

# 复合带材异步轧制工艺

## 基础及理论研究

史庆南

林大超

编著

FUHE DAICAI YIBU ZHAZHI GONGYI JICHU JI LILUN YANJIU

 云南大学出版社

责任编辑：张世鸾

封面设计：刘 雨

复合带材异步轧制工艺基础及理论研究

史庆南 林大超 编著

\*

云南大学出版社出版

(云南大学校内)

云南省新华书店经销

云南大学出版社印刷厂印刷

\*

开本：850×1168 1/32 印张：4.0625 字数：102 千

2001 年 6 月第 1 版 2001 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 7-81068-291-1/TG·0

定价：12.00 元

## 前 言

单一的金属材料在价格或性能使用方面都不能适应工业发展和市场竞争的需要。迫切希望开发出性能和功能均大幅度超过现有单一材料的新材料，于是促进了复合材料的发展。金属层状复合带材是复合材料家族中的一大类，近几年来发展很快，研制出了不锈钢/钢、铜/钢、镍/钢、铝/钢、钛/铜、钛/铝、钛/钢、铜/铝以及各种贵金属与普通金属组成的复合带材。加工方法有爆炸复合、热轧复合、室温固相轧制复合、爆炸+轧制复合等方法。

各种加工方法对不同产品的种类具有一定的适用性，对于薄型带材常用室温固相轧制复合，但此法存在以下缺点。

复合轧制需大变形量，轧制压力将大幅上升。这就要求轧机具有很高的强度、刚度和电机驱动功率，需制造庞大的轧机，增加设备投资；由于一次施加的变形量大，塑性较差的金属边部易出现裂纹，使带材成品率下降；在轧制过程中，由于不同的金属硬度、塑性不一致，将导致软层和硬层产生较大的变形不均，影响产品的板型精度。

这些问题限制了该生产工艺的发展，更为严重的是精密复合带材的质量受到影响，难以满足电子、仪器、仪表工业的要求。鉴于存在以上问题，在云南省自然科学基金的资助下，我们开展了“精密复合带材异步轧制工艺基础及理论研究”，经过实验发现：异步轧制复合方法较通常的室温固相轧制复合方法具有许多优点。异步轧制工艺由于依据改变上下轧辊辊径或上下轧辊转速，从而使轧辊线速度不同，轧制变形区中存在一个摩擦力方向

相反的搓轧区,使轧件处于大的剪切变形区中,可以大幅度降低轧制压力,从而增大轧制变形量,它正好可以解决等辊径等辊速轧制方法生产复合带材完成大变形方面能力的不足和变形不均的问题,并且可以通过改变变形量、异步比、层厚比来控制轧件的不均匀变形,对轧件起到弯曲的调控作用,可使复合带材变形均匀,提高精度。用刚塑性有限元法对双金属带材复合轧制过程进行分析和模拟,可实现对轧制过程的预测和控制。

我们通过轧制变形区的研究、轧制压力测试结果及分析、双金属复合轧制时轧件弯曲的研究、复合强度的研究、复合双金属组元层厚比变化规律研究、异步轧制复合双金属板的界面研究、双金属复合轧制的有限元模拟,获得了重要的工艺参数和理论结果。为了促进这项技术的发展,丰富复合轧制理论,我们萌发了把几年的研究工作编写成书以供研究者们参考的想法。有幸的是,我们得到了“云南省教委学术著作出版基金”的资助,使这本书的出版得以实现。

