是将一种基体(固相)和另外一种基体(液相)在铸模内进行组合的方法，等待凝固后形成复合材料的技术。铸造复合法的生产特点界面结合强度高，界面缺陷少、自动化程度相对较高，常见的铸造复合法包括包覆铸造成形法和双流铸造法等。包覆铸造成形法，也称熔合法，是对已有芯材的包覆，可以用于两组元层熔点相差悬殊而一般轧制法又难以进行复合的材料^[31]。包覆铸造成形法的产品不可避免的存在某些铸造缺陷，因此需要后续处理，成本较高。双流铸造法，也称双浇法，其原理是利用组元合金的熔点差，将低熔点合金浇注在一特殊的扁模内，然后将模内的抽板提升，再把高熔点合金浇注在抽板提升后的空位上，即可得到复合的热双金属坯料。运用这种方法对设备制造、工艺水平、操作技能及自动化控制均有较高的要求。并且，对浇铸速度控制有比较严格的

要求^[32]。

与之相似的还有双结晶器连铸法，在芯材结晶器内连铸凝固成形的芯材，在保护环(大气隔离环)的保护作用下，保持表面无氧化、无夹杂、无油污的状态，直接进入包覆层结晶器，热态连铸包覆层。这种方法已经成功的制备出了 Pb-Sn 复合棒材，Al-Cu 复合棒材等层状复合材料，具有很大的推广前景。但是其连铸工艺较复杂，并且要求严格拉坯速度，增加了操作难度^[33]。

(2) 钎焊法

钎焊法是利用浸润的液态金属相凝固使两种金属焊合一起的技术方法^[31]。钎焊工艺简单、操作方便，易于实行异种金属的结合；但钎焊结合部位的硬度不高，易出现小孔、夹渣、偏析等缺陷^[34]。

(3) 反向凝固复合技术

20 世纪 90 年代初，德国亚琛工业大学和曼内斯曼公司开发了带钢反向凝固连续铸造技术，此项连铸技术目前正受到世界各国的关注。近年来，亚琛工业大学又在此项研究的基础上开发研究液态不锈钢与固态钢带反向凝固连铸复合技术，其原理是使固态钢带穿过液态不锈钢熔池，通过热流传输使液态不锈钢凝固并覆着到钢带表面^[35]，然后利用平整辊对处于半凝固状态的新生覆层进行初轧。

(4) 自蔓延高温合成焊接技术

自蔓延高温合成(简称 SHS)又称为燃烧合成。将 SHS 技术与焊接技术相结合就得到了 SHS 焊接技术，SHS 焊接是在两个待接部件之间引发 SHS 反应，利用反应放热及反应物进行焊接的技术^[36,37]。SHS 焊接的反应热作为焊接的能量，节约能源、反应速率高、热量集中，可减少母材的热影响区，避免热敏感材料微观组织的破坏，利于保持母材的性能^[36]。

(5) 激光熔覆技术

激光熔覆技术是在被涂覆基体表面上放置选择的涂层材料，经激光辐射使之和基体表面一薄层同时熔化，熔层快速凝固后形成稀释度极低，与基体材料冶金结合的表面涂层。激光熔覆技术能显著改善基体材料表面的耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化及电学性能，具有生产效率高、熔覆层均匀以及与基体之间具有良好的冶金结合等优点；但要进入真正的实际工业应用阶段还有许多困难，如难以实现大面积熔覆，涂层易开裂等。

与之类似的固液复合工艺还有热浸镀、喷射沉积成形等工艺^[38]，可以生产

多种金属之间组成的复合材料。

早期研究的层状复合材料制备工艺，其重点在于两种材料的结合过程，以及复合材料的整体制备过程，在复合材料整体性能、界面结合强度、组织均匀性等方面还存在不足。例如，爆炸复合的材料界面上存在白亮带，影响材料整体的力学性能；液固复合的材料由于一侧是铸态组织，韧性和变形能力较差；热轧复合虽然生产效率较高，但是组元之间的结合强度不足等。因此，随着层状复合材料制备技术的发展，新的制备工艺必将在复合材料成形的同时，既满足组元之间的界面结合强度，又提高各自的机械、工艺性能。

