

温轧工艺对铝镍复合板组织性能的影响

曲之豪¹,王重懿¹,付金禹²,许光明¹,李 勇³

(1. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室,沈阳 110819;

2. 东北轻合金有限责任公司,哈尔滨 150060;

3. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室,沈阳 110819)

摘要:工业生产的铝镍复合板在某些应用领域中需要轧制减薄才可以投入使用,不同的轧制工艺对铝镍复合板组织性能的影响机制值得深入研究。改变温轧加热温度和轧制压下量获得了不同的铝镍复合板,利用 SEM、EDS、XRD 等测试复合板的显微组织,借助万能试验机测试复合板的力学性能。结果表明,在不同加热温度下进行 40% 压下量温轧,通过扫描电镜观察到复合界面的形貌从温度较低时的交错状演变为温度较高时的平整状。将复合板加热至 200 ℃ 保温 1.5 h,进行不同压下量试验,随着压下量的增加界面破碎现象越来越严重。加热至 200 ℃ 保温 1.5 h 进行 40% 压下量,复合板的界面结合效果最好。

关键词:铝镍层状复合板;温轧工艺;轧制减薄;界面结合强度

中图分类号:TG146.21;TG339 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-7235(2025)01-0028-08

Effect of the warm rolling process on the microstructure and properties of Al-Ni composite plate

QU Zhihao¹, WANG Zhongyi¹, FU Jinyu², XU Guangming¹, LI Yong³

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Northeast Light Alloy Co., Ltd., Harbin 150060, China;

3. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Al-Ni composite plates produced in industry often require rolling to reduce thickness in different application fields before they can be put into use. The effects of different rolling processes on the structure and performance of Al-Ni composite plates deserve further study. Different Al-Ni composite plates were obtained by changing heating temperature and rolling reduction of the warm rolling process. SEM, EDS, XRD and other test methods were used to analyze the microstructure of the composite plate, and the mechanical properties of the composite plate were characterized with the help of a universal testing machine. After warm rolling with 40% reduction under different heating temperatures, different morphologies of the composite interface can be observed by SEM, from the interleaved pattern at lower temperature to the flat pattern at higher temperature. After heating to 200 ℃ and holding for 1.5 h, the test with different rolling reductions was carried out. With the increase of

收稿日期:2024-10-22

基金项目:南宁市科技重大专项项目(20231037)

第一作者简介:曲之豪(2000-),男,辽宁沈阳人,硕士研究生

通信作者简介:许光明(1966-),男,浙江金华人,教授、博士

rolling reduction, the interface fragmentation became more and more serious. The results show that the composite plates have the optimal bonding after heating to 200 °C, holding for 1.5 h and rolling with 40% reduction.

Key words: Al-Ni layer composite plate; warm-rolling process; rolling thinning; interfacial bonding strength

随着我国“碳达峰”和“碳中和”战略的实施,开发和利用轻质金属材料已经是大势所趋。具有特定结构和特定功能的新型复合材料及其制造工艺正在迅速发展,而开发和制造轻质金属层状复合材料已经成为当前的研究热点^[1]。铝合金以其轻质、良好的塑性、良好的导电和导热性能在汽车制造、电子电路、武器装备等方面具有广泛的应用。但较差的耐高温、耐蚀性和较低的强度、硬度限制了其应用范围的进一步扩大。镍合金因其耐高温、耐腐蚀、低电阻、高强度、高硬度等特点,可广泛用于热处理、石化、自动化设备等工业重要装备的制备,但其较低的塑性、较差的韧性和较高的成本限制了它在工业生产中的应用^[2]。铝镍复合板是将铝、镍两种金属以特定的工艺进行复合而成。既保留了铝、镍两种金属独特的性能,又具有互补效应,可获得轻质、高强、耐高温、耐腐蚀、低电阻、高能量密度等优点。在高温结构件、电池制造、兵器制造等方面具有重要应用^[3-4]。

金属复合板的制备是一个复杂的过程。固-固相复合法和固-液相复合法是目前常用的制备方法^[5]。固-固相复合法中的爆炸复合法、轧制复合法是常用的铝镍复合板制备方法^[6-10]。

轧制复合法的主要工作原理是利用两个或多个表面预处理的金属直接接触,在轧制过程中受到强大的轧制力,使被包覆金属表层的氧化物膜发生破裂暴露出新鲜金属,从而达到金属连接的目的^[11]。此方法具有成本低、生产效率高、可实现规模化生产等优点,但复合界面强度较低、且内应力较大。

固-液铸轧复合法是将铸轧技术与轧制技术相结合而产生的一种新的生产方法^[12]。其基本工作原理是利用不同金属间的熔点差别,连续均匀地将低熔点的液态金属浇注到高熔点的固体金属上,使得异质金属分别以固体、液体两种形态进入轧机内,通过转动的轧辊快速冷却形成扩散流动,最后在轧制力与半固态金属的扩散作用下实现界面结合^[13]。固-液铸轧复合法容易实现自动化生产,从而降低成本,提高生产效率。