本书第一章、第二章和第五章由林大超博士编写,第三章、第四章、第六章、第七章和第八章由史庆南教授编写。贺艳苓、白海龙、魏伟、段坤祥等参加了部分工作。

本书可供材料加工、轧制等方面的研究人员、工程技术人员经及大专院校有关师生参考。

衷心地感谢云南省自然科学基金和云南省教委学术著作出版基金的资助,感谢昆明理工大学关心和帮助过我们的所有领导和同事。

由于我们的工作还不深入,学识水平有限,书中难免有不当之处和缺点,诚恳希望读者批评指正。

作 者

2000年12月于昆明理工大学

# 目 录

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 第一章 绪 论 .....                  | (1)  |
| 1. 1 前言 .....                  | (1)  |
| 1. 2 热轧复合 .....                | (2)  |
| 1. 3 等辊径等辊速冷轧复合 .....          | (3)  |
| 1. 4 异步轧制复合 .....              | (4)  |
| 1. 5 评述 .....                  | (7)  |
| 第二章 复合轧制变形区 .....              | (14) |
| 2. 1 前言 .....                  | (14) |
| 2. 2 轧制咬入角 .....               | (14) |
| 2. 3 接触弧的水平投影长度 .....          | (17) |
| 2. 4 变形区内复合轧件组元厚度变化的实验分析 ..... | (19) |
| 2. 5 复合轧制变形区内金属的流动特点 .....     | (20) |
| 第三章 轧制压力测试结果及分析 .....          | (24) |
| 3. 1 前言 .....                  | (24) |
| 3. 2 测试轧制压力的实验分析 .....         | (24) |
| 3. 3 结论 .....                  | (27) |
| 第四章 双金属复合轧制时轧件弯曲的研究 .....      | (28) |
| 4. 1 前言 .....                  | (28) |
| 4. 2 试验及测量 .....               | (30) |
| 4. 3 试验结果及分析 .....             | (31) |
| 4. 4 双金属复合轧制轧件组元间的变形关系 .....   | (32) |

|                                      |              |
|--------------------------------------|--------------|
| 4. 5 弯曲变形的力学分析 .....                 | (33)         |
| 4. 6 轧件的弯曲方程 .....                   | (35)         |
| 4. 7 结论 .....                        | (36)         |
| <b>第五章 复合强度 .....</b>                | <b>(39)</b>  |
| 5. 1 前言 .....                        | (39)         |
| 5. 2 撕裂法测试结合强度的研究 .....              | (40)         |
| 5. 3 不同轧制条件下复合强度的测试实验 .....          | (47)         |
| 5. 4 双金属冷轧复合变形率与结合强度的关系 .....        | (51)         |
| <b>第六章 轧制复合双金属组元层厚比变化规律的研究 .....</b> | <b>(59)</b>  |
| 6. 1 前言 .....                        | (59)         |
| 6. 2 轧前轧后复合双金属组元层厚比的变化规律 .....       | (60)         |
| 6. 3 轧制变形区内双金属组元厚度的变化规律 .....        | (65)         |
| 6. 4 结论 .....                        | (68)         |
| <b>第七章 异步轧制复合双金属板的界面研究 .....</b>     | <b>(74)</b>  |
| 7. 1 前言 .....                        | (74)         |
| 7. 2 试验材料及方法 .....                   | (76)         |
| 7. 3 试验结果及分析 .....                   | (79)         |
| 7. 4 双金属复合界面的热力学分析 .....             | (94)         |
| 7. 5 结论 .....                        | (98)         |
| <b>第八章 双金属复合轧制过程的刚塑性有限元法分析 .....</b> | <b>(102)</b> |
| 8. 1 前言 .....                        | (102)        |
| 8. 2 刚塑性有限元法中若干问题的讨论 .....           | (102)        |
| 8. 3 复合界面超薄单元模型 .....                | (111)        |
| 8. 4 算例分析 .....                      | (116)        |

# 第一章 绪 论

## 1.1 前 言

金属层状复合材料是将两种或两种以上的金属材料利用其各自的性能优势进行分层组合而形成的一类金属材料。这类材料的应用和发展已具有较为悠久的历史。随着科学技术的进步,今天它们不仅在应用范围上愈加广泛,而且在材料性能组合和优化利用方面也突破了传统的认识。装饰性、导电性、导热性、耐蚀耐磨性和力学性能等的有效组合,既促进了材料综合性能的提高,也为合理选材和降低产品成本提供了更好的条件。因此,它们的应用前景十分广阔。结构与功能一体化已经成为这类材料深入发展的潜在优势。

