

## ◆特邀栏目◆

冷轧复合工艺对4004/3003/4004铝合金复合带组织和性能的影响<sup>\*</sup>宾月景,刘莹<sup>\*\*</sup>,曾勇谋,曹宇,胡梦晗

(梧州学院,机械与资源工程学院,广西梧州 543002)

**摘要:**为得到最优的冷轧复合工艺参数,提高铝合金复合带的性能,并为产业化应用提供理论参考,以4004/3003/4004层状复合铝合金为对象,采用光学显微镜、扫描电子显微镜、马弗炉和万能拉伸机等仪器设备,分析冷轧复合工艺对4004/3003/4004铝合金复合带显微组织、抗下垂性能及力学性能的影响。结果表明:冷轧复合技术可以获得更均匀的复合带包覆率,且冷轧第一道次加工率为35%可使芯层和皮层材料牢固结合。冷轧复合带的抗下垂性能随着成品前道次加工率的增加先增加后降低,而随着中间退火温度变化呈相反的变化趋势,当退火温度为420℃时,复合带抗下垂性能最差。当中间退火温度为270-370℃时,冷轧复合带材的力学性能急剧下降,退火温度为370℃时复合带材的力学性能开始稳定,此时抗拉强度和屈服强度分别为120 MPa和58 MPa,伸长率为34%,当退火温度升至420℃时,复合带材的综合力学性能较优。中间退火温度对芯材的显微组织演变具有重要影响,随着中间退火温度的增加,3003芯材的晶粒先后发生再结晶和晶粒长大,芯材的晶粒较大时复合带的抗下垂性能较好,故生产中为了获得良好的抗下垂性能可以适当提高芯材晶粒尺寸。成品前道次加工率为20%-30%,中间退火温度为370℃时,可以获得较理想的复合带材。

**关键词:**冷轧复合 铝合金复合带 包覆率 显微组织 抗下垂性能 力学性能

中图分类号:TG166.3 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2022)04-0809-08

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20220919.024

汽车在雨水、灰尘、泥泞等恶劣条件下行驶,其热交换器频繁承受热循环和振动,因此,汽车热交换器对材料要求较高,通常选择铝合金复合材料。铝合金复合带的力学性能、抗下垂性能和包覆率均匀性是汽

车热交换器的关键性能指标,直接决定着热交换器的质量和使用寿命<sup>[1,2]</sup>。

铝合金复合带是用不同牌号铝合金经过轧制复合在一起的,其中较厚的铝合金为芯材,而较薄的铝

收稿日期:2022-02-15

<sup>\*</sup>2022年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2022KY0677)和梧州学院校级科研项目(绿色建筑用高强度耐蚀铝合金复合材料研究:2020C010)资助。

## 【作者简介】

宾月景(1974-),男,博士,高级工程师,主要从事环境工程、材料化学和产业经济研究,E-mail:binyj@126.com。

## 【\*\*通信作者】

刘莹(1986-),女,硕士,高级工程师,主要从事铝合金、钢铁合金开发及应用研究,E-mail:1827585066@qq.com。

## 【引用本文】

宾月景,刘莹,曾勇谋,等.冷轧复合工艺对4004/3003/4004铝合金复合带组织和性能的影响[J].广西科学,2022,29(4):809-816.

BIN Y J,LIU Y,ZENG Y M,et al. Effects of the Cold Rolling Composite Process on Microstructure and Properties of 4004/3003/4004 Aluminum Alloy Composite Strip [J]. Guangxi Sciences,2022,29(4):809-816.

合金为皮材, 铝合金复合带材兼具芯材和皮材的优良性能。铝合金复合带的制备方法主要有热轧复合法和冷轧复合法<sup>[3]</sup>。热轧复合法生产技术是一种比较成熟的技术, 但在热轧复合前需进行焊接, 且热轧时复合面之间易产生气泡, 另外热轧复合是在再结晶温度上轧制的, 轧制过程中材料不断降温, 材料的包覆率难以控制, 面临成品率低、产品最终性能波动大等困境。冷轧复合技术在室温下轧制, 避免了焊接和高温轧制材料易变形的的问题, 冷轧复合带的性能良好、成品率高、包覆率均匀, 已被广泛应用于汽车水箱、油冷箱、散热器和冷凝管等多个部件, 具有广泛的应用前景<sup>[4,5]</sup>。