1.3 层状复合材料制备技术新发展

(1) 爆炸+轧制复合法

爆炸-轧制联合工艺是一种制备较薄层状金属复合板的有效方法^[25]，保留了爆炸复合和热轧变形的各自特点，避免了热轧复合之前各组元材料之间的表面清理和预成形。其产品的界面上看不到明显的扩散层，避免了脆性的金属间化合物的产生，同时还发挥了热轧变形生产效率高，可以生产多种规格复合材料的特点。

(2) 液-固相轧制复合法

液-固相轧制复合是固态金属热浸镀技术与液态金属铸轧技术的有机结合，将液态金属连续浇铸在固态基体金属带上，使液态金属在半凝固状态与固态基体金属同时进入轧机实现复合^[38]。该方法可以一步实现两种金属的界面冶金结合，结合强度高、工序少、设备简单、能耗低、生产效率高，适合连续化生产，金属结晶速度快、晶粒细小、产品的内在冶金质量好。该方法主要适用于低熔点金属与高熔点金属的复合，不适用于难熔金属之间的复合。

(3) 离心浇铸-热塑性变形-热扩散退火工艺

离心浇铸-热塑性变形-热扩散退火工艺是一种近年来发展起来的复合型短流程的层状复合材料制备方法。传统的离心铸造工艺可以直接实现两种或者多种金属之间的固液甚至液液结合，直接制备出层状金属复合材料管类或者环形产品。但是，由于其产品是铸态组织，晶粒粗大，在使用安装过程中无法进行变形，耐冲击、腐蚀的能力较差，大大限制了其推广和使用。将离心铸造得到的层状金属复合坯料通过热挤压或者热轧变形，利用热塑性变形，使铸态组织充分破

碎，晶粒得到细化，也大大提高了各层组元之间的结合强度。对于大多数离心浇铸工艺或者热变形工艺生产的复合材料，其界面处由于冷却条件、变形特点的不同，可能导致其组织性能与各组元材料具有较大差异，对于这种状况，可以通过热扩散退火加以消除，提高各组元材料的均匀性^[39]。目前，这种工艺制备的双金属复合管类材料已经成功实现产业化生产^[40,41]。

1.4 层状复合材料的未来发展趋势

未来的金属层状复合材料在新的复合加工方法、复合机制、使用性能等方面还需要进行大量的系统研究。未来的层状金属复合材料制备技术主要发展的趋势为：

实现制备技术的大规模生产和批量化。目前除热轧等少数制备技术之外，大多数制备工艺的研究还缺乏系统化，仍然停留在实验室阶段。因此，层状复合材料的制备技术广泛应用于大规模生产，也是其发展的必经之路。

高级别、整体高性能的层状复合材料的制备。以往的制备技术，很多只注重各组元之间的结合情况，以及发挥各自组元的性能特点，对复合材料的整体性能水平并没有足够的重视。随着复合材料的广泛应用，不仅需要覆层材料具有独特性能，对其整体的力学、工艺性能也提出了更高的要求。因此，采用联合式的复合材料制备工艺将是未来的主要趋势。例如，将铸造或者焊接得到的复合材料坯料，通过热塑性变形或者扩散退火工艺，提高复合材料的整体性能，以满足更加苛刻的使用要求。

层状复合材料的制备技术将拓宽其应用领域。目前的层状复合材料包括组成不同、规格各异、用途千差万别的产品，其对应的各种制备技术也各具特点。随着材料制备领域各个学科之间的不断渗透，各种制备技术之间的界限也必将越来越模糊。采用复合材料制备技术，可以实现一些传统工艺难以实现的工艺目的，打破传统的工艺限制，甚至能拓宽人们对于传统材料的界定。

2 高硅电工钢介绍

电工钢(也称硅钢)是一种含碳量很低(约 $<0.02\%$, 质量分数)的硅铁软磁合金, Si 含量一般为 $0.5\% \sim 4.5\%$ (质量分数)。它是使用量最大的一种软磁合金(约占磁性材料总量的 $90\% \sim 95\%$), 是发展电力、通讯、先进装备和国防军工等领域的基础材料, 主要用以制造发电机、电动机、变压器、互感器、继电器以及其他电器仪表等设备^[47-51]。

硅钢作为磁性材料在使用过程中会产生一定的能源损耗(如磁滞损耗、涡流损耗等), 提高其磁性能对于提高使用效率、节约能源十分重要; 增加硅钢中的 Si 元素含量是提高磁性能的有效途径之一^[52]。随着 Si 含量的增高, 硅钢的磁导率升高、电阻率升高、磁晶各向异性常数降低、磁致伸缩系数降低、矫顽力降低、铁损降低。但由于铁硅合金随着 Si 含量的增加, 机械加工性能将变差, 5% (质量分数, 全书若无特殊标注均为质量分数, 另外 wt 也指质量分数, at 指原子分数)的 Si 含量目前仍为硅钢制品的上限^[53-56]。