按照习惯的划分方式,金属层状复合材料主要是指覆层较厚的金属材料,或者是采用区别于常规的物理或化学方法实现表面覆层的金属材料。从广义的角度讲,只要实现了异种金属为一体的材料都应属于金属层状复合材料的范畴。镀覆、涂覆、物理化学方法涂层覆层、焊接、铆接以及机械覆层方法在很大程度上丰富了金属层状复合材料的制备技术。因此金属层状复合材料的生产方法众多,研究领域极为广阔。

轧制方法成本低、产量高,而且工艺技术及装备较为成熟,作为一种金属层状复合的工艺方法在 20 世纪 30 年代就引起了一些研究者的关注<sup>[1]</sup>。轧制工艺不仅用于对已实现复合的坯料进一步加工,而且也用作为一种有效的复合制备技术。轧制技术易于实现大规模工业化生产,同时不存在像电镀和物理化学方法覆层所带来的环境污染问题,它将是一种具有非常好的发展潜力的

金属层状复合材料制备加工技术。在轧制成形的产品中，板带材的比重超过了其总产量的一半以上。它作为众多制造工业的基本原材料，市场容量大，尤其是高质量的冷轧板带材更是供不应求，而且这类产品很大一部分是以表面覆层或镀层的状态交货<sup>[2]</sup>，因此高质量板带材轧制复合生产技术的开发具有良好的社会效益及直接的经济效益。此外，特殊性能要求的复合板带材应用的日益广泛，它们也将为这类技术产品提供巨大的市场。

虽然轧制复合技术已经具有好几十年的发展历史，并且已成功用于工业生产实践中，但是它还远远没有达到这一技术本身所具有的能力范围。实现复合大变形的要求超出了传统轧制技术范畴，从而大大制约了技术的推广。很多研究工作从不同的角度作了大量有益的探索，但是用于指导技术实施的系统化工艺理论还不完善，没有跳出传统理论框架的束缚。这方面的研究将是轧制复合技术在今后的发展过程中必须解决的关键问题。

## 1.2 热轧复合

热轧复合方法是将被复合的金属坯料在高温高压下进行轧制变形，受力和热的同时作用而使不同金属进行焊合的一种工艺方法。这种方法从 20 世纪 30 年代一直沿用至今，仍是一种重要的复合方法。它的基本工艺特点是单块组装热轧复合，可以用现有设备，简单易行，可以复合大型复合板材<sup>[3]</sup>。

热轧复合的变形过程非常类似于单种金属热轧时由于坯料加热不均匀而产生的变形现象，但它更规则、更典型。高温金属塑性成形时在变形性质上十分类似于粘滞流体<sup>[4]</sup>，由此推知，两种金属间的接触表面在剪切变形力的作用下应该更趋向于流体特性，一旦新生金属在表面出现，它们便产生粘着摩擦行为，利于接触表面间金属的固着，以固着点为基础（或核心），在高温热激活条件下形成较为稳定的热扩散，从而实现金属间的焊接结

合。轧后的余热将使两种金属间的原子扩散更加充分，从而形成良好的复合。有关研究已经证明了这种扩散的有效性<sup>[5,6]</sup>。不过，如果两种金属趋向于形成脆性化合物时，对于复合过程的实施将是致命的。

热轧复合方法已经非常成功地运用于工业生产中<sup>[7,8]</sup>。它与普通的金属热轧工艺相比，除了工艺实施方案上有较大的差异外，其基本轧制过程没有实质性的变化。事实上，一些有色金属板带的轧制成形性不好而采用软金属进行包覆轧制（如硬铝合金包铝轧制），实质上就是一种热轧复合。由此可以看出，除焊接扩散过程外，热轧复合在很多方面与一般的热轧工艺没有大的差异，现有的轧制理论在一定程度上仍然适用相关工艺的分析。