众多学者对铝合金复合材料的组织、力学性能和抗下垂性能进行了研究。张新明等<sup>[6]</sup>围绕中间退火工艺研究铝合金复合箔的抗下垂性能。田国建等<sup>[7]</sup>研究了钎焊复合箔“铸轧-冷轧复合”短流程生产工艺开发。陈成<sup>[8]</sup>以冷轧成品道次加工率为变量, 研究了成品道次加工率对力学性能和钎焊时抗下垂性能的影响。上述学者的研究表明: 轧制复合过程中合理的第一道次加工率、中间退火温度和成品道次加工率可以提高复合材料的包覆率均匀性、力学性能和钎焊性能。但随着科学技术的发展, 目前的复合带已不能满足抗下垂性能和力学性能的要求<sup>[9,10]</sup>。为了解决这一问题, 本研究先确定第一道次加工率, 再以中间退火温度、成品道次加工率为变量, 研究冷轧复合工艺对铝合金复合带组织、抗下垂性能和力学性能的影响, 得到最优的工艺参数, 为产量化应用提供理论参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料

本试验选用铸锭均为外购, 以 3003 铝合金作芯

材, 4004 铝合金作皮材, 测得其化学成分如表 1 所示。

表 1 芯材和皮材的化学成分 (wt%)

Table 1 Chemical composition of the core material and leather material (wt%)

合金牌号 Alloy designation	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
3003	0.30	0.55	0.13	1.40	-	Balance
4004	9.60	0.30	0.20	0.05	1.62	Balance

Note: "-" means that the mass fraction of Mg is less than 0.05%

### 1.2 方法

#### 1.2.1 冷轧复合带的制备

图 1 是冷轧复合带的制备流程。首先将 400 mm 厚的 3003 铝合金芯材和 4004 铝合金皮材铸锭在 500℃ 进行预热, 保温 5 h。然后分别将铸锭热轧至厚度约 4 mm, 得到 3003 和 4004 铝合金坯料卷, 空冷备用。接下来在室温下将 4004 铝合金皮材坯料卷冷轧至目标厚度 0.86 mm, 然后再对坯料卷分别进行碱洗 (碱洗工艺: 20% NaOH, 5 min, 60℃)、60℃ 的清水冲洗、酸洗 (酸洗工艺: 20% HNO<sub>3</sub>, 60℃) 和 60℃ 的清水冲洗。最后将 4004 皮材/3003 芯材/4004 皮材坯料卷复合在一起得到复合坯料, 并对该复合坯料冷轧 3 个道次后得到 0.8 mm 厚度的 4004/3003/4004 复合带坯料, 进行中间退火, 消除材料的加工硬化, 继续冷轧至 0.6 mm 厚度得到 4004/3003/4004 层状复合带材。

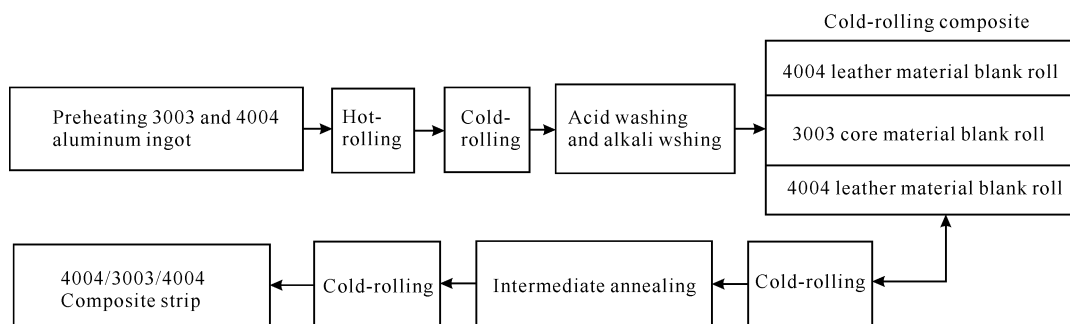


图 1 冷轧复合带的制备流程

Fig. 1 Preparation flow of cold-rolling composite strip

### 1.2.2 热轧复合带的制备

图 2 是热轧复合带的制备流程。首先将 4004 铝合金皮材铸锭按 1.2.1 节的加热条件加热, 然后热轧至 86 mm, 得到 4004 铝合金皮材坯料板, 锯切成所需的长度, 与 3003 铝合金芯材铸锭组合并焊接在一起得到 4004 皮材坯料板/中间 3003 芯材铸锭/4004

皮材复合坯料板(组合前需用工业酒精对复合面清洗, 以清除材料表面的油污、铝屑, 防止复合面产生气泡), 然后将该复合坯料板分别进行预热、热轧、冷轧、中间退火等工序生产, 得到 0.6 mm 厚度的 4004/3003/4004 层状复合带。