近几十年来, 为了进一步降低硅钢的铁损, 尤其是在高频信息领域, 含 Si 量约为 6.5% 的高硅钢被重新考虑为普通硅钢片的替代材料, 与含 Si 量不高于 3% 的普通硅钢相比较, 合金电阻率由 $48\mu\Omega/\text{cm}$ 增加到 $82\mu\Omega/\text{cm}$, 交流铁损也大幅度下降, 磁致伸缩系数约为零^[54]。因此看出含 Si 量为 6.5% 的高硅钢有效地提高了磁导率和大大幅度降低了铁损, 用其制作电机将大幅度节约电能, 同样用其取代一般的取向硅钢片也可大幅度降低输电过程中变压器的能耗; 同时, 由于高硅电工钢近乎为零的磁致伸缩系数, 也可使变压器的噪声减小^[57]。

随着信息产业的高速发展, 高硅电工钢已显示出更大的优越性, 更适合制造高速高频电机、音频和高压变压器、扼流线圈和高压下的磁屏蔽等设备, 这是由于频率越高, 高硅电工钢低铁损的优势越明显。由于磁性能的提高、硅含量的增加可以大幅度减轻有关电气设备的重量和体积, 因此可以调高电子和电器元件的效率和灵敏度, 提高工作效率。从以上情况可以看出, 高硅电工钢有着非常显著的经济效益和社会效益, 有着十分广泛的应用前景。

然而, 由于高硅电工钢中 Si 含量较高、有序相的出现、Si 的共价键本质等

特性导致其固溶强化大、硬度高,合金变得既硬又脆;与含 Si 量较低的硅钢相比较,该合金硬度和脆性升高趋势明显,使得机械加工、力学性能明显恶化,难以采用常规的轧制方法加工成薄板,从而阻碍了其广泛应用^[58-61]。由于轧制脆裂问题严重,导致高硅电工钢薄板生产工艺难以取得突破性的进展。

近些年,伴随着新制备工艺的出现,研究人员尝试通过避开该合金的脆性加工区来制备该合金薄板。例如,工业发达国家相继采用化学气相沉积法(CVD法)^[62]、快速凝固法^[63]、粉末压延法^[64]等来制备高硅电工钢薄板。但由于快速凝固工艺只能制备比较薄和比较窄的条带;而特殊轧制工艺由于生产过程复杂、生产成本低、品种规格有限、质量难于控制等缺点,目前仍停留在实验室研发阶段;而 CVD 工艺比较复杂,对环境污染严重,而且得到的板面质量较差,若能提高高硅电工钢合金的室温塑性,用传统的轧制方法制备该合金薄板,必将产生巨大的经济效益。

到目前为止,研究人员投入了大量的时间和精力去改善高硅电工钢的加工性能,一方面从材料的断裂本质入手,研究添加合金元素来改善合金的塑性^[65];另一方面从工艺入手,通过改善热塑性变形条件及其后的热处理工艺,研究该合金冷加工的可能性^[66]。因此,研究出一种生产流程简单,且易于大规模生产的加工方法就成为高硅电工钢领域研究的热点之一。

2.1 适合生产高硅电工钢的复合制备技术

复合板是由两种或以上的不同性能或成分的组元通过特殊的加工制备方法复合而成的。与单一材料的组元相比,经过合理设计组合后的复合板结合了各自组元的优点,可以获得单一组元所不具有的特殊性能,从而使一些难加工的材料进一步加工成型成为可能。针对高硅电工钢合金的特点,制备该材料的复合生产方式主要有以下三种:固-固相复合法、液-固相复合法和液-液相复合法。

(1) 固-固相复合法

根据前文介绍,固-固相复合法主要包括爆炸焊接法、爆炸焊接-热轧法、轧制复合法和挤压复合法^[26]。如图 2-1 所示为挤压复合法的原理图,将要复合的异种金属表面清理后组装成挤压坯,在适当温度、挤压比下进行挤压,在压力作用下使金属紧密接触并达到复合。

(2) 固-液相复合法

液-固相复合法主要包括浇铸复合法、喷镀复合法、反向凝固法。反向凝固