### 1.3 等辊径等辊速冷轧复合

鉴于热轧复合在工艺实施上存在着一些困难，对某些金属间脆性化合物的形成难以控制，冷轧复合方法便应运而生。20世纪50年代初期，在美国首先提出了表面清理、大变形复合、复合界面的热扩散处理工艺路线<sup>[9]</sup>。这种工艺方法先后在工业生产中得到逐步实施，并部分替代了热轧方法生产的产品。

即使采用与单金属对称轧制完全一致的工艺条件，复合轧制过程中轧制平面两侧金属的流动一般不再保持对称性，并且明显区别于普通同步轧制时的金属流动特性，因此，我们把这种类似于单金属同步轧制工艺条件的复合轧制形式，定义为等辊径等辊速复合轧制，以示区别。随着等辊径等辊速冷轧技术的开发，其工艺理论的研究也逐步深入，代表性的工作主要集中在如下几个方面。

#### (1) 复合变形率

复合变形率是实现复合及制定复合轧制工艺的基础，由于冷轧变形过程中被复合金属间的接触状态区别与热轧过程，同时冷

变形的热激活较之热轧要弱得多，极大的一次变形率构成了该工艺的基本特点，在一般情况下往往需要高达 60%~70% 的变形率<sup>[10]</sup>。

## (2) 复合过程的接触变形

两金属间的接触变形直接制约着复合的发生和发展，最有利的变形条件的寻求是制定最佳工艺方案的基础。有关研究表明<sup>[11]</sup>，两金属的接触表面间存在着适当的相对剪切移动变形将形成有利的复合变形条件。

## (3) 轧制力和轧制力矩

轧制力和轧制力矩是轧制工艺的基本参数，许多理论和实验方法研究工作对轧制力、轧制力矩与复合过程及复合效果进行了分析<sup>[12~19]</sup>，这些研究结果为改进工艺和选择工艺参数提供了一些有益的探索。

## (4) 复合界面的热扩散处理及复合效果的研究

复合产品质量的好坏是评价复合工艺成功与否的标准，复合界面热扩散处理是保证复合界面获得稳定的结构和性能的基本方法。一般认为，大于某一临界变形程度便能保证有效的复合，而低温长时间的扩散退火处理是获得理想复合界面结构的最佳工艺<sup>[20~21]</sup>。

关于等辊径等辊速冷轧复合方法的研究虽然已经取得了较大的进展，但是在研究的深度及广度上还没有达到工艺理论系统化的程度。大的复合变形对轧机提出了很高的要求，使得工艺的应用范围受到了极大的限制。此外，轧制成材率、板带材的板型等等问题也很难得到有效的解决。正是这些问题使得该项工艺技术无法得到较大的发展。

# 1.4 异步轧制复合

等辊径等辊速冷轧复合方法虽然在级数上是可行的，但是单

道次的变形程度高达 60%~70%，是一般的轧机根本不可能承受的。正是这一致命的缺点使它的推广和大规模工业化生产无法实现。但是轧制生产方法的特点决定了其诱人的前景，令研究者难以割舍，于是异步冷轧复合方法作为一个新的切入点在近年来开始提出。虽然有研究者曾试图用行星轧制方法解决大变形率问题<sup>[22]</sup>，但是随之带来的其它工艺问题非常突出，因此人们一直看好异步轧制复合工艺。

异步轧制工艺作为一种 20 世纪 60 年代开始兴起的板带材轧制生产技术，自从它问世以来就引起了人们极大的兴趣<sup>[23~25]</sup>。由于依据改变上下轧辊辊径或上下轧辊转速从而使轧辊线速度不同，轧制变形区中存在一个摩擦力方向相反的搓轧区，使轧件处于大的剪切变形区中，可以大幅度降低轧制压力，从而增大轧制变形量，它正好可以解决等辊径等辊速轧制方法完成大变形方面能力的不足。

异步轧制复合方法自从 20 世纪 70 年代提出以来便获得了研究者们的关注。虽然已经取得了大量的研究结果，但是离大规模的实际生产还有一定的距离。如果一些关键性的技术问题能得到有效的解决，相信这一技术能够得到较好的推广。目前关于这种方法及其基本理论的研究可以作如下几个方面的概括。

