DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2024.4026

轧制工艺对铸轧 Ti–Al 复合板界面组织与性能的影响

陈雯璐[1]，付子宣[1]，许光明[2]，徐潘宁[2]，张　焘[2]，李　勇[3]

(1. 东北大学 材料科学与工程学院，辽宁 沈阳 110819；2. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室，辽宁 沈阳 110819；3. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室，辽宁 沈阳 110819)

摘　要：除热处理工艺外，轧制工艺也是影响铸轧 Ti/Al 复合板工艺稳定性和界面结合强度的重要因素。通过改变铸轧复合过程中的轧制温度和轧制变形量，获得了不同的 Ti/Al 复合板。利用 SEM、EBSD、XRD 等手段对复合板的显微组织和界面结合性能进行了表征和测试。结果表明，在不同温度下进行 50%变形量的轧制时，复合板发生不同程度翘曲。当轧制温度为 470 ℃时，复合界面在高倍扫描电镜下为锯齿状界面；而在轧制温度为 500 和 530 ℃时，复合界面为波浪状界面。随着轧制温度的升高，复合板的结合强度也有所提高。在温度一定、变形量改变的轧制过程中，当变形量小于 50%时，复合板的平均结合强度随着变形量的增大而增加。当变形量为 75%时，由于钛层金属太薄，且变化不平均，导致钛层出现破裂使复合板失效。综上所述，在温度为 500 ℃，轧制变形量为 50%时，复合板的平均结合强度最好。

关键词：铸轧复合；钛/铝复合板；轧制工艺；界面结合强度

中图分类号：TB331　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2024)07-0647-12

Effect of the Rolling Process on the Interface Microstructure and Properties of Cast–rolled Ti–Al Composite Plate

CHEN Wenlu[1], FU Zixuan[1], XU Guangming[2], XU Panning[2], ZHANG Tao[2], LI Yong[3]

(1. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In addition to the heat treatment process, the rolling process is also an important factor affecting the stability and interface bonding strength of cast-rolled Ti/Al composite plates. In this paper, different Ti/Al composite plates were obtained by changing the rolling temperature and deformation during the process of casting and rolling. The microstructure and interface bonding properties of the composite plates were characterized and tested by means of SEM, EBSD, XRD, etc. The results show that when rolling at different temperatures with 50% deformation, the composite plate warps to different degrees. Under high-magnification scanning electron microscopy, a serrated interface is observed at a rolling temperature of 470 ℃, while a wavy interface is observed at 500 and 530 ℃. Moreover, increasing the rolling temperature enhances the bonding strength of the composite plate. When the deformation is less than 50%, the average bonding strength of the composite plate increases with increasing deformation during the rolling process at a constant temperature. When the deformation amount is 75%, the titanium layer is too thin, and the change is uneven, resulting in the fracture of the titanium layer and the failure of the composite plate. In summary, when the temperature is 500 ℃ and the rolling deformation is 50%, the average bonding strength of the composite plate is the greatest.

Key words: cast-rolling bonding; Ti/Al composite plate; rolling technology; interfacial bonding strength

收稿日期：2024-02-06

基金项目：广西科技重大专项(桂科 AA23073019)；南宁市科技重大专项(20231037)

作者简介：陈雯璐，2003 年生，本科生. 研究方向为层状复合材料制备技术. Email: 20214115@stu.neu.edu.cn

付子宣，2004 年生，本科生.研究方向为层状复合材料制备技术. Email: 13504817072@163.com

通讯作者：许光明，1966 年生，博士，教授. 研究方向为层状复合材料制备技术.Email: xu_gm@epm.neu.edu.cn

引用格式：陈雯璐，付子宣，许光明，徐潘宁，张焘，李勇. 轧制工艺对铸轧 Ti-Al 复合板界面组织与性能的影响[J]. 铸造技术，2024，45(7)：647-658.

CHEN W L, FU Z X, XU G M, XU P N, ZHANG T, LI Y. Effect of the rolling process on the interface microstructure and properties of cast-rolled Ti-Al composite plate[J]. Foundry Technology, 2024, 45(7): 647-658.

随着科技发展日新月异，航空航天、石油化工等产业创新不断，现有的金属、合金材料性能已经很难达到工业生产的实际需求，需要综合性能更好的材料来改善这一问题。因此，能够实现材料之间优势互补[1]的层状金属复合材料成为研究重点。作为被广泛应用的金属材料，铝合金具有质量轻、导电、导热性好、价格低的特点；钛合金具有高强度、耐磨、耐腐蚀等优点，但因其成本过高难以大规模应用。Ti/Al复合板同时具有两种合金的优点，其性能优异[2-3]，且能有效降低生产成本，被广泛应用于电池电极、汽车工业及航空航天等[4-5]领域。

固–固复合法和固–液复合法[6-7]是当前实验室制备Ti/Al复合板[8]的主要方法。其中，固–固复合法包括爆炸焊复合法和轧制复合法[9-10]。在现行的生产操作中，经常采用的是爆炸焊复合法[11-12]，其核心原理在于运用爆炸带来的强烈能量，驱使金属板之间发生剧烈撞击，去除其表面氧化膜[13]，从而暴露出新鲜的金属原子表面，以实现金属间的冶金结合。该种方法成本低廉，整个工艺流程相对简单，且能够生产各种尺寸的板材，但是由于爆炸能量的强烈冲击，容易使板材的界面性能不均匀，严重影响材料的性能，已逐渐被淘汰。轧制复合法是将各种金属板材并行放置于轧辊上，利用其强烈的塑性变形使氧化膜被破坏，通过压力和高温促使新生的金属进行相互扩散，最终结合在一起[14-15]。该方法成本较低、工艺流程简单、生产效率高而且能够满足工业化大批量生产，但是金属氧化物和金属间化合物等脆硬相是生产中板材界面处不可避免的缺陷，其导致复合板界面强度较低，且有较大的内应力。近年来，固液铸轧复合法作为一种新的铸轧方法，是固–液复合法的主要方法之一。利用在轧辊辊缝周围的冷却水，使注入辊缝的液态金属迅速凝固，在轧辊的作用力下发生塑性变形，从而制备出结合性能优异的金属复合板[6-7]，可以达到液态与固态（或者半固态与液态）的复合，容易实现自动化生产，从而降低成本，提高生产效率。

目前，在Ti/Al复合板领域已经开展了许多研究并取得了一定成果。陈泽军等[16]通过改变轧制参数来研究热轧对Al/Ti/Al三层复合板的影响，指出通过轧制技术使钛和铝两种金属结合，需要首道次压下量超过30%。祁梓宸等[17]研究了在不同温度轧制下，Ti/Al复合板的变形协调性及复合性能的变化规律，即温度越高、压下量越大时，Ti/Al复合板的变形协调性越好。Huang等[18]采用较新的立式双辊固-液铸轧法制备了Ti/Al复合板，研究了复合板复合界面处的扩散机制和复合过程中产生的金属间化合物，得出金属间化合物为$TiAl_3$的结论。王文焱等[7]通过分析铸轧复合法制备的Ti/Al复合板的力学性能，发现铸轧Ti/Al复合板的强度高于理论计算值。