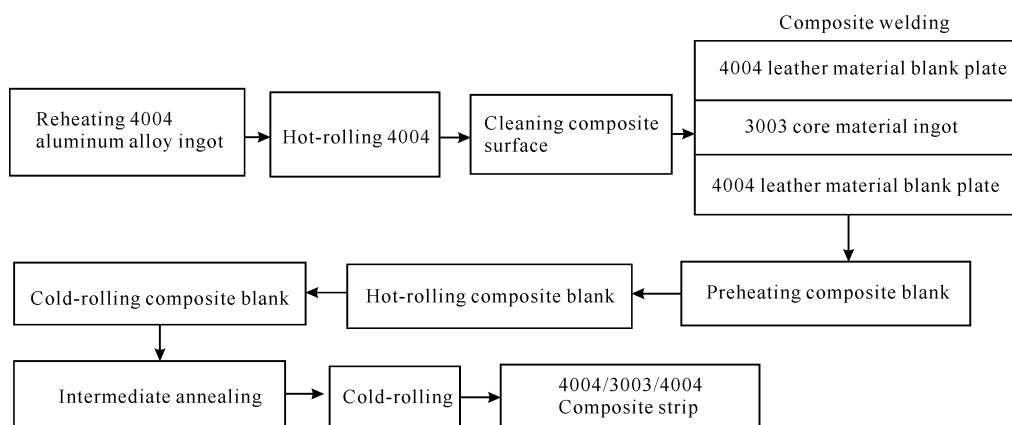


图 2 热轧复合带的制备流程

Fig. 2 Preparation flow of hot-rolling composite strip

### 1.2.3 包覆率的选取及测试

对热轧和冷轧工艺下的复合带沿整个宽度取 200 mm 长的样品各 1 块, 再沿宽度方向分别在 100 mm、300 mm、500 mm、700 mm、900 mm 和 1 100 mm 处取样品。将样品经过 400 #、1000 # 和 1200 # 金相砂纸打磨、抛光、Keller 试剂腐蚀后在 YVARMET 型光学显微镜下测量其包覆率及其均匀性。

### 1.2.4 复合带显微组织的分析

众多学者的研究表明冷轧复合带的第一道次加工率在 30% - 50% 为佳<sup>[7]</sup>, 本研究结合实际生产成品率和效率选用冷轧第一道次加工率为 35%。完成首道次轧制后取样品 1 个, 在 YVARMET 型光学显微镜下观察样品的微观组织, 若复合面平直且分界面清晰, 则判定此加工率能使复合面达到良好的初结合。

中间退火温度分别选用 270℃、320℃、370℃、420℃ 和 480℃, 各保温 1.5 h。取不同中间退火工艺下的成品厚度样品, 对样品进行打磨、抛光、腐蚀后在 JSM-5600 LV 扫描电镜下观察芯材晶粒电子背散射衍射 (Electron Backscattered Diffraction, EBSD) 大小。

### 1.2.5 复合带下垂值和力学性能的测试

测量不同中间退火温度下复合带的下垂值, 并用 QX-W550 拉伸试验机检测成品的力学性能。

取成品样 15 个, 将样品分为 5 组, 每组 3 个, 测试复合带在成品前道次加工率分别为 15%、25%、35%、45%、55% 的下垂值。

不同温度和加工率的抗下垂试验参照日本标准装置测试<sup>[11]</sup>。将试样装置放入 (600 ± 3)℃ 马弗炉中进行加热, 保温 5 min, 然后在炉外空冷。用游标卡尺测量样品的下垂值, 下垂值越小说明抗下垂性能越好<sup>[12,13]</sup>。

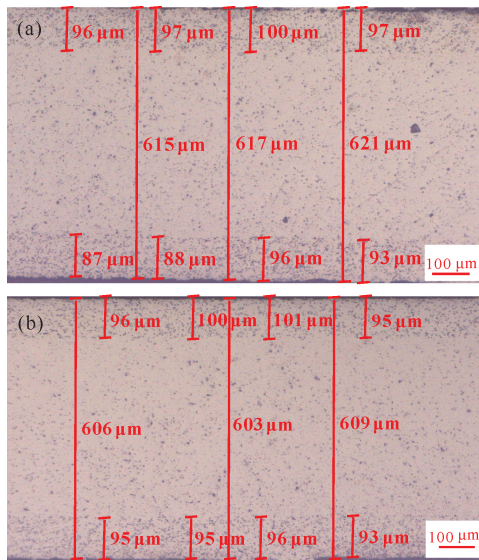
## 2 结果与分析

### 2.1 冷轧复合工艺对包覆率的影响

由图 3 和图 4 可以看出, 两种复合工艺生产的复合带均是上包覆率大于下包覆率。冷轧复合带的上包覆层厚度和下包覆层厚度分别为 96 - 100 μm 和 87 - 96 μm, 热轧复合带的上包覆层厚度和下包覆层厚度则分别为 95 - 101 μm 和 93 - 96 μm。表明冷轧复合技术可以使复合带获得更小的包覆层厚度。图 4 为冷轧复合带和热轧复合带包覆率沿板材宽度方向的变化曲线, 可以看出, 冷轧复合带材的包覆率偏差为 0.6%, 而热轧复合带的包覆率偏差为 1.0%, 表明冷轧复合带材具有更均匀的包覆率。这是由于冷轧复合是在室温下完成的, 规避了热轧复合的缺陷。因此两种生产工艺比较, 冷轧复合技术更优。