不同的工业应用领域对铝镍复合板的厚度有不同的要求,铝镍铸轧板需要轧制减薄才能投入实际应用。目前,在铝镍复合板轧制减薄方面已经开展了许多研究并取得了一定成果。杜恺^[14]通过改变冷轧轧制参数研究冷轧对铝镍复合板的影响,指出铝镍复合板冷轧压下率低于30%可以得到良好表面形貌;压下率为40%时会发生边裂,但界面结合性能较好;压下率为50%时板材表面会发生撕裂。铸轧复合板常常需要退火减小内应力才能进行轧制减薄。刘心昆^[15]研究了在不同退火温度下,铝镍复合板复合界面金属间化合物的生长规律,发现在400~500 °C退火温度范围内只有 NiAl_3 和 Ni_2Al_3 两种金属间化合物。 NiAl_3 化合物的形核及生长主要受体扩散和晶界扩散的影响,其生长规律比较复杂; Ni_2Al_3 化合物的形核及生长主要受体扩散的影响,其生长呈抛物线规律。祖国胤等^[16]指出铝镍复合带的退火需要严格控制退火温度,退火过程中金属间化合物首先在界面能量较高的区域形核并迅速长大,之后完成生长的各区域沿复合界面连接为一个整体,并在达到一定层厚后不会随着退火时间的继续延长而继续增厚。

尽管关于铝镍复合板的研究很多,但作为一种新兴的复合方法,在许多方面仍有优化空间。如现有的冷轧减薄,减薄后的复合界面处会有较大的残余应力,且加工硬化效果较为明显,需要进行退火,退火工艺一般需要较长的冷却时间,在工业生产中降低了生产效率^[17]。

本试验采用水平铸轧法制备铝镍复合板,并采用温轧对铸轧复合板进行轧制减薄,研究温轧加热温度与轧制压下量对铝镍复合板组织性能的影响,分析复合界面在轧制变形中的变化机制,为铝镍复合板的轧制减薄工艺以及协同变形研究提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

铸轧复合试验中使用1060铝合金为基体,高纯镍带为增强带,制备铝镍铸轧复合板。1060铝合金

的主要化学成分见表 1。高纯镍带中镍含量在 99.5% 以上,耐蚀性强、导电导热性好、电阻率低。

表 1 1060 铝合金的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Main composition of the industrial pure aluminum 1060(wt/%)

Al	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	其他
99.60	0.10	0.10	0.05	0.03	0.03	余量

1.2 试验方法

首先对 1060 铝合金进行熔化,在熔化之前,将所有与 1060 铝合金直接接触的试验器具表面均匀地覆盖一层钛白粉,烘干,以避免在铝熔体中混入湿气而发生喷溅或爆炸。将 1060 铝合金置于电阻炉中,加热温度到 800 ℃,待纯铝熔融后,将电阻炉的温度降到 725 ℃并保持 30 min,再用六氯乙烷进行除气,等待铸轧。

高纯镍带在试验前,必须用丙酮、乙醇等溶剂除去表面的油迹和水分,还需要对轧辊辊面进行清理、打磨后再烤上碳膜,以免在铸轧时产生粘辊现象。将铸嘴置于烘箱中 200 ℃保温 12 h,将镍带置于 150 ℃烘箱中保温 2 h。铸轧前用高温喷枪烘干导流槽 30 min,以除去水分。

利用自研的卧式双辊铸轧机制备出铝镍复合板。铸轧时先向轧辊内导入冷却水再开始铸轧,在稳定持续地轧出铝薄板后,将已处理过的高纯度镍带沿着上辊与铸嘴之间的缝隙送进铸轧区,获得厚度为 3 mm 的铝镍复合板。

进行温轧试验前,将准备好的铝镍复合板分别在 200、250、300 ℃温度保温 1.5 h,然后进行 30%、40%、50%、60% 压下量的温轧试验。

在铝镍复合板中间部分切割 13 mm × 11 mm 试样,观察组织形貌。切割拉伸试样尺寸如图 1 所示。剥离试样尺寸如图 2 所示,剥离试样厚度随工艺参数变化而变化。通过 SSX-550 型扫描电镜观察界面处微观组织。采用 D/max-2500PC 型 X 射线衍射仪分析试样剥离界面的相。采用 JEOL JXA-8530F 场发生电子探针进行线扫描检测界面处扩散层厚度。采用 INSTRON 4206 型 100 kN 拉伸机进行试样的力学性能测试。硬度的测量采用 KB3000BURZ-SA 型万能硬度计,在复合界面处、界面两侧每间隔 30 μm 取一个点,共 9 个点进行初始载荷为 100 N,载荷时间为 10 s 的试验。