尽管对Ti/Al复合板的研究已经很多，但是现有的制备方法都存在着无法避免的缺点。作为一种新兴的复合方法，铸轧复合法具有其独特的优势，但是由于部分难题仍待解决，该方法还未投入生产。首先，目前的研究成果还不能明确解释复合界面的形成机理；其次，由于Ti和Al合金物理化学性质差异较大，难以形成符合预期质量的Ti/Al复合界面。此外，铝合金组织在轧制过程中由于冷却速度较快，将产生较大的宏观偏析，导致板材内部性能不均匀，使材料的综合性能降低。由此推断，Ti/Al复合界面的结构和力学性能及铝合金组织中的宏观偏析是影响铸轧Ti/Al复合板性能的主要因素。因此，提高Ti/Al复合板的强度主要有两种方法：①通过改善轧制工艺改变Ti/Al复合界面的结合强度；②利用热处理消除铝合金组织中的宏观偏析。

本文采用水平铸轧法制备Ti/Al复合板，通过改变轧制温度与轧制变形量研究轧制工艺对Ti/Al复合板组织和性能的影响，分析复合界面在变形中的变化机制，为层状Ti/Al复合板的轧制强化工艺以及协同变形研究提供理论参考。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

铸轧复合实验中使用AA7005铝合金为基体，采用TA2钛带进行增强制得Ti/Al复合板。AA7005合金以工业纯铝锭(99.7%，质量分数)、纯锌颗粒、纯镁块、铝锰合金、铝锡合金、铝铁合金、铝锆合金为原料，化学成分如表1所示。

表 1 AA7005 铝合金和 TA2 钛带化学成分

Tab.1 Chemical composition of the AA7005 aluminium alloy and TA2 titanium strip

(mass fraction/%)

Element	Zn	Mg	Mn	Fe	Si	Zr	Sc	Al
AA7005	4.5	1.6	0.5	0.2	0.2	0.15	0.15	Bal.
Element	C	N	H	Fe	O	Else single	Else total	Ti
TA2	≤0.1	≤0.05	≤0.015	≤0.30	≤0.25	≤0.10	≤0.40	Bal.

1.2 轧制复合与热处理

Ti/Al复合板采用实验室自研的水平双辊铸轧机制得。首先进行 AA7005 合金熔炼,熔炼前将所有与铝合金直接接触的铁制设备、工具接触表面均匀地涂覆一层钛白粉,防止接触时发生污染,避免铝合金中的杂质(铁原子)增多;将进入熔融铝合金的工具烘干,防止有水分进入熔融铝合金后,因水分蒸发导致熔融铝合金迸溅甚至爆炸,同时水分的进入也会使铝合金中的杂质增多。然后将铝锭放入电阻炉内加热熔化,将电阻炉的温度调至750 ℃,待铝液完全熔化并保温30 min后,将纯锌颗粒、纯镁块、Al-10%Mn、Al-20%Si、Al-50%Fe、Al-5%Zr等中间合金加入熔体中,并用压罩压入熔体底部,待其完全融化后对熔体进行扒渣,并将熔体温度降低到浇铸温度,到温后保温30 min,用六氯乙烷对熔体进行除气,等待浇铸。

浇铸前,需对 TA2 钛带表面进行处理,用丙酮和酒精擦除油污,再去除其表面水分;另外需对轧辊表面进行处理,将表面清洁打磨后烤上碳膜,防止浇铸过程中出现粘辊。将铸嘴放在烘干箱内,以200 ℃的温度烘烤12 h,将钛带放在烘箱内以150 ℃的温度烘烤2 h,去除铸嘴和钛带内的水分。将导流槽用高温喷枪炙烤30 min,一方面去除导流槽内的水分,另一方面提高导流槽内的温度以减小铝合金熔体浇入后的温降。浇铸时,引入冷却水后启动轧辊,然后将熔融铝合金浇入铸轧区,待铝合金板能够被稳定轧出后,将加工好的TA2钛带沿上辊和铸嘴的间隙送入铸轧区,得到6 mm厚的Ti/Al复合板,待其达到一定长度时停止铸轧。将得到的复合板切割成13 mm×11 mm×6 mm的方块,作为金相试样及拉伸和剥离试样,拉伸试样尺寸如图1所示,剥离试样尺寸如图2所示。

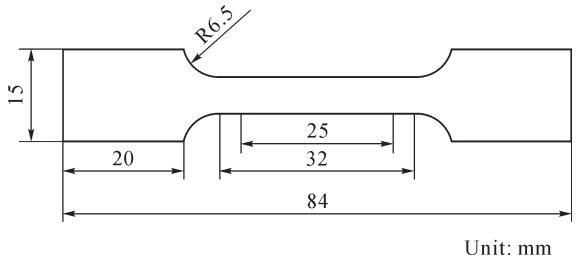


图 1 拉伸试样尺寸
Fig.1 Size of the tensile specimen

热处理实验使用管式加热炉,加热温度为550 ℃,保温时间分别为0.5、1.0、4.0和8.0 h。经过热处理后的Ti/Al复合板使用实验室自主研发的400二辊异步热轧机进行热轧,轧辊直径为400 mm,最大轧制力为3 000 kN,加热装置为热风炉,温度误差

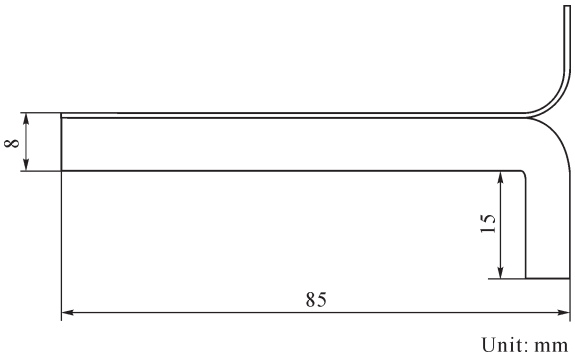


图 2 剥离试样尺寸
Fig.2 Size of the peel sample

在±5 ℃。将试样放到热风炉内,加热温度分别为470、500和530 ℃,保温时间为1 h。当总变形量为50%时,试样经1道次直接从厚度为8 mm的板材热轧至4 mm,然后空冷至室温。当总变形量为25%时,试样经一道次从厚度为8 mm的板材热轧至6 mm;当总变形量为75%时,试样经2道次将原始厚度为8 mm的板材轧至2 mm。

1.3 材料表征及性能测试

利用JEOL JSM-7800F场发射扫描电镜对经过研磨抛光的金相试样微观结构进行观察。对复合界面结构及元素扩散进行描述并确定第二相形貌,扫描电镜的放大倍数为 5 000 和 10 000 倍。利用电子背散射衍射仪(EBSD)对复合界面晶粒形貌和微观结构特征进行表征及分析,EBSD试样尺寸为8 mm×5 mm×2.5 mm。先使用砂纸打磨试样,后经二氧化硅(0.02 μm)精抛至镜面,使用氩离子抛光,时长为1 h,消除试样表面应力。采用D/max-2500PC型X 射线衍射仪对 Ti/Al 复合界面进行检测,试样取自被剥离开的剥离试样,长度约为 15 mm,分析剥离面的物相。使用Wilson TUKON 1102型维氏硬度仪测量试样基体及界面处硬度,第1个点精确地取在复合界面上,测得界面处硬度值,向Ti,Al两侧每移动 50 μm 取1个点,每侧各取4个点。在AG-Xplus 100 kN 万能材料试验机上进行性能测试,拉伸试样的标距为 50 mm,宽度 6 mm,抗拉试验的加载速度为 2 mm/min,剥离实验的加载速度为10 mm/min。采用 JEOL JXA-8530F 场发生电子探针检测铝基体内合金元素的变化,垂直于铸轧方向每隔 0.5 mm 打1个点,需在每个样上取多条直线打点后取平均值。