### (1) 轧制过程中的变形关系

根据总变形率与两种金属各自的变形率关系可以得到轧后轧件的层厚比。两种金属各自的变形率与轧制总变形率呈线性关系，其变化的强弱程度取决于轧件的层厚比<sup>[26]</sup>。

对于双金属的复合轧制而言，若不考虑轧件的宽展，虽然两种被轧制的金属之间的力学性质存在着差异，但是由于辊缝的限制，在不考虑两金属间相对的滑动时，除了两种材料的受力状态有所差异之外，它们在辊缝内变形的流动特点与单一金属轧制应该是基本一致的。在辊缝的约束下两种材料之间要保证这种流动

状态的一致性必然导致一个附加的应力场，而这个附加的应力场一旦在两种材料之间失去辊缝的约束时就开始发生作用，即在轧件离开辊缝的瞬间开始释放。因此，轧件的弯曲发生在轧件离开轧辊的瞬间，而引起弯曲的力来源于两种材料彼此协调变形时集聚的附加应力场。对于异步轧制而言，还须考虑由于轧辊辊径差和轧辊辊速差所引起的附加力矩<sup>[27]</sup>。在等辊径等辊速轧制条件下，由于两金属组元的变形抗力、塑性条件、摩擦状态不同，将引起轧件的纵向弯曲。异步轧制时，由于轧辊辊径差和轧辊辊速差所引起的附加力矩，将引起轧件的弯曲变化，因此，异步轧制可以调节双金属板的弯曲曲率，可以得到平直的轧件<sup>[28~30]</sup>。

## (2) 复合过程的发生

复合过程是一个从接触表面向结合界面的转化过程，在这个过程中两接触表面间的变形显得尤其重要。因为复合的发生除了取决于被复合的两种材料本身的结构特性之外，新表面的产生将决定着复合过程的进行。由于复合过程中充分的扩散或化学反应往往是不可能的，因此结合界面上产生一层最佳的过渡层将是保证结合强度的基础。界面热力学分析结果表明，如果初始表面处理得当的话，这层最佳的过渡层是可以实现的<sup>[31]</sup>。通过圆柱形试样镦粗复合变形试验的研究表明，表面变形控制着结合界面的发生和发展<sup>[32]</sup>，这个结论与其它相关研究所提出的粘结机制假设是相符合的<sup>[33~34]</sup>。

## (3) 复合强度

大量的研究表明，复合的发生和复合界面的发展是由两种金属在复合接触变形过程中新生表面的产生量所决定的。对于某一种变形方式而言，表面的变形随变形体整体的变形有着基本固定的关系，因此，复合的发生与变形体的变形量有着确定的关系。

复合的效果从微观上表现为复合界面结构的形态变化，从宏

观上表现为结合强度的变化。实验测试结果表明,当复合发生时,随着变形程度的增加,复合强度逐渐增大,当变形程度达到某一临界值时,复合强度将急剧增加,并达到被复合的软金属的强度值。在异步轧制条件下,由于搓剪变形的存在,接触复合表面的变形易于发生,因此复合变形的临界值较小,利于达到复合的效果<sup>[35~37]</sup>。

#### (4) 轧制力和力矩

在异步轧制条件下,被复合的轧件变形流动较为容易,轧制力将明显减小<sup>[38]</sup>,轧制力矩的变化随压下量的变化将发生性态上的改变,就复合所要求的变形程度而言,将出现一个轧辊为正的传动力矩,一个轧辊为负的传动力矩,但总的轧制力矩较等速等辊径轧制时有较大幅度的减小。木内学和黄永茂以及其合作者们对于异步轧制复合条件下的力学特性及其相关的一些问题应用工程法及上限法进行了较为深入和系统的研究<sup>[30,39~44]</sup>,他们的研究工作代表了目前关于异步轧制复合的研究方向,并主要从力学分析的角度来认识该工艺的基本规律。