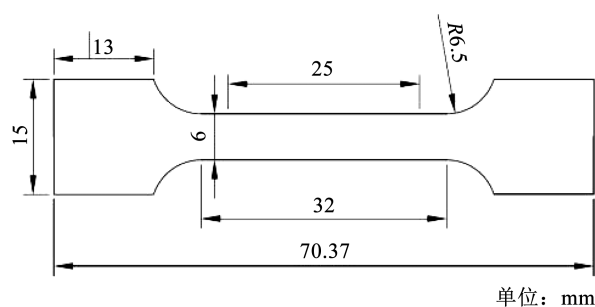


图 1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of the tensile sample

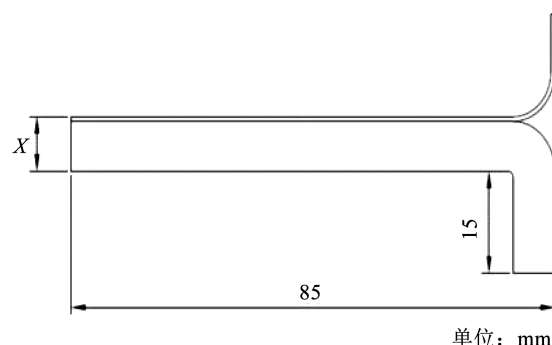


图 2 剥离试样尺寸

Fig. 2 Dimensions of the peeled sample

2 结果与分析

2.1 加热温度对铝镍复合板的影响

2.1.1 对铝镍复合板微观组织的影响

图 3 为铸轧态和不同温轧加热温度保温 1.5 h,轧制压下量为 40% 的铝镍复合板复合界面的 SEM 图像。由图 3a 可知,铸轧态复合板复合界面整体较为平整,界面偶有交错,且交错不明显。图 3b 为 200 ℃加热温度下复合板微观组织形貌,原来铸轧态连续的界面在轧制力的作用下出现较多交错,且明显突出。图 3c 为 250 ℃加热温度下复合板微观组织形貌,在此温度下复合界面从交错状逐渐恢复成平整状。图 3d 为 300 ℃加热温度下复合板微观组织形貌,复合界面平整连续,几乎没有交错形貌。由此可见随着加热温度的增加,复合界面越来越平整。对铸轧复合板进行温轧减薄时,复合界面一方面会在轧制力的作用下发生变形,另一方面会由于温度升高加剧铝镍原子间的扩散反应而使界面平整。因此在温轧过程中,复合界面的形貌是两方面综合作用的结果^[18]。

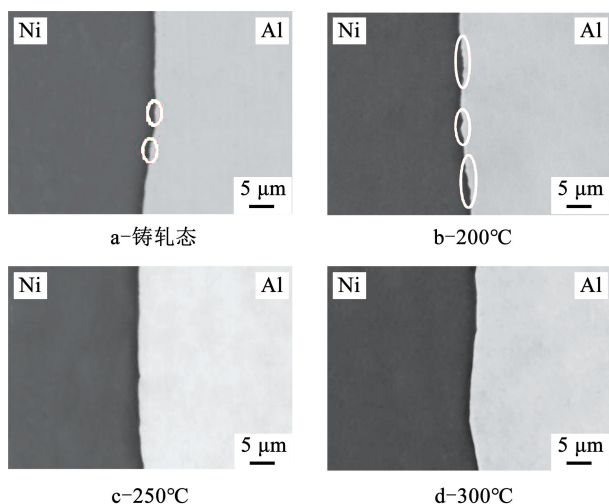


图3 不同加热温度下复合界面的微观形貌

Fig. 3 Microstructures of the composite interface at different heating temperatures

图4为铸轧态和不同温轧加热温度保温1.5 h, 轧制压下量为40%的铝镍复合板复合界面 EDS 线扫描结果及对应 SEM 图像。从图4可以看出, 铸轧态及不同加热温度下的复合界面元素扫描曲线均呈现类似“X”形, 曲线中间交错部分没有平台生成, 故可以初步确认没有新相生成。随着加热温度的升高, 扩散层厚度也不断增加, 铸轧态复合板界面扩散层厚度为 $2.54\ \mu\text{m}$; $200\ ^\circ\text{C}$ 加热温度下复合板扩散层厚度增加至 $2.79\ \mu\text{m}$; 加热温度为 $250\ ^\circ\text{C}$ 时复合板扩散层厚度增加至 $3.29\ \mu\text{m}$; $300\ ^\circ\text{C}$ 加热温度下复合板界面处扩散层厚度持续增加至 $4.19\ \mu\text{m}$ 。加热温度的升高加速了铝镍原子间的原子扩散速率, 使复合板界面扩散层的厚度不断增加。

由于 EDS 能谱分析具有一定的不准确性, 为了更加精准地确定复合板界面的物相种类, 对铸轧态和不同温轧加热温度保温 1.5 h, 轧制压下量为 40% 的铝镍复合板的镍侧剥离表面进行 XRD 物相分析, 结果如图5所示。从图5可见, 各工艺参数下只有 Al 和 Ni 两相的特征峰, 结合上文中对复合板界面处的 SEM 图和线扫描成分分析, 可以进一步证明, 在此工艺参数下进行温轧试验, 复合板的界面并无金属化合物生成。