在通用板材成形性试验机上进行成形性能测试,为试样尺寸为60 mm×60 mm,凸模尺寸为SR 20.0 mm,凹模尺寸为ϕ27.0 mm,模具的压边力15 kN,加载载荷50 kN,加载速度10 mm/min。成形性能测试中,每个条件下得到的复合板做3个样品,测量

杯突深度的平均值，钛层在下面和铝层在下面各做1组。

2 实验结果

2.1 轧制温度对铸轧Ti/Al复合板组织性能的影响

2.1.1 对铸轧Ti/Al复合板翘曲变形的影响

为探究轧制温度对铸轧Ti/Al复合板翘曲变形的影响，将热处理加工后的复合板置于热风炉内加热，保温1 h，然后在400二辊异步热轧机上进行轧制，变形量为50 %，得到如图3所示的热轧板。图中从上到下的热轧温度依次为470、500 及530 ℃，为了方便表示，下文中分别以T-470、T-500、T-530表示470、500、530 ℃轧制得到的复合板。轧制过程中发现，复合板在轧辊轧制力的作用下厚度减小，长度增加，宽展方向上的尺寸并未发生较大变化。复合板发生一定的翘曲，其中，复合板T-500的翘曲程度较小，说明此时钛、铝金属的变形协调性较好，T-470和T-530翘曲较为严重，说明此时钛、铝金属的变形协调性较差；3块复合板的钛侧表面都较为平整，内部未发现明显裂痕，无边裂现象，铝侧内部也无明显裂痕，但边部出现少许边裂。

钛和铝的物理性能有着较大的差异，两者的变形抗力不同，在热轧时，温度的提高会导致合金内能量升高，滑移系开动更容易。铝合金由于熔点较低，使滑移系开动所需的能量更少，更容易变形，而钛的熔点较高，在轧制温度下未能得到滑移系开动所需的能量，使得钛铝物理性能差异进一步增大，导致热轧后复合板向钛侧发生翘曲。

复合板宽展方向上的尺寸无明显变化，主要是由于实验中所用的小辊径轧机造成：①轧机与板材接触弧度会影响轧制方向上的摩擦阻力，而实验中用的小辊径轧机与板材接触弧度较小，在轧制方向上的摩擦阻力较小，根据最小阻力定律，金属原子优先向轧制方向流动。②小辊径轧机的变形区长度小于复合板的宽度，金属原子沿轧制方向流动变形量比沿横向多，从而导致复合板伸长量大于宽展量。③轧辊横向接触面为平面，轧制方向接触面为圆弧，容易产生利于延伸变形的水平分力，所以在热轧过程中会有长度方向变化。

2.1.2 对铸轧Ti/Al复合板微观组织的影响

图4是不同热轧温度下、轧制变形量为50%的Ti/Al复合界面处微观组织形貌，其中图4a~c的轧制温度分别为470、500和530 ℃。从图4a可知，复合板界面发生弯曲变形，由铸轧态的平直界面变为锯齿状，在界面处钛基体一侧出现微米级裂纹和锯齿状凹陷，铝合金在压力的作用下挤入到这些凹陷中。轧制过程中，复合板厚度减小，长度增加，Al具有面心立方晶体结构，可动滑移系较多，更容易协调轧制变形；而Ti具有HCP晶体结构，可动滑移系较少，不易协调轧制变形。因此变形时，强度较小、塑形较好的

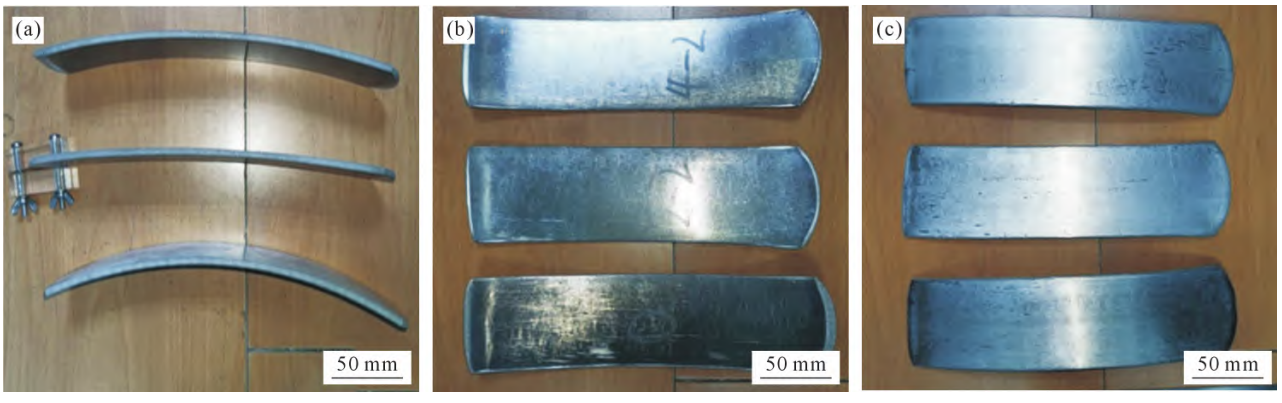


图 3 不同温度轧制后的复合板：(a) 侧面；(b) 正面；(c) 背面

Fig.3 Composite plates rolled at different temperatures: (a) side view; (b) front view; (c) rear view

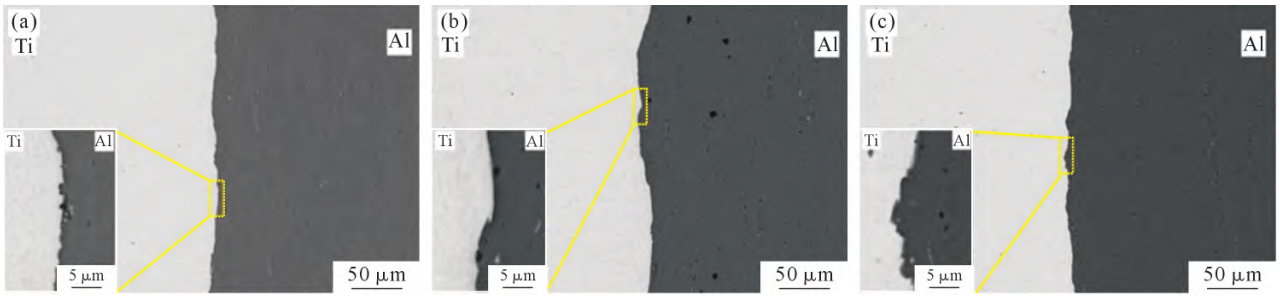


图 4 不同温度轧制后 Ti/Al 复合界面 SEM 图像：(a) 470 ℃; (b) 500 ℃; (c) 530 ℃

Fig.4 SEM images of the Ti/Al composite interface after rolling at different temperatures: (a) 470 ℃; (b) 500 ℃; (c) 530 ℃