### 2.2 冷轧复合工艺对复合带组织的影响

图 5 是冷轧复合时, 第一道次冷轧 35% 后的微



(a) Cold-rolling composite strip; (b) Hot-rolling composite strip

图3 不同复合工艺生产的复合带金相图

Fig. 3 Metallographic diagram of composite strip produced by different composite processes

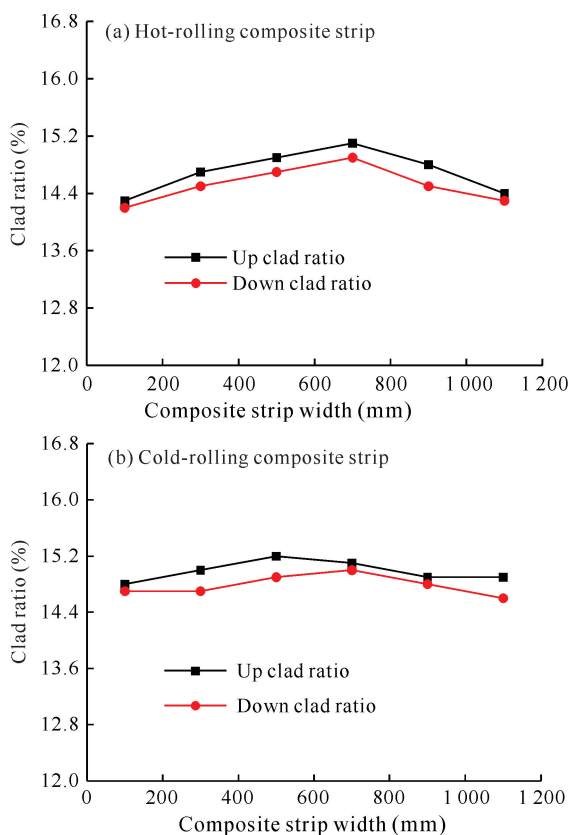


图4 不同复合工艺生产的复合带上、下包覆率分布图

Fig. 4 Distribution diagram of up and down clad ratio of the composite strip produced by different composite processes

观组织形貌。从图5可以看出,冷轧复合过程中第一道次加工率为35%时可以完成紧固的界面粘合,复合界面处分界线明显且平直。因此,本研究的相关性能和显微组织研究均以冷轧第一道次加工率为35%的复合带材为对象。

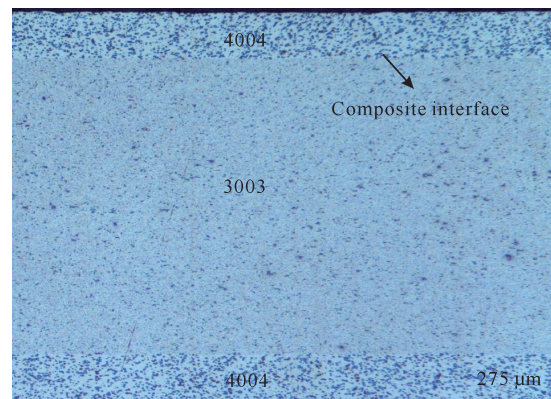


图5 第一道次轧制后的微观组织形貌

Fig. 5 Microstructure after the first pass rolling

冷轧复合时不同退火温度下芯材3003铝合金的EBSD形貌如图6所示,可以看出,当中间退火温度为270℃和320℃时,芯材的组织仍然是轧制态的细长纤维状组织。当中间退火温度升至370℃时,芯材的组织由轧制态的纤维状组织和细小的再结晶状组织组成,并且以纤维状组织为主,说明在该退火温度下,芯材组织无法完成再结晶。随着退火温度升高至420℃,轧制态的纤维状组织几乎完全消失,芯材的组织全部为再结晶组织,晶粒尺寸为4-80 μm,但大部分晶粒尺寸小于40 μm。继续升高温度至480℃,芯材的组织仍然为再结晶组织,晶粒尺寸为10-100 μm,但大部分晶粒尺寸大于40 μm,可见晶粒的尺寸明显比420℃温度下的晶粒大,即温度升高使再结晶晶粒长大,这也表明中间退火温度对复合带的晶粒尺寸和形貌有重要影响。