2.1.1.2 对铝镍复合板力学性能的影响

图6所示为铸轧态和不同加热温度下保温 1.5 h, 轧制压下量为 40% 的复合板的剥离性能。从图6中可以看出, 铸轧态的复合板平均剥离强度为

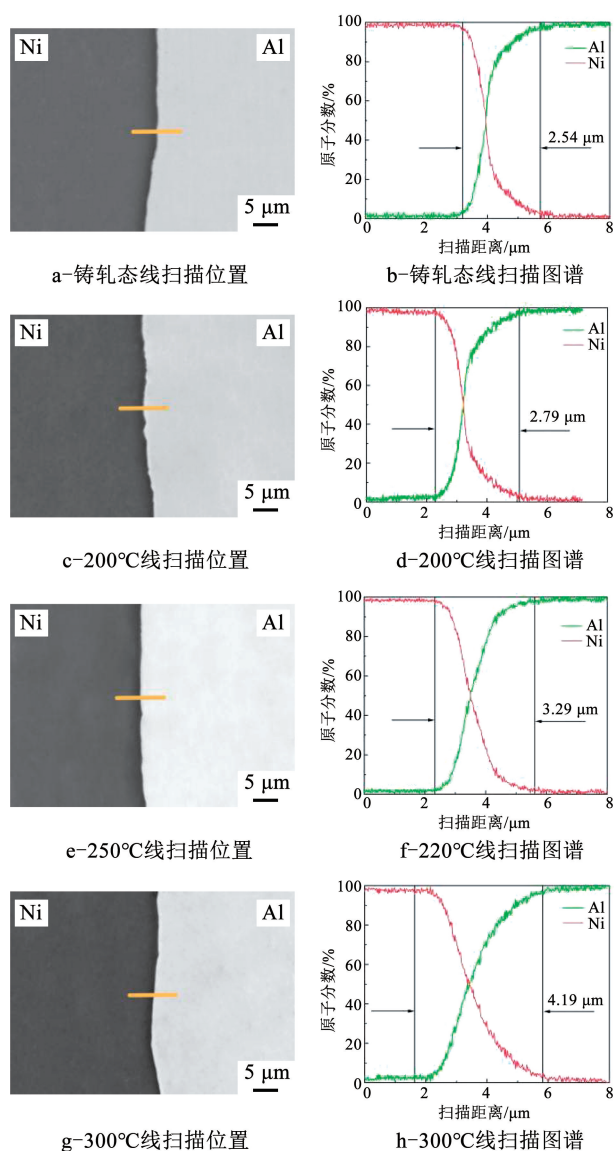


图4 不同加热温度下复合界面元素扩散情况

Fig. 4 Element diffusion of the composite interface at different heating temperatures

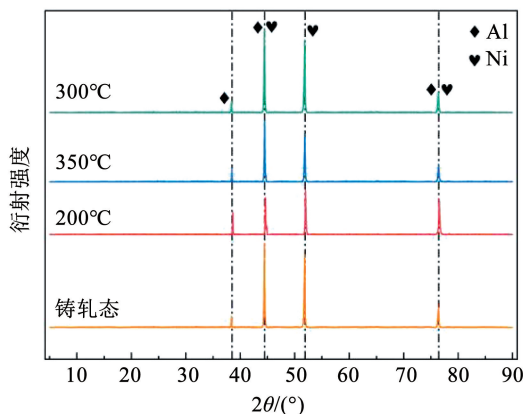


图5 不同加热温度下镍侧剥离表面的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD pattern of Ni-sided peeling surface at different heating temperatures

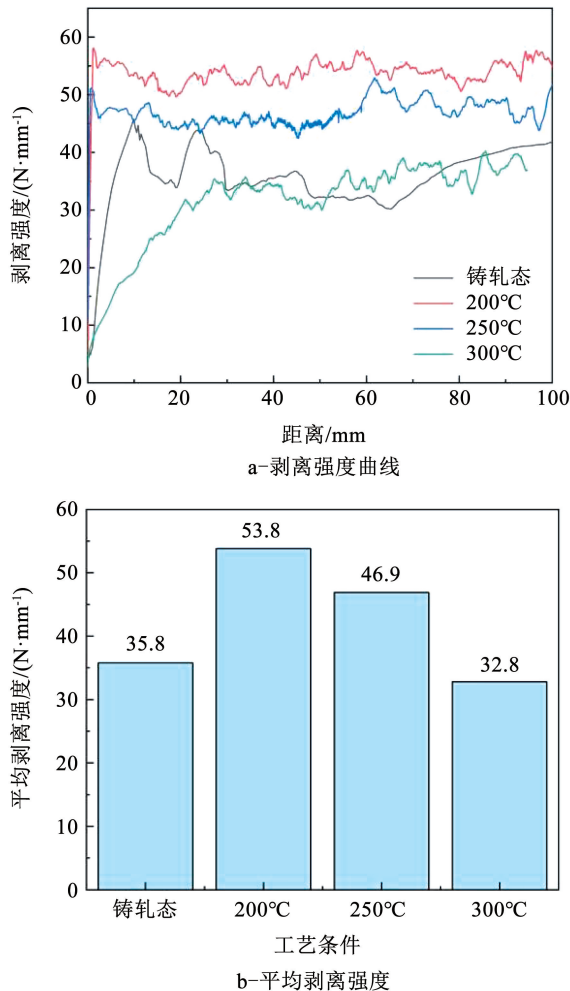


图6 不同加热温度下复合板的剥离性能
Fig. 6 Peeling properties of composite plates at different heating temperatures

35.8 N/mm,经 200 °C 加热温轧后的复合板平均剥离强度提升为 53.8 N/mm,相比于铸轧态提升了 50.28%。随着加热温度的继续升高,复合板的平均剥离强度呈现不断降低的趋势,加热温度为 250 °C 时,复合板平均剥离强度降低至 46.9 N/mm;当加热温度升高至 300 °C 时,复合板平均剥离强度已经降低至 32.8 N/mm,界面的结合性能已经发生大幅降低,已经低于铸轧态平均剥离强度。

工业生产中的铝镍复合板除了需要一定的平均剥离强度外,还需要复合界面周围具有一定的硬度。故除上述剥离性能外,对复合界面处和两侧距界面 30 μm 处取 8 个点测量硬度,结果如图 7 所示。由图 7 可见,经 200 °C 加热温轧后,在加工硬化的作用下镍侧平均硬度从铸态的 172.7 HV 提升到 215.5 HV;随着加热温度继续增加,加工硬化逐渐被增强的动态回复所抵消,镍侧平均硬度持续降低至