铝合金有先发生变形的趋势，在具有一定强度的复合界面作用下，钛随着铝合金同时发生变形，但钛的塑性变形容易不均匀，使界面粗糙不平。与图4a相比，图4b中500 ℃热轧后的复合界面弯曲变形和表面粗糙度变大，形成更大的凸起和凹陷，但是界面处钛基体上锯齿状凹陷和裂纹消失，变为较圆润的凹凸。如图4c所示，在热轧温度达到530 ℃时，表面粗糙度再次增大，在界面上较大的凹陷中，还存在许多小的凹陷和凸起。

图5为不同热轧温度下、轧制变形量为50%的复合界面EDS线扫描结果，图5a为470 ℃热轧、轧制变形量50%的复合界面线扫结果。由于470 ℃热轧时，复合界面处出现了锯齿状凹凸，故选取钛侧凹陷和凸起部分进行线扫描得到图5a_2和a_3。观察图5a_2可知，该位置为轧制过程中钛侧表面发生断裂新鲜金属结合形成的新的复合界面，新形成的复合界面也具有一定宽度扩散层，宽度为2.6 μm。图5a_3所测凸起部分为该处钛表面两处断口中间原有的复合界面，扩散层的宽度为2.8 μm。热轧后随着复合板整体厚度变小，复合界面的扩散层宽度变小，但是相对于

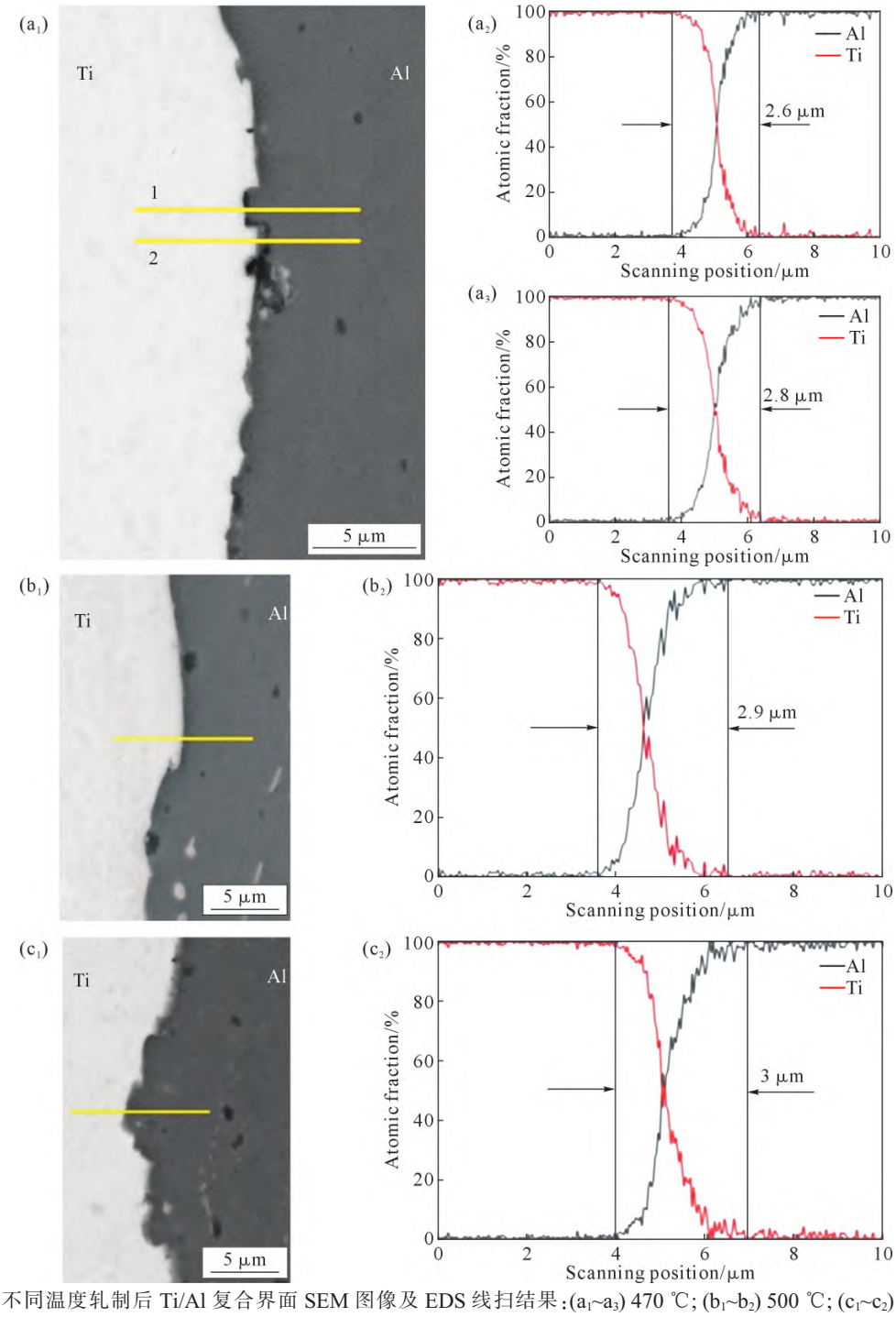


图 5　不同温度轧制后 Ti/Al 复合界面 SEM 图像及 EDS 线扫结果：(a_1~a_3) 470 ℃; (b_1~b_2) 500 ℃; (c_1~c_2) 530 ℃

Fig.5　SEM images and EDS line scanning results of the Ti/Al composite interface after rolling at different temperatures: (a_1~a_3) 470 ℃; (b_1~b_2) 500 ℃; (c_1~c_2) 530 ℃

热轧前的板材，扩散层的宽度大于原扩散层的50%。造成这种现象的原因可能有2种：①在热轧保温过程中复合界面处进行了元素的扩散使得原有的扩散层宽度变宽；②在变形过程中，塑性好、更容易变形的铝合金在界面的作用下带动钛一起变形，在铝合金内变形并不均匀，复合界面处的变形小于50%，所以热轧后扩散层的宽度大于原有扩散层宽度的50%。图5b_2和c_2分别为500和530 ℃热轧后的EDS线扫描结果，图中显示扩散层的厚度分别为2.9、3.0 μm。考虑到轧制后界面扩散层的宽度不均及测量误差，轧制温度对界面扩散层宽度的影响可以忽略。

图6为500 ℃热轧温度下，轧制变形量50%后的EBSD图。从图中可知，在钛合金组织内，晶粒沿轧制方向变长，晶界处出现较多的再结晶晶粒，在铝合金组织内，组织变为沿轧制方向的变形组织，仅在晶界处发现少量的再结晶组织。

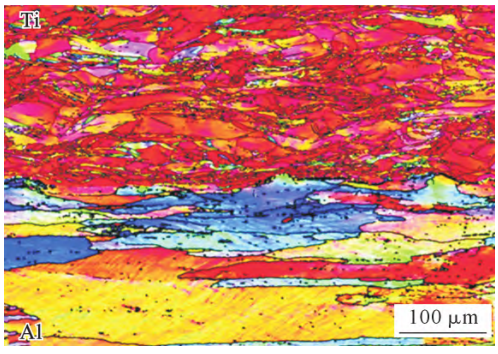


图 6 500 ℃下 50 %变形量轧制后的 EBSD 图

Fig.6 EBSD image after rolling with 50% deformation at 500 ℃

2.1.3 对铸轧Ti/Al复合板结合性能的影响

图7为不同轧制温度下，轧制变形量为50%复合板的剥离曲线及剥离强度。可见，经过轧制后，复合板的强度得到一定提高，其中470 ℃+50%变形量下，结合强度增加较小，平均剥离强度约为29.124 86 N/mm，500和530 ℃轧制后结合强度接近，平均剥离强度约为31.531 19和31.604 42 N/mm。