与等辊径等辊速轧制复合相比较,异步轧制复合除在实施复合变形的的方式上有所差异外,其它做法和过程完全一致。虽然异步轧制在一定程度上解决了变形力过大的问题,但是它并未从根本上解决大变形的基本要求。由此带来的技术问题将构成当前研究的焦点。

### 1.5 评述

热轧复合的特点决定了它仍将是一种较厚复合板料的有效生产方法。等辊径等辊速复合由于变形力大,同时其它方面的优势也不突出,它将被异步复合方法所取代。但是在某些复合产品的生产中,它仍是一种有效的工艺方法。异步复合要想得到广泛的应用,还必须在工艺理论方面提出深入的研究,并以此为基础,

解决由于复合大变形要求所带来的工艺技术问题。

在工艺实施方面，热轧复合工艺相对趋于成熟。由于冷轧复合要求的变形程度较大，它与单一的金属板带材轧制工艺相比较，在变形区内金属的流动特性有着较大的差异，构成了这类复合轧制的特点，因此必须注意到下面这些基本问题<sup>[45]</sup>。

### (1) 板型的控制

较大的单道次变形将使板型的控制十分困难。为了获得良好的复合带材，应该根据被复合的金属的变形特点和复合层厚度要求的变化，正确设计轧辊辊型。

### (2) 轧件的边裂

单道次大变形极易造成轧件的边部开裂变形。这种边裂不仅会影响轧制复合效果，而且还会导致轧制成材率由于边部切损的增大而下降。在工艺实践中，除对坯料进行良好的初始均匀化退火外，在适当的情况下应考虑用软金属进行包边轧制。

### (3) 轧制异步比的合理选择

异步轧制能明显地降低轧制力和轧制力矩，同时也能较好地实现复合变形的要求。但是随着异步比的增大，搓剪变形加剧，当这种搓剪变形达到一定程度时，由于两种金属流动特性的差异将会导致复合接触表面的相对滑动，不利于复合的发生。因此，轧制异步比不宜过大，而应控制在一个适当的范围内。

### (4) 轧制速度的选择

从复合变形的角度来看，轧制速度的提高有利于复合变形，但是当轧制速度过高时，工艺控制的难度增大。轧制速度最好根据工艺操作的实际情况确定在一个比较合适的范围内。

### (5) 轧制复合后的热扩散处理

一般来说，冷轧复合后的轧件虽然已经实现了较好的复合，但是复合界面的过渡结构在很大程度上并未完全实现。要保证材料的使用效果，采用轧制后界面的热扩散处理是必不可少的<sup>[46]</sup>。

## 参考文献

- 1 李世俊,王璞其,贺秀芳,等.轧制技术国内外情况.北京:中国金属学会,1990(内部资料),120
- 2 傅作宝.冷轧板带生产.见:贺毓辛主编.北京:冶金工业出版社,1992.612~667
- 3 李正华.生产复合板的主要方法及其特点.稀有金属材料及工程,1990,19(1):71~74
- 4 林大超,赵静远.金属高温成形的粘滞流体描述.应用力学学报,1990,7(4):72~76
- 5 Burton M. S. *Metallurgical Principles of Metal Bonding*, The Welding Journal, 1954, 33(11):1051~1057
- 6 李炎,祝要民.316L/16MnR 热轧复合板界面组织结构的研究.金属学报,1995,31(12):A537~A542
- 7 高铜,臧健,卢德渊.铜铝复合太阳能材料的研究.昆明冶金研究院,1993(内部资料),103~111
- 8 陶华.热轧法生产铜钢复合板.上海金属(有色分册),1990,11(1):24~26
- 9 Durst G. *A New Development in Metal Cladding*. J. of Metals, 1956, (3): 328~333
- 10 Holmes E. *Influence of Relative Interfacial Movement and Frictional Restraint in Cold Pressure Welding*, British Welding Journal, 1959, 6(1):29~37
- 11 Rollson E. C. *Pressure Welding of Metals*, British Welding Journal, 1959, 6(1):1~4
- 12 Vaidyanath L. R, Nicholas M. G, Milner D. R. *Pressure*