300 °C 条件下的 206.2 HV。而铝侧硬度对温轧的加工硬化作用和动态回复反应不大。因界面处没有金属化合物生成,故平均硬度取决于两基体的硬度,位于二者平均硬度间,维持在 54.2 ~ 56.1 HV 范围内。

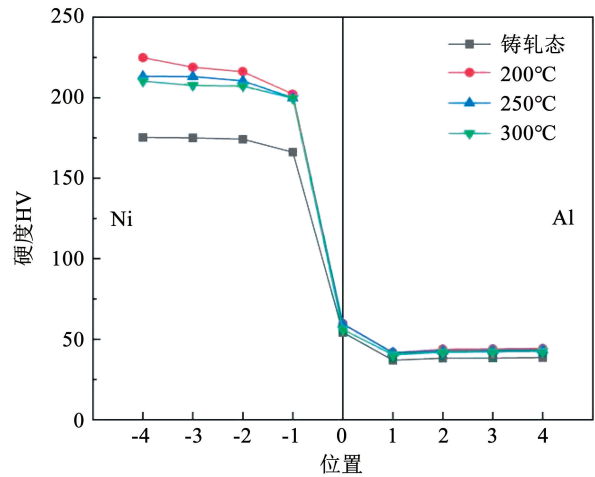


图7 不同加热温度下复合界面硬度分布曲线
Fig. 7 Hardness curves of the composite interface at different heating temperatures

2.2 轧制压下量对铝镍复合板的影响

2.2.1 对铝镍复合板微观组织的影响

图 8 所示为加热温度 200 °C 保温 1.5 h,进行不同压下量试验的复合板的界面微观形貌。从图 8 可以看出,随着压下量从 30% 增加到 40%,复合板界面形貌从较为平整状转变为曲折破碎状,且此现象逐渐严重。当压下量继续增加至 50% 时,界面在轧制力的作用下呈现出了波浪状的形貌;当压下量继续增加至 60% 时,复合界面受到了巨大的轧制力作用,已经出现了较为严重的破坏,铝镍基体在轧制过程中不断彼此发生延伸和扩展,甚至在界面部分区域发生了相互咬合嵌入的现象。

图 9 所示为加热温度 200 °C 保温 1.5 h,进行不同压下量试验的复合板复合界面 EDS 线扫描结果及对应 SEM 图像。从图 9 可以看出,30% 压下量复合板复合界面扩散层厚度为 2.98 μm;40% 压下量复合板复合界面扩散层厚度降低至 2.79 μm;50% 压下量复合板复合界面扩散层厚度微弱降低至 2.72 μm;60% 压下量复合板复合界面扩散层厚度持续微弱降低至 2.61 μm。故随着温轧压下量的增加,复合板扩散层厚度在轧制力的作用下以微弱变化趋势逐渐变薄。对比加热温度对复合板界面处扩散层厚度的影响,在同一加热温度下经温轧减薄的铝镍复合板的扩散层厚度受到压下量影响较小。

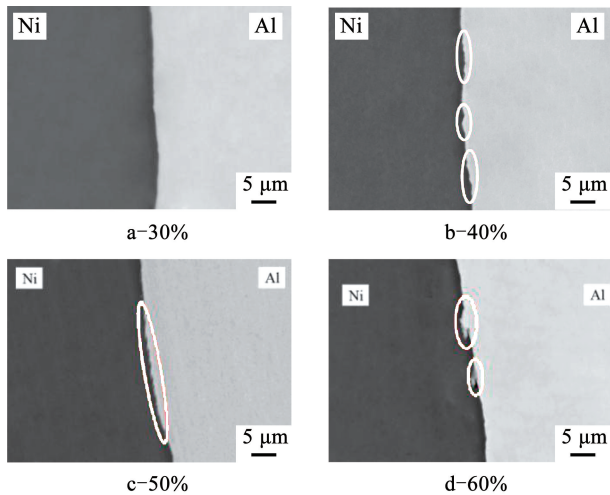


图8 不同压下量下复合界面处微观形貌
Fig.8 Microstructures of the composite interface under different reduction rates