2.2 轧制变形量对Ti/Al复合板组织性能的影响

2.2.1 对铸轧Ti/Al复合板翘曲变形的影响

轧制温度为500 ℃时，不同变形量轧制后得到的复合板图像如图8所示，图中从上到下的轧制变形量依次为25%、50%、75%。不同变形量热轧时，厚度和长度方向仍为主要的变化方向，宽展方向变形不大。另外，当变形量为25%时，复合板翘曲程度较大；当变形量为75%时，铝合金被挤出更多，而且在钛带上出现明显裂纹，露出铝合金。

铸轧复合的一大优势就是复合过程中能够同时实现冶金结合和物理结合，得到具有一定强度的复合界面，这样性能良好的界面可以实现力在两层金属间的较好传递，使得复合板在轧制时能够进行协同变形。由图8可知，热轧后，复合板整体向变形抗力更大的钛侧翘曲。由此推测Ti/Al复合板的热轧过

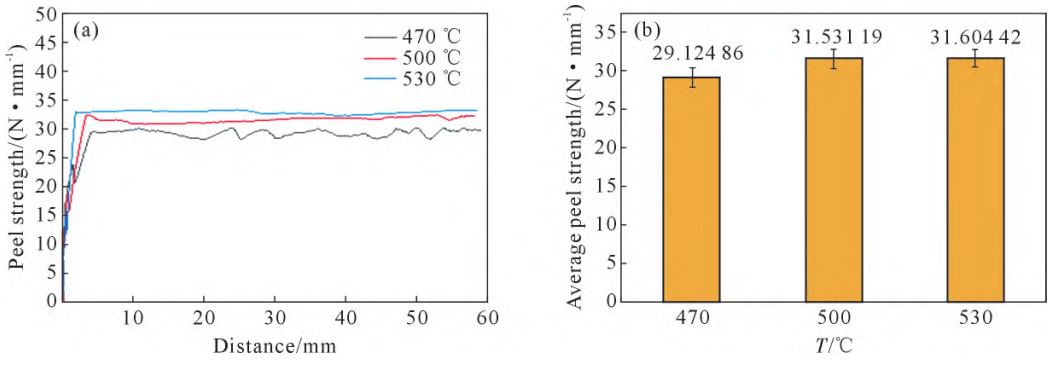


图 7 不同温度轧制后复合板剥离强度：(a) 剥离曲线；(b) 平均剥离强度

Fig.7 Peeling strength of the composite plate after rolling at different temperatures: (a) stripping curve; (b) average peel strength

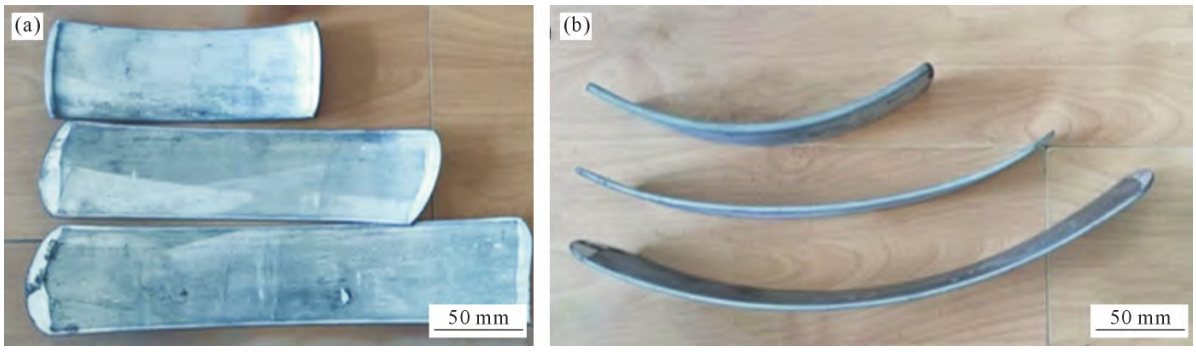


图 8 不同变形量轧制后的复合板：(a) 正面；(b) 侧面

Fig.8 Composite plates rolled with different pressures: (a) front view; (b) side view

程可以分为2个阶段：①当变形较小时，复合板受到的轧制力也较小，此时达到铝合金的屈服强度而未达到钛的屈服强度，纯钛为密排六方结构，滑移系较少，滑移系开动需要的应力更大，塑性较差，变形较困难。铝合金为面心立方结构，滑移系较多，滑移系开动较容易，塑性好，变形相对容易。当变形较小时，较小的轧制力使铝合金内滑移系开始滑动，铝合金开始变形，而此时尚未达到钛的屈服强度，钛内滑移系并未开动，钛合金不发生屈服，由于复合界面的存在，钛铝两种金属不能发生相对滑动，所以铝合金通过复合界面带动钛发生变形，使得复合板翘曲。②当变形量较大时，复合板受到的轧制力也较大，使得铝合金和纯钛同时发生屈服，此时，铝合金和纯钛会在轧制力的作用下发生变形，复合板的翘曲程度会减小。

2.2.2　对铸轧Ti/Al复合板组织的影响

复合板经25%变形量、500 ℃热轧后的界面SEM图像如图9所示。与50%变形量、500 ℃热轧后的复合板(图4b)相比，25%变形量热轧后的复合界面未发生明显弯曲变化，仍为较平直的界面，但是更大倍数下，25%变形量得到的复合板复合界面钛侧的表面粗糙度要比50%变形量的大。其原因是较小的变形量使复合板受到的轧制力较小，铝合金内由热轧变形提供的储存能较小，仅能带动钛层发生变形，不足以使钛层表面的锯齿状裂纹变平直。

复合板经75%变形量、500 ℃热轧后的界面SEM图像如图10所示。相比50%变形量的复合板，此时复合界面弯曲程度更大，在更大倍数下观察，界面钛侧的表面粗糙度也更大，而且在波状界面上又开始出现小的锯齿状裂纹。

轧制温度为500 ℃，不同变形量轧制后铝合金的EBSD图如图11所示，其中图11a和b分别为25%和75%变形量。当变形量为25%时，铝合金的组织未发生明显变形，晶界处仅有极少数的再结晶晶粒；当变形量增加到75%时，晶粒大部分为沿轧制方向拉长的变形晶粒，晶界处有少量的再结晶晶粒。

2.2.3　对铸轧Ti/Al复合板力学性能的影响

(1)剥离强度　经过不同变形量轧制后，复合板的剥离曲线如图12所示，复合板的结合强度得到小幅提升，平均剥离强度约为26.0 N/mm。在轧制实验中使用的是0.7 mm钛带制得的复合板，经过75%轧制后，钛层的理论厚度为0.175 mm，尽管复合板在轧制过程中钛层的变形量较小，但是由于不均匀变形，导致有些位置的厚度较小，甚至出现断裂失