- Welding by Rolling*, British Welding Journal, 1959, 6(1):13~28
- 13 王铭宗,郑红专,姚利仁. 铝-钢双金属复合轧制层厚比与轧制力的研究. 轧钢, 1994, (6):14~17
  - 14 穆承章,沈建军. 轧钢论文集. 第三集(下), 北京:中国金属学会轧钢学会塑性加工理论及技术开发学术委员会, 1985, (内部资料)180~185
  - 15 Maeda M, Teshima S. *A Study on Bonding Mechanism of Aluminum Clad Steel by Cold Rolling*, J. Inst. Iron Steel Jap., 1975, 61(7):951~962
  - 16 Lee S. H, Lee D. N. *Slab Analysis of Roll Bonding of Silver Clad Phosphor Bronze Sheets*. Mater. Sci. Tech., 1991, 7(11):1042~1056
  - 17 Huang Y. M, Hsu H. H, Lee H. J. *Analysis of Sandwich Sheet Rolling by Stream Function Method*, Int. J. Mech. Sci., 1995, 37(3):297~315
  - 18 Afonja A. A, Sansome D. H. *A Theoretical Analysis of the Sandwich Rolling Process*, Int. J. Mech. Sci., 1973, 15(1):1~14
  - 19 Suzuki H, Araki J. I Aiba M. *An Analysis Study on Mechanics in Roll Bonding of Double-layer Metal Sheet*, J. Jap. Soc. Technol. Plasticity, 1974, 15(11):931~937
  - 20 张胜华,郭祖军,胡泽豪,等. 铝/铜双金属复合工艺参数对力学性能的影响. 稀有金属, 1996, 20(增刊): 65~69
  - 21 曾润根. 热双金属室温相复合. 上海金属, 1982, 4(2):47~54
  - 22 Shirota T, Dendo T. *Some Experiments on Clad Rolling by Planetary mill in Cold Stage*, J. Jap. Soc. Technol. Plasticity

- ty, 1983, 24(1):53~58
- 23 Johnson W, Needham G. *Further Experiments in Asymmetrical Rolling*, Int. J. Mech. Sci., 1966, 8(5):443~455
  - 24 Dewhurst P, Collins L. F, Johnson W. *A Theoretical and Experimental Investigation into asymmetrical hot Rolling*, Int. J. Mech. Sci., 1974, 16(3):389~397
  - 25 汤富麟, 异步单机连轧研究. 钢铁, 1979, 14(6): 44~55
  - 26 林大超, 史庆南. 精密复合带材异步轧制工艺中的变形关系. 昆明理工大学学报, 1997, 22(1): 78~82
  - 27 史庆南, 林大超. 双金属复合轧制时轧件的弯曲方程. 轧钢, 1996. (专集):147~149
  - 28 史庆南, 林大超. 双金属复合轧制时轧件弯曲研究. 轧钢, 1996. (专集):144~146
  - 29 H. 迪吉. 等, 轧制双金属厚板和薄板的变形研究. 板带轧制科学与技术—第四届国际轧钢会论文选集, 中国金属学会轧钢专业学术委员会科教组译. 北京: 冶金工业出版社, 1990. 572~580
  - 30 M. 木内, 黄永茂. 板带不对称轧制解析模型. 板带轧制科学与技术—第四届国际轧钢会论文选集, 中国金属学会轧钢专业学术委员会科教组译. 北京: 冶金工业出版社, 1990. 513~526
  - 31 史庆南, 林大超. 双金属复合界面的热力学分析. 王洪纲主编. 热应力. 昆明: 云南科技出版社, 1996. 267~270
  - 32 段坤祥, 林大超, 史庆南. 一种双金属锻粗复合工艺. 稀有金属, 1998, 22(增刊):303~304
  - 33 Ciupik, L. F. *Mechanism of Cold Deformation Bonding of Metals During Their Simultaneous Plastic Flow*, Advanced Technology of Plasticity, Tokyo, 1984. 133~138