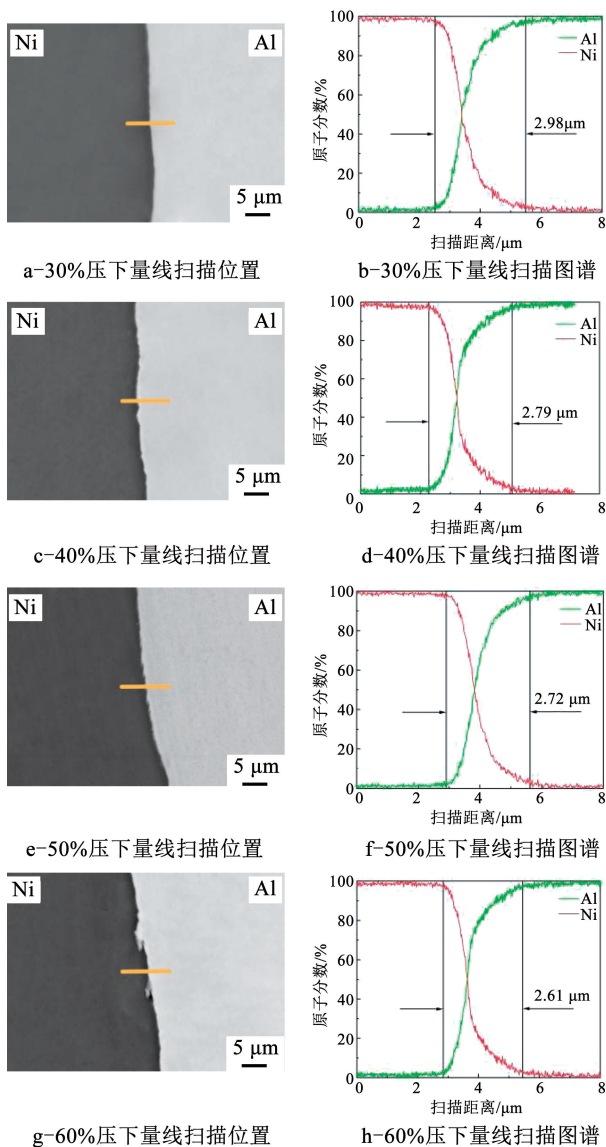


图9 不同压下量下复合板复合界面元素扩散情况
Fig.9 Element diffusion of the composite interface under different reductions

2.2.2 对铝镍复合板力学性能的影响

图10所示为保持加热温度200℃保温1.5h,进行不同压下量试验的复合板的剥离性能。

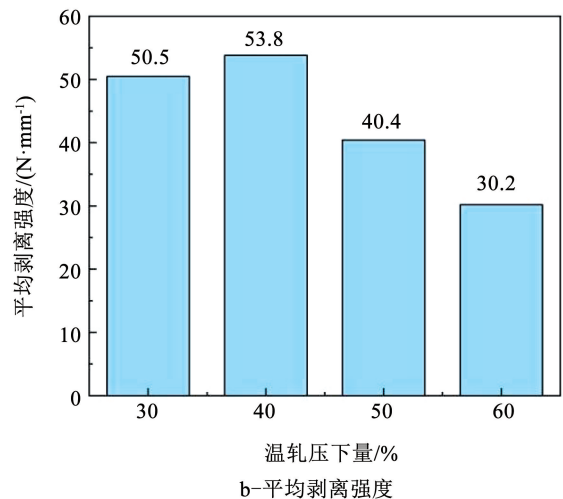
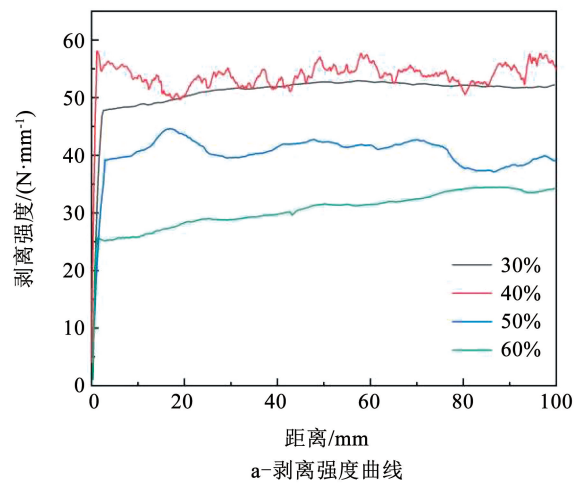


图10 不同压下量的复合板的剥离性能

Fig.10 Peeling properties of composite plates under different reductions

从图10可以看出,随着压下量的增加,复合板平均剥离强度呈现出先增加后降低的变化趋势。30%压下量复合板的平均剥离强度为50.5 N/mm,40%压下量复合板的平均剥离强度提升至53.8 N/mm。当温轧压下量从30%增加到40%时,结合图8可见,复合界面呈现曲折破碎状,使复合界面受到了冶金结合和机械咬合的二者协同作用,界面结合强度此时得到了持续的强化。但当压下量增加至50%时,复合板平均剥离强度较大幅度降低至40.4 N/mm。当压下量增加至60%时,复合板平均剥离强度大幅降低至30.2 N/mm,已经低于铸轧态原始板材的平均剥离强度。结合图8可见,随着压下量继续增加,复合界面出现较严重的咬合嵌入现

象,导致冶金结合逐渐被较大的轧制力破坏,界面结合性能虽因机械咬合增加得到提升,但不敌因冶金结合丧失造成的削弱,二者的协同强化作用逐渐消失,平均剥离强度大幅降低。

图 11 所示为保持加热温度 200 ℃ 保温 1.5 h, 进行不同压下量试验的复合板的硬度分布曲线。可以看出,随着温轧压下量的增加,镍侧受到轧制力作用产生的加工硬化效果越来越明显,平均硬度从 210.2 HV 持续增加到 230.8 HV,而铝侧硬度受加工硬化作用的影响较小,几乎保持不变。因为压下量的变化不会改变界面金属化合物生成的情况,同时结合 SEM 图像和 EDS 线扫描分析,界面依旧没有金属化合物的生成,其平均硬度取决于铝镍两侧基体的硬度,位于两侧平均硬度之间,范围在 57.8 ~ 64.3 HV 之间。