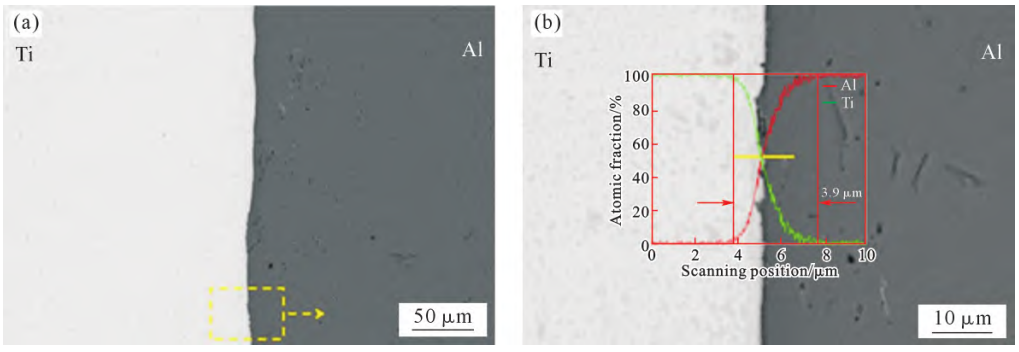


图 9　25%变形量，500 ℃热轧后复合板界面 SEM 图像：(a) 界面形貌；(b) 图(a)中黄框处的局部放大图及沿黄线的能谱线扫描结果

Fig.9　SEM images of the composite plate interface after hot rolling at 500 ℃ with a 25% reduction: (a) the morphology of the interface; (b) a partial magnification of the yellow box in (a) and the spectral line scanning results along the yellow line

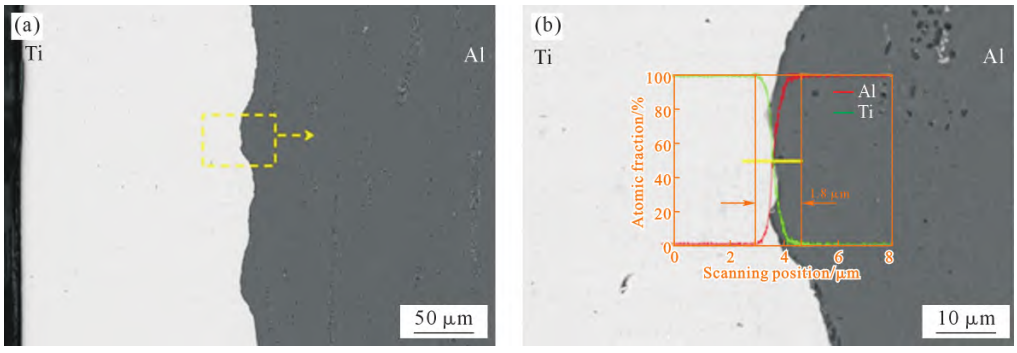


图 10　75%变形量、500 ℃热轧后复合板界面 SEM 图像：(a)界面形貌；(b) 图(a)中黄框处的局部放大图及沿黄线的能谱线扫描结果

Fig.10　SEM images of the composite plate interface after hot rolling at 500 ℃ with a 75% reduction: (a) the morphology of the interface; (b) a partial magnification of the yellow box in (a) and the spectral line scanning results along the yellow line

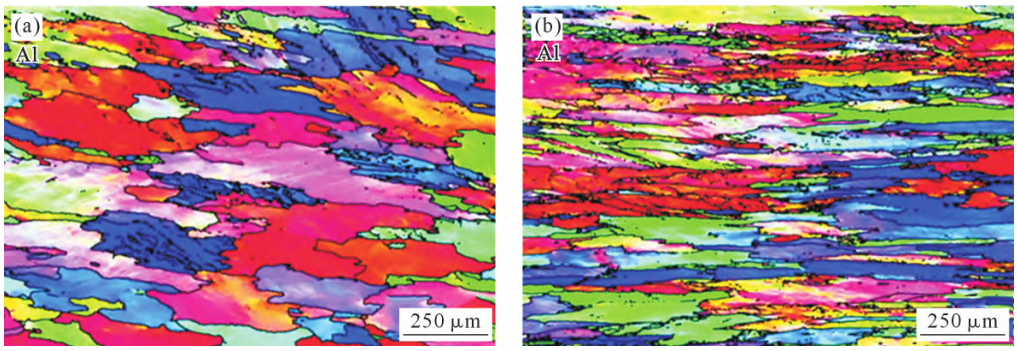


图 11 500 ℃不同变形量轧制后铝合金 EBSD 图：(a) 25%变形量；(b) 75%变形量

Fig.11 EBSD images of the aluminium alloy after rolling at 500 ℃ under different deformation conditions: (a) 25% deformation; (b) 75% deformation

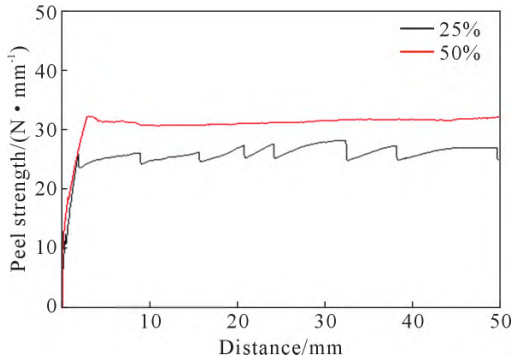


图 12 不同变形量轧制后复合板剥离曲线

Fig.12 Stripping curves of the composite plate after rolling with different reductions

效，所以未能对500 ℃、75%变形量轧制后得到的复合板进行剥离实验。

(2)显微维氏硬度　对在500 ℃下不同变形量轧制得到的复合板进行界面处微观维氏硬度测量，结果如图13所示。显微维氏硬度测试中，本应每组测量垂直于复合界面水平均匀分布的9个点，两点间的间距为50 μm，但是变形量为75%的复合板的钛层厚度不足200 μm，故钛侧只检测了3个点。从图中可知，随变形量的增加，不论是钛、铝基体还是复合界面处的硬度都会增加，并且钛基体和复合界面硬度增加的程度更大。钛的硬度约从110 HV增加至185 HV，界面硬度约从100 HV增加至145 HV，而铝的硬度约

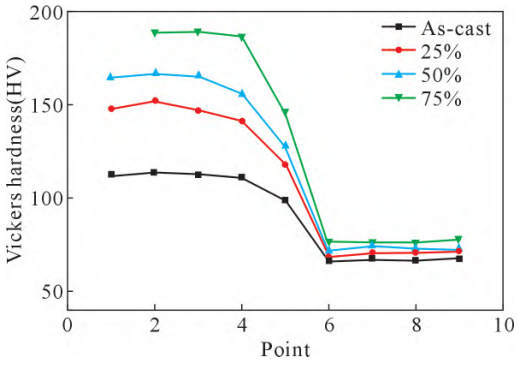


图 13 不同变形量轧制后 Ti/Al 复合界面处微观维氏硬度

Fig.13 Vickers hardness at the Ti/Al composite interface after rolling with different reductions