### 2.3 冷轧复合工艺对抗下垂性能的影响

如图7所示,冷轧复合带的下垂值随着中间退火温度的上升呈先降低后升高然后再降低的变化趋势,退火温度在370℃之前,复合带的下垂值随着退火温度的升高急剧下降,其值由30 mm降至6 mm;当退火温度为370-420℃时,复合带的下垂值出现小幅度上升,其值由6 mm变为12 mm;当退火温度由420℃升至480℃时,复合带的下垂值略呈下降趋势,下垂值由12 mm降为7 mm。由此可见,当退火温度为370℃时复合带的下垂值最小,为6 mm,说明此中间退火温度下复合带的抗下垂性能最好,在使用过

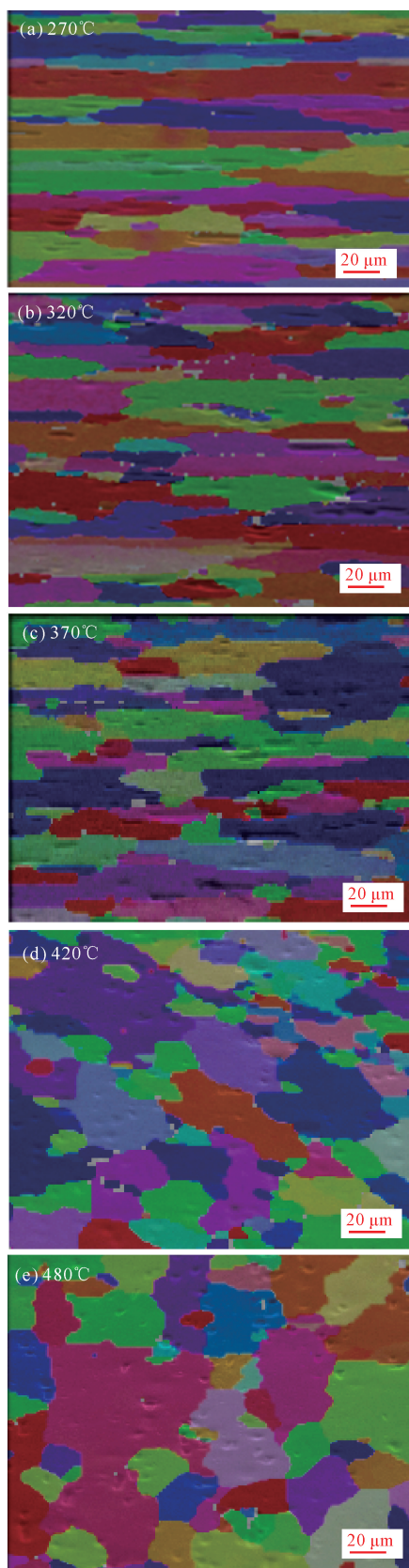


图 6 冷轧复合时不同退火温度下芯材的 EBSD 图

Fig. 6 EBSD diagram of cold-rolling composite core material at different annealing temperatures

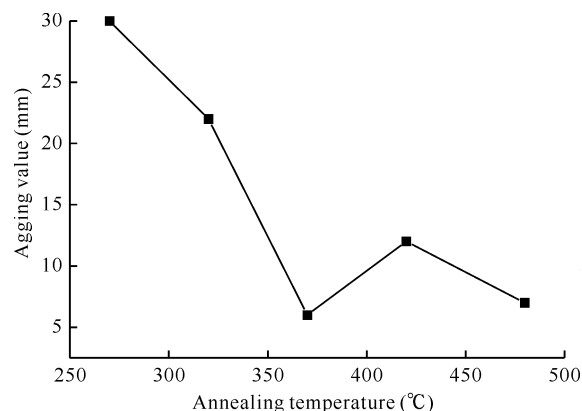


图 7 复合带下垂值随中间退火温度的变化

Fig. 7 Change of the agging value of composite strip with intermediate annealing temperature

程中不易发生塌陷。因此,选择在该中间退火温度下研究成品前道次加工率对复合带材抗下垂性能的影响。

如图 8 所示,当成品前道次加工率为 25% 时,复合带的下垂值最小,说明复合带材在成品前道次加工率为 25% 时拥有最好的抗下垂能力,且加工率为 20% - 30% 时,复合带的抗下垂性能均较低,因此,20% - 30% 均为较理想的成品前道次加工率。