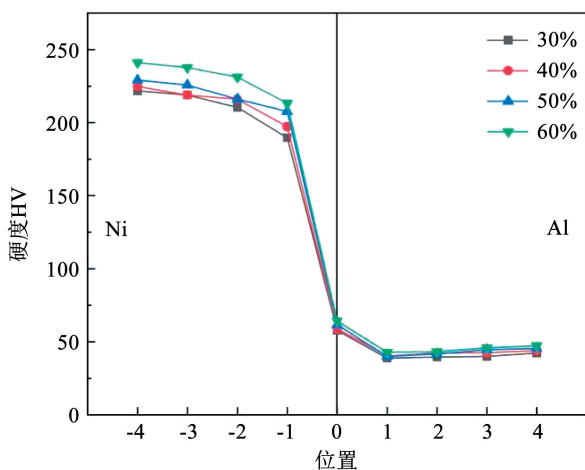


图 11 不同压下量复合板界面硬度分布曲线

Fig. 11 Hardness curves of the composite interface under different reductions

3 分析与讨论

3.1 温轧工艺对铝镍复合板微观组织的影响

在研究涉及的工艺参数范围内,因为温轧加热温度较低,结合界面并没有金属间化合物生成,只有温轧中铝镍原子扩散和轧制力作用。结合界面的性能强化也是由二者决定的。

铝原子和镍原子都是面心立方(FCC)结构,铝原子半径为 0.143 2 nm,镍原子半径为 0.124 3 nm,两元素晶体结构相同,扩散方式也一样。但镍原子半径要小于铝原子半径,铝原子进入到镍的晶格结构中引起的晶格畸变比镍原子进入到铝的晶格中的大,镍原子在铝中和铝原子在镍中的扩散激活能分别为 1.302 eV 和 2.71 eV^[19],镍原子在铝晶格中的

扩散所需能量更小。因此在界面铝/镍互扩散过程中,镍原子互扩散系数大于铝原子,这是导致界面互扩散过程中镍原子在铝层中的扩散宽度更大的原因之一。

随着加热温度的增加,温轧过后的复合界面形貌越来越平坦,原有的交错部分随着加热温度的升高逐渐消失,而扩散层厚度随着加热温度的增加呈现单调递增趋势,且对加热温度的反应较为敏感,故加热温度需要控制得稳定和准确。

压下量对复合界面形貌的影响是随着压下量的增加,界面处交错形貌越来越多,复合界面呈现波浪状变化,局部界面铝镍基体直接接触,由冶金结合变为机械咬合。当压下量达到 60% 时,铝镍基体出现局部嵌合,而扩散层厚度在压下量的影响下单调递减,但变化较为微弱,温轧工艺中压下量对于扩散层厚度的影响远不及加热温度。

3.2 温轧工艺对铝镍复合板力学性能的影响

对铝镍复合板力学性能的要求主要是界面结合强度和界面周围的硬度。轧制减薄过程中,界面结合强度主要由温轧温度决定的铝镍原子扩散和轧制力引起的界面机械咬合影响。硬度主要受加工硬化和动态回复、再结晶软化的两方面影响。

加热温度越高,剥离强度越低。当加热温度升高至 300 ℃ 时,复合板剥离强度出现了非常明显的下降,平均剥离强度已经低于轧制减薄前。结合上文对不同加热温度下复合界面微观形貌、复合界面元素扩散情况的分析可知,200 ℃ 加热温度,复合界面在轧制力的作用下由铸轧态的平整状变成交错状,界面处依靠铝镍基体之间的冶金结合和机械咬合协同作用可以得到较强的结合强度。随着加热温度继续增加,复合界面转变成了平整状,扩散层的增厚会严重影响复合界面的结合性能,因此复合板平均剥离强度随着加热温度的升高而不断降低。铝侧硬度受加热温度影响不大,镍侧较为敏感。200 ℃ 加热温度下,镍侧加工硬化作用大于动态回复和再结晶软化作用,因此镍侧基体硬度相比铸轧态有较大幅度增加。随着加热温度的增加,镍侧基体平均硬度均有所下降,加工硬化逐渐被动态回复和再结晶软化作用削弱,但在试验温度范围内减薄后的镍侧平均硬度依旧高于铸轧态。界面的硬度始终介于铝镍两侧基体硬度之间。

随着压下量的不断增加,平均剥离强度呈现先增加后降低的趋势。当压下量从 30% 增加到 40% 时,复合界面在冶金结合和机械咬合协同作用下界

面结合强度增加。当压下量从 40% 增加至 60% 时, 结合上文对不同压下量下复合界面的微观形貌分析可知, 复合界面的破碎现象越来越严重。当压下量增加至 60% 时, 复合界面部分区域的冶金结合状态已被界面处铝镍基体直接接触互相机械咬合完全破坏取代, 平均剥离强度大幅度降低, 而压下量对硬度的影响是随着压下量的增加, 铝侧基体平均硬度几乎不变, 铝基体的加工硬化程度增幅较小。镍侧基体加工硬化程度显著提升, 基体硬度迅速增加, 这是因为压下量对镍基体加工硬化程度的影响远远超过其动态回复和再结晶的软化作用。界面处的硬度值始终介于铝镍两侧基体硬度之间。

4 结 论

1) 不同加热温度保温 1.5 h 进行 40% 压下量温轧时, 随着加热温度的增加, 铝镍复合界面微观形貌越来越平整; 铝镍原子间扩散反应加剧, 复合界面扩散层逐渐增厚; 界面无金属化合物生成。

2) 不同加热温度保温 1.5 h 进行 40% 压下量温轧, 当加热温度从 200 °C 增加到 300 °C 时, 因为扩散层厚度的增加, 复合板平均剥离强度从 53.8 N/mm 持续降低至 32.8 N/mm; 铝镍基体动态回复和再结