增加了6 HV。陈刚[19]提出层状金属复合板基体硬度取决于其在生产和加工过程中产生的加工硬化效果，界面处在没有氧化物、金属间化合物层等脆硬相出现时，复合界面的硬度取决于基体的硬度。这是由于在500 ℃进行轧制，对于铝合金来说属于热加工，但是对于纯钛来说属于冷加工，在热加工中铝由于有动态回复和动态再结晶的作用，使得轧制过程中加工硬化的一部分效果被抵消，从而导致硬度增加较慢，而钛带在冷加工过程中只有加工硬化起作用，加工硬化的效果随着变形量的增加而增大，故钛基体和复合界面的硬度增加较明显。

(3)室温拉伸性能　图14是不同变形量轧制后的试样拉伸曲线，表示试样的力学性能在轧制过程中的变化。轧制前Ti/Al复合板的抗拉强度为236 MPa，伸长率为25.3%，分别经过变形量为25%和50%轧制后，Ti/Al复合板的抗拉强度均得到提升，伸长率出现降低。在轧制变形量为50%时，Ti/Al复合板具有较好的力学性能，其抗拉强度为251 MPa，伸长率为20.9%。

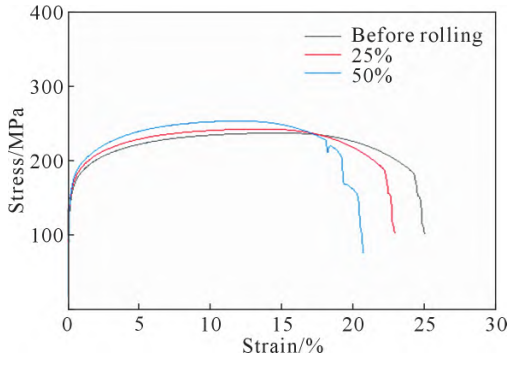


图 14 不同变形量轧制后试样拉伸曲线

Fig.14 Stress-strain curves of specimens after rolling with different reductions

图15是变形量为50%轧制后得到的复合板拉伸断口图，可以发现拉伸过程中，断裂首先发生在钛层，然后穿过复合界面向铝基体扩展，裂纹扩展过程中，复合界面处未发现宏观分层。

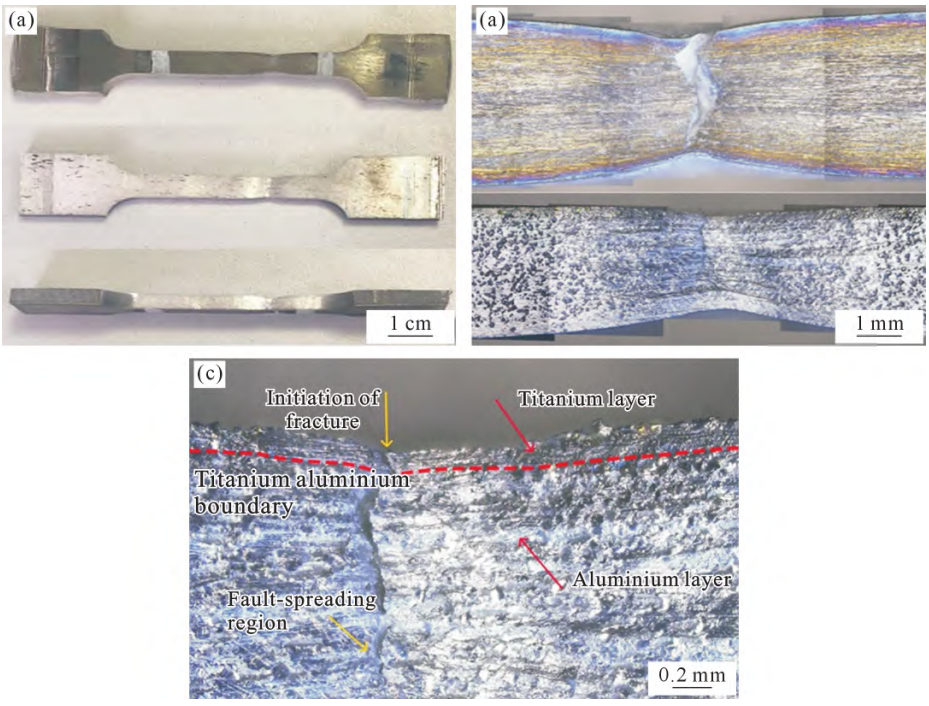


图 15　50%变形量轧制后拉伸试样：(a) 拉伸试样宏观形貌；(b) 断口处金相照片；(c) 钛铝分界线、断裂开始和扩展区金相照片

Fig.15　Tensile specimen after rolling with a 50% reduction: (a) macroscopic morphology of the tensile specimen; (b) metallographic photograph of the fracture; (c) OM image showing the boundary between titanium and aluminium, the beginning of fracture and the spreading zone

图16为不同变形量轧制后Ti/Al复合板拉伸试样界面处微观组织，其中图16a和b中复合板的变形量分别为25%和50%。当变形量增加至50%时，拉伸后的复合界面微观组织中仅发现一些几微米大小的孔洞，说明此时复合界面的结合强度已经很高。此外，随着变形量的增加，铝基体上的韧窝变少，撕裂脊变小，说明其韧性下降。

(4)杯突实验　图17为杯突实验后的试样，其中图17a_1和a_2、b_1和b_2是铸轧态铝层在内侧正、侧面的铸轧复合板，图17c_1和c_2、d_1和d_2为500 ℃变形量为50%轧制后的复合板，其铝层均在内侧正、侧面，测量其杯突深度，结果如表2所示。发现铸轧复合板钛层或铝层在外面的成型性能相同，而轧制后两种情况的杯突深度则有较大不同，且轧制后杯突深度较铸轧时略有减小，说明轧制后成型性能比铸轧板的稍弱，这与轧制后复合板的塑性降低有关。

表2 杯突实验结果

Tab.2 Results of the Erichsen cupping test

Number	Average cup depth/mm	Standard deviation
a	9.97	0.15
b	9.67	0.91
c	7.62	0.27
d	8.80	0.10

3　讨论与分析

3.1　轧制工艺对铸轧Ti/Al复合板宏观组织和微观结构的影响

铸轧复合的优势之一就是能够在复合过程中同时实现冶金结合[20]和物理结合，获得具有一定强度

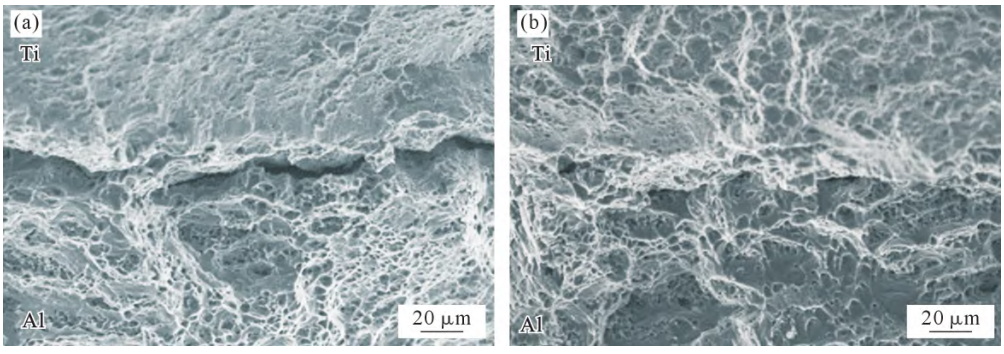


图 16　不同变形量轧制后 Ti/Al 复合板拉伸试样的界面处微观组织：(a) 25%; (b) 50%

Fig.16　Microstructure at the interface of the tensile sample of the Ti/Al composite plates after rolling with different reduction ratios: (a) 25%; (b) 50%