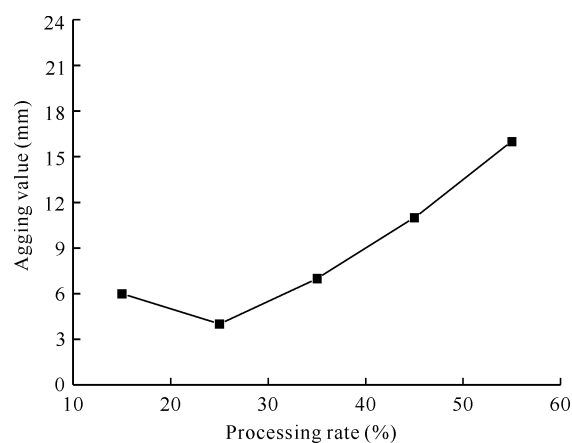


图 8 370°C 中间退火温度下成品前道次加工率对复合带下垂值的影响

Fig. 8 Effects of pre-processing rate of finished product agging resistance properties of composite strip at 370°C intermediate annealing temperature

#### 2.4 冷轧复合工艺对力学性能的影响

图 9 是复合带在不同退火温度下的力学性能变化曲线。由图 9 可以看出,以成品前道次加工率为 25% 的成品复合带为对象,随着中间退火温度不断升高,复合带的抗拉强度和屈服强度先急剧下降,当退火温度为 370°C 时趋于平缓,此时复合带的抗拉强度及屈服强度分别是 120 MPa 和 58 MPa,而伸长率的

变化与抗拉强度和屈服强度的变化则相反,即复合带的伸长率随着退火温度的上升先急剧上升后趋于平缓,开始趋于平缓的退火温度为 370℃,此时伸长率为 34%,当中间退火温度继续升至 420℃时,复合带的伸长率达到最大值 35%,此时复合带的综合力学性能较优。

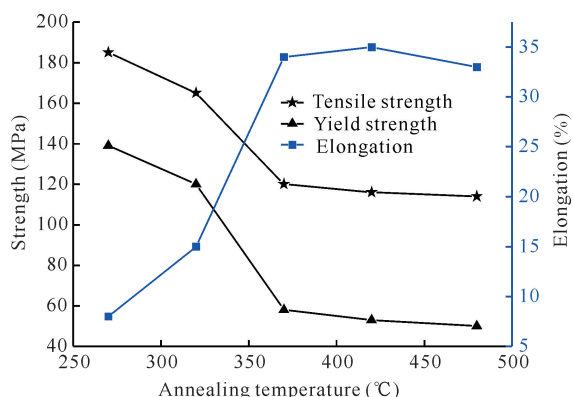


图9 不同退火温度后复合带的力学性能变化

Fig. 9 Changes of the mechanical properties of the composite strip after different annealing temperatures

### 3 讨论

#### 3.1 包覆率

包覆率及其稳定性是影响复合带品质的重要指标,因此复合带对包覆率有严格的规定。如果包覆率较小,钎焊过程中会出现因钎料少而发生脱焊或者假焊的现象<sup>[14,15]</sup>;如果包覆率较大,芯材的厚度减少,会导致散热器在 600℃钎焊时极易发生塌陷<sup>[5]</sup>。根据经验,本研究初定的包覆率是 15%,结合本研究结果,不论是冷轧复合还是热轧复合生产的复合带,均是上包覆率大于下包覆率,与周劲等<sup>[16]</sup>的研究结果一致。这可能是由于轧制时下层皮材直接与轧机辊道接触增加了摩擦力,再加上复合铸锭的重量,使得下层皮材更容易变形。目前冷轧复合和热轧复合均会存在包覆率不均匀问题。冷轧复合带材的包覆率偏差明显比热轧复合带材小,这是由于热轧复合是在高温下轧制的,材料在轧制过程中会明显降温,导致整个包覆板变形不均,使包覆率偏差更大。而冷轧复合是在室温下轧制的,温度恒定,不存在因降温而改变轧制条件的现象,因此包覆率更均匀。

#### 3.2 第一道次加工率

冷轧复合技术的第一道次加工率至关重要,直接决定轧制能否成功。若第一道次加工率过小,芯材和皮材未出现紧密结合的界面;反之,轧制则易出现严重的加工硬化。众多学者发现第一道次加工率一般

在 30%–50%为佳,如陈成<sup>[8]</sup>研究发现第一道次加工率为 30%–50%时均可以实现良好的界面结合效果,第一道次加工率越大,轧制的道次越少,生产效率越高;第一道次加工率超过 40%后,复合带裂变越来越严重,切边量也越大,还易出现板形不良的情况,降低成品率;第一道次加工率低于 30%,需要的总轧制道次增多,生产效率慢。孙利娜<sup>[17]</sup>研究冷轧复合的机理发现,界面结合通过不同层材料间原子互相扩散达到紧密“咬合”,为了实现这一结合,必须有较大的加工率,加工率为 30%–40%时,不但可以获得良好的界面结合效果,还可以获得更均匀的材料厚度,板形也更平直;但加工率超过 50%,金属易出现加工硬化现象,甚至出现变形层破坏的情况。田国建等<sup>[7]</sup>研究发现,冷轧复合轧制时第一道次加工率非常重要,加工率为 50%最佳,此时界面结合效果好,分界面清晰可见;加工率低于 50%则不利于结合面的机械结合;反之,加工率过大则破坏了材料内部的结构,无法实现良好的界面结合。本研究所用材料较薄,采用较大的第一道次加工率会出现严重裂边,大大降低成品率。综上所述,本研究的第一道次加工率选用 35%为宜。