晶软化作用增强, 硬度不断下降, 铝侧硬度变化微弱, 镍侧硬度从 215.5 HV 降低至 206.2 HV, 界面硬度始终介于两侧基体之间。

3) 在 200 °C 保温 1.5 h 进行不同压下量轧制时, 随着压下量的增加, 复合界面的曲折交错现象逐渐严重, 界面微观形貌逐渐在轧制力的作用下呈现波浪状。当压下量增加至 60% 时, 铝镍基体在界面部分区域发生相互嵌合的现象。扩散层厚度在轧制力的作用下略微变薄。

4) 在 200 °C 保温 1.5 h 进行不同压下量轧制时, 随着压下量的增加, 平均剥离强度呈现先增加后降低的趋势。当压下量为 40% 时, 复合界面在冶金结合和机械咬合的协同作用下界面结合强度达到最高值 53.8 N/mm。压下量继续增加, 复合界面的冶金结合逐渐被较大的轧制力破坏, 平均剥离强度降低。随着压下量的增加, 镍侧的加工硬化效果越来越明显, 平均硬度从 210.2 HV 持续增加到 230.8 HV。铝侧硬度受加工硬化作用的影响较小, 界面处平均硬度位于两侧平均硬度之间。

5) 综合考虑复合带的组织与性能要求, 铝镍复合板最优温轧减薄工艺是在加热温度 200 °C 保温 1.5 h 进行 40% 压下量轧制。

参考文献:

- [1] 田双永, 徐 泽, 徐 振, 等. 层状复合材料制备工艺现状及未来发展展望[J]. 铝加工, 2024(2): 3-10.
- [2] FAN Y H, WANG W Y, HAO Z P. Diffusion mechanism in cutting Ni-based alloy containing γ' phase (Ni_3Al) with CBN tool based on MD simulation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2021, 235(11): 1763-1778.
- [3] 杜 恺, 许久健, 穆星伟, 等. 铝/镍层状复合材料研究进展[J]. 铸造技术, 2022, 43(1): 28-37.
- [4] 王明智. 高强度高塑性层状 Al/Ni 含能结构材料的制备及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [5] 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.
- [6] 赵 菲, 黄庆学, 贾登峰, 等. 金属层状复合材料焊接技术现状与发展[J]. 焊接技术, 2018, 47(2): 1-5.
- [7] KAÇAR R, ACARER M. An investigation on the explosive cladding of 316L stainless steel-din-P355GH steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152: 91-96.
- [8] FINDIK F. Recent developments in explosive welding[J]. Materials & Design, 2011, 32(3): 1081-1093.
- [9] SONG J, KOSTKA A, VEEHMAYER M, et al. Hierarchical microstructure of explosive joints: example of titanium to steel cladding[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(6): 2641-2647.
- [10] 王建民, 朱 锡, 刘润泉. 爆炸焊接的应用与发展[J]. 材料导报, 2006, 20(1): 42-45.
- [11] 王敬忠, 颜学柏, 王伟琪, 等. 轧制钛-钢复合板工艺综述[J]. 材料导报, 2005, 19(4): 61-63, 73.

(下转第 45 页)

4 结 论

1) 2A12T4 铝合金棒材挤压开裂的主要原因是铸锭芯部存在中心热裂纹。

2) 理论上可发生铸造热裂纹的合金及制品, 均可能会出现低熔点共晶填充的铸造热裂纹缺陷, 其

组织特征既与铸锭中的热裂纹形态有关, 也与制品的变形方式有关。

3) 铸造热裂纹中填充的低熔点共晶, 与正常组织中的低熔点共晶基本一致, 其分布与铸造热裂纹的形态有关, 并出现一定程度的残留相聚集。

参考文献:

- [1] 徐崇义, 李念奎. $2\times\times\times$ 系铝合金强韧化的研究与发展[J]. 轻合金加工技术, 2005, 33(8): 13-17.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 变形铝及铝合金制品组织检验方法 第2部分: 低倍组织检验方法: GB/T 3246.2—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [3] 刘静安, 单长智, 侯 绎, 等. 铝合金材料主要缺陷与质量控制技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [4] 谢水生, 刘静安, 徐 骏, 等. 简明铝合金加工手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016.
- [5] 周家荣. 铝合金熔铸生产技术问答[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.

(上接第35页)

- [12] 季 策, 许石民, 黄华贵. 金属包覆材料固-液铸轧复合技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2021, 13(6): 12-22.
- [13] TAKEUCHI E, ZEZE M, TANAKA H, et al. Novel continuous casting process for clad steel slabs with level DC magnetic field[J]. Ironmaking & Steelmaking, 1999, 24: 257-263.
- [14] 杜 恺. 铝/镍层状复合材料制备工艺及组织性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- [15] 刘心昆. Ni/Al 复合板轧制复合工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- [16] 祖国胤, 刘 刚, 王 宁, 等. 退火工艺对镍/铝复合带金属间化合物的影响[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(2): 54-59.
- [17] ZHANG J, WANG Y, LÜ Z, et al. Formation mechanism and growth kinetics of TiAl_3 phase in cold-rolled Ti/Al laminated composites during annealing [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(2): 524-539.
- [18] ZHANG J, WANG B H, CHEN G H, et al. Formation and growth of Cu-Al IMCs and their effect on electrical property of electroplated Cu/Al laminar composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(12): 3283-3291.
- [19] 吴忌征. Ni-Zr 和 Ni-Al 二元体系扩散行为的分子动力学模拟[D]. 南宁: 广西大学, 2019.