#### 3.3 抗下垂性能

冷轧复合带的成品前道次加工率和中间退火温度会影响复合带的抗下垂性能,而抗下垂性能也是衡量复合带品质的重要指标。众多学者对复合带材的抗下垂性能进行了研究,高旭东等<sup>[18]</sup>发现抗下垂性能与芯材再结晶晶粒尺寸有一定关联。芯材的晶粒越大,复合带材的抗下垂性能越好。靳丹萍等<sup>[19]</sup>发现,再结晶晶粒尺寸增大可以显著提高材料的抗下垂性能。晶粒尺寸越大,单位面积内晶粒个数越少,晶界越少,元素向芯材扩散的通道变少,从而提高复合带的抗下垂性能。这是由于在退火过程中,复合带材会同时发生再结晶和 Si 元素扩散,且 Si 元素向芯材的扩散对材料抗下垂性能的影响大于再结晶。这就是复合带的下垂值随着退火温度的上升先降低后增加然后再降低的原因。成品前道次加工率也会影响复合带材的抗下垂性能,陈成<sup>[8]</sup>研究发现,当成品前道次加工率小于 20%时,芯材晶粒细小,数量较多,分布不均,材料的抗下垂性能明显降低。张新明等<sup>[6]</sup>研究发现,当前道次加工率变大时,变形量增加,储能也随之增加,使得晶粒尺寸越小,晶界越多,在钎焊时增加了 Si 元素向芯层材料扩散的通道,从而使复合带的抗下垂能力变差。本研究的复合带下垂值随着

成品前道次加工率的增大呈先降低后增加的变化趋势,当加工率为20%~30%时,下垂值较小,抗下垂性能较好。

### 3.4 力学性能

成品前中间退火温度对复合带力学性能有着显著影响:即随着退火温度不断上升,其抗拉强度和屈服强度先急剧下降后趋于平缓,这是复合带在退火过程中其内应力逐步释放而使材料软化所致。当退火温度为420℃时,复合带的伸长率最大,其力学性能更稳定,但复合带的抗下垂性能较差。结合2.2节的分析结果,370℃和480℃时芯材晶粒尺寸虽然较大,但在这两种温度下材料的抗下垂性能较好,力学性能仅比420℃时稍低一点,兼顾实际生产效率,370℃的退火温度较为理想。

综上,本文通过研究不同的冷轧复合工艺参数对铝合金复合带组织和性能的影响,得出最优工艺参数为成品道次加工率20%~30%和中间退火温度370℃,可为工业化大生产冷轧复合带提供技术参考。

## 4 结论

本研究结果表明,冷轧复合工艺对4004/3003/4004铝合金复合带组织和性能有重要影响。总体来说,与热轧复合带相比,冷轧复合带的包覆率更加均匀,冷轧复合时第一道次加工率是复合的关键,本研究发现第一道次加工率为35%时可以实现紧固黏合。中间退火温度对复合带材的力学性能影响较明显,复合带材的抗拉强度和屈服强度随着中间退火温度的升高先急剧下降后趋于稳定,而伸长率则呈现相反趋势。此外中间退火温度对芯材的晶粒也有较明显影响,随着中间退火温度的升高,芯材晶粒先后发生再结晶和长大,芯材晶粒较粗大,有利于提高复合带材的抗下垂性能。随着成品前道次加工率的增加,复合带的抗下垂性能先增加后降低。本研究结果为深入探索更合适的复合工艺打下基础,有助于产业化应用。

### 参考文献

- [1] ZHAO Y Y, ZHANG Z Y, JIN L. Effects of annealing process on sagging resistance of cold-rolled three-layer Al alloy clad sheets [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(10): 2542-2551.
- [2] 陈成, 吴佳丽. 改善复合箔抗下垂性能的生产工艺研究[J]. 中国金属通报, 2018(8): 184-185.
- [3] 凌亚标, 朱松. 含Mg铝合金多层复合钎焊板在汽车热交换器领域的应用[C]//中国有色金属加工工业协会. 中国铝加工产业年度大会论文集(下册). 北京: 中国有色金属加工工业协会, 2020: 687-694.
- [4] 张云龙, 张文静, 张璇, 等. 高频焊管复合板组织和抗下垂性能的试验研究[J]. 铝加工, 2020(4): 16-21.
- [5] 莫肇月, 朱玉涛, 刘莹, 等. 铝合金双铸造组织坯料对钎焊复合带材性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(18): 115-117.
- [6] 张新明, 张静, 唐建国, 等. 中间退火对4343/3003/7072汽车热交换器用铝合金复合箔抗下垂性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(1): 59-65.
- [7] 田国建, 刘前换, 史明飞, 等. 钎焊复合箔“铸轧-冷轧复合”短流程生产工艺开发[J]. 有色金属材料与工程, 2022, 43(2): 44-50.
- [8] 陈成. 冷轧成品道次压下率对3003MOD合金H14力学性能和钎焊时抗下垂性能的影响[C]//中国有色金属加工工业协会. 中国铝加工产业年度大会论文集(下册). 北京: 中国有色金属加工工业协会, 2020: 588-594.
- [9] 王英君, 雷金琴, 鲁月, 等. 中间退火与冷轧压下率对3003铝合金组织及抗下垂性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2020, 48(5): 17-22, 28.
- [10] 朱玉涛, 刘莹, 莫肇月. 铸造包覆板对汽车热交换器用铝合金复合箔抗下垂性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(5): 19-24.
- [11] Committee of Low Temperature Joining. Optimization of sag test for evaluation of brazeability of aluminum fin Materials [J]. Journal of Light Metal Welding & Construction, 1989, 27(9): 1.
- [12] 黎勇, 张莉, 陆佳. Si元素扩散对4343/3003/7072铝合金复合带性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(22): 128-130.
- [13] 张静. 轧制及退火工艺对4343/3003/7072钎焊箔性能的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [14] 张国伟. 铝合金热轧复合卷包覆率测量不确定度评定[J]. 轻工科技, 2019, 35(4): 133-134.
- [15] 许秋平. 加工工艺和钎焊制度对热交换器复合箔箔抗下垂性能的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2017.
- [16] 周劲, 张戡. 4004/3003/4004铝合金复合钎焊板包覆率研究[J]. 铝加工, 2020(2): 20-24.
- [17] 孙利娜. 冷轧复合的力学机理与电脉冲辅助复合轧制实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [18] 高旭东, 赵媛媛, 靳丽, 等. 复合铝箔中铝合金芯材的成分优化及高温抗下垂性能[J]. 机械工程材料, 2018, 42(8): 11-17.
- [19] 靳丹萍, 刘欢欢, 赵杰. 热处理对钎焊铝箔翅片料抗下垂性能的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2018, 39(5): 19-23.

# Effects of the Cold Rolling Composite Process on Microstructure and Properties of 4004/3003/4004 Aluminum Alloy Composite Strip

BIN Yuejing, LIU Ying, ZENG Yongmou, CAO Yu, HU Menghan

(School of Mechanical and Resource Engineering, Wuzhou University, Wuzhou, Guangxi, 543002, China)

**Abstract:** In order to obtain the optimal cold rolling composite process parameters, improve the properties of aluminum alloy composite strips, and provide a theoretical reference for industrial applications, 4004/3003/4004 laminated composite aluminum alloy was taken as the object. The effects of cold rolling composite process on the microstructure, sagging resistance and mechanical properties of 4004/3003/4004 aluminum alloy composite strips were analyzed by optical microscope, scanning electron microscope, muffle furnace and universal stretching machine and other equipment. The results show that more uniform cladding rate of composite strip can be obtained by cold rolling composite technology, and cold rolling one pass processing rate of 35% can make the core layer and cortex material achieve a strong combination. The sagging resistance of cold rolling composite strip first increases and then decreases with the increase of pre-processing rate of the finished products, while it shows an opposite trend with the change of intermediate annealing temperature. The sagging resistance of composite strip is the worst when the annealing temperature is 420°C. The mechanical properties of the cold rolling composite strip decrease sharply when the intermediate annealing temperature is 270–370°C. The mechanical properties of the composite strip begin to stabilize when the annealing temperature is 370°C. At this time, the tensile strength and yield strength are 120 MPa and 58 MPa, respectively, and the elongation is 34%. The comprehensive mechanical properties of the composite strip are better when the annealing temperature rises to 420°C. The intermediate annealing temperature has an important influence on the microstructure evolution of the core material. The grains of 3003 core material have recrystallized and grown successively with the increase of the intermediate annealing temperature. The sagging resistance of the composite strip is better when the grains of the core material are larger. Therefore, in order to obtain good sagging resistance in production, the grain size of the core material can be appropriately increased. The ideal composite strip can be obtained when the pre-processing rate of the finished product is 20%–30% and the intermediate annealing temperature is 370°C.

**Key words:** cold rolling composite; aluminum alloy composites strip; clad ratio; microstructure; sagging resistance; mechanical properties

责任编辑: 陆 雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>