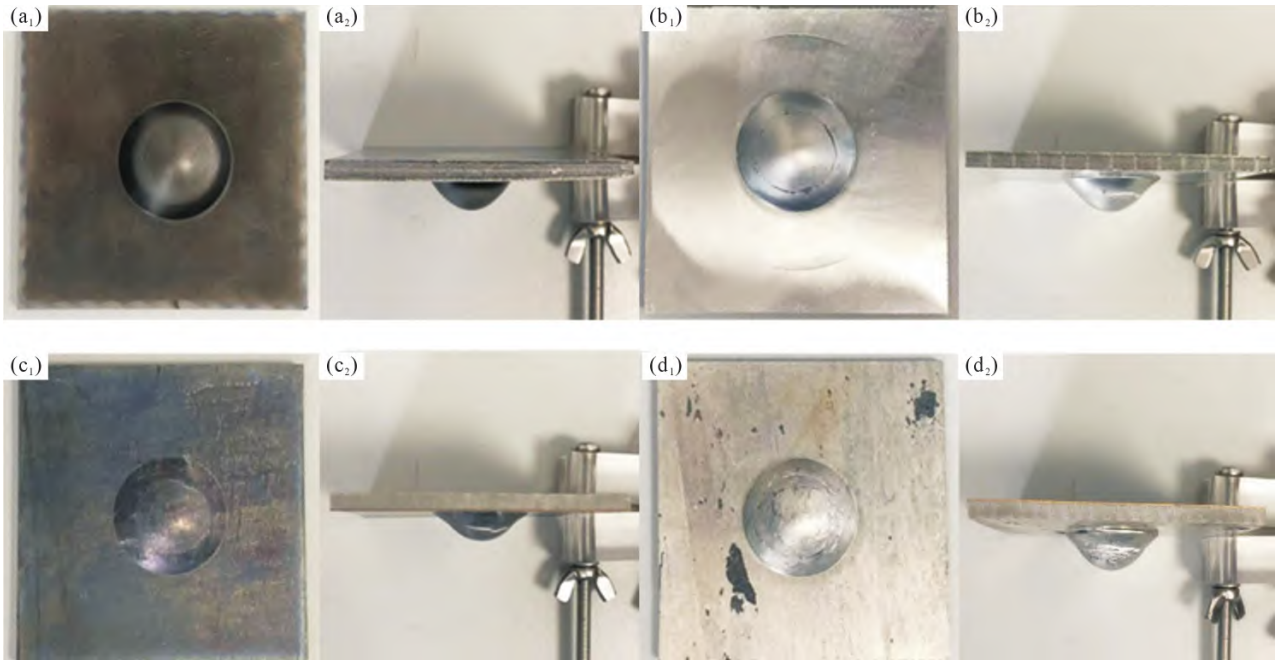


图 17 杯突实验后试样：(a_1~b_2) 铸轧态；(c_1~d_2) 500 ℃，变形量 50%

Fig.17 Specimens after the Erichsen cupping test: (a_1~b_2) cast-rolled state; (c_1~d_2) 500 ℃, 50% deformation

的复合界面，这样性能良好的界面可以实现复合板复力时，在两层金属间较好地传递，使得复合板进行协同变形。而在Ti/Al复合板中，纯钛TA2为密排六方结构，滑移系较少，滑移系开动需要的应力更大，塑性较差，变形较困难；铝合金AA7005为面心立方结构，滑移系较多，滑移系开动较容易，塑性好，变形相对容易。

不同温度下、变形量50%轧制过程中，复合板在轧辊轧制力的作用下厚度减小，长度增加，但复合板宽展方向上的尺寸并未发生较大变化；复合板发生一定的翘曲，其中500 ℃复合板的翘曲程度较小，钛、铝金属的变形协调性较好，470和530 ℃时翘曲严重，变形协调性较差。钛和铝物理性能有较大差异，变形抗力不同。温度升高时，由于铝合金熔点低，滑移系开动所需的能量更少，更易变形；钛的熔点较高，在轧制温度下未能得到滑移系开动所需的能量，使得钛铝物理性能差异更大，所以热轧后复合板会向钛侧发生翘曲。当变形量较小时，受到的轧制力较小，达到铝合金的屈服强度，使铝合金内滑移系开始滑动，铝合金开始变形，而此时尚未达到钛的屈服强度，钛内滑移系并未开动，钛合金不发生屈服。由于复合界面的存在，钛铝两种金属不能发生相对滑动，所以铝合金通过复合界面带动钛发生变形，使得复合板翘曲。当变形量较大时，复合板受到的轧制力也较大，使得铝合金AA7005和纯钛TA2同时发生屈服。此时，铝合金和纯钛会在轧制力的作用下同时发生变形，所以变形量较大时，复合板的翘曲程度会减小。

Ti/Al复合板的界面发生弯曲变形，由铸轧态的平直界面变为锯齿状界面，在界面处钛基体一侧出现微米级的裂纹和锯齿状的凹陷，铝合金在压力的作用下挤入到这些凹陷中。500 ℃热轧后的复合界面的弯曲变形更明显，出现一些较大的凸起和凹陷，表面粗糙程度变大，但是界面处钛基体上锯齿状的凹陷和裂纹消失，变为较圆润的凹凸。当热轧温度增加到530 ℃时，表面粗糙程度再次增大，在界面大的凹陷内，存在着较多小的凹陷和凸起。25%变形量热轧后的复合界面未发生明显的弯曲变化，仍为较平直界面，但是更大倍数下，25%变形量得到的复合板复合界面钛侧的表面粗糙度要比50%变形量的更大。复合板经75%变形量热轧后的界面相比50%变形量复合界面，弯曲程度更大，在较大倍数下观察，界面钛侧的表面粗糙度也更大，而且在波状界面上又开始出现小的锯齿状裂纹。

3.2 轧制工艺对铸轧Ti/Al复合板组织性能的影响

不同轧制温度下，50%变形量轧制后，复合板的结合强度得到小幅提升。随着变形量的增加，钛、铝基体和复合界面处的硬度都会增加，并且钛基体和复合界面增加的程度更大。此外，发现铸轧复合板钛层或铝层在外面的成型性能相同，而轧制后两种情况的杯突深度则有较大不同，且轧制后杯突深度较铸轧时略有减小，说明轧制后成型性能比铸轧板的稍弱，这与轧制后复合板的塑性降低有关。

4　结论

(1)不同温度进行50%变形量的轧制时，复合板在轧辊轧制力的作用下厚度减小、长度增加，宽度方向基本不发生变化。复合板发生不同程度的翘曲，在470和530 ℃轧制时，复合板翘曲较为严重，在500 ℃轧制时，复合板整体的翘曲程度较小。3块复合板的钛侧表面都较为平整，内部未发现明显的裂痕，也无边裂现象，铝侧内部也无明显裂痕，但边部出现少许边裂。

(2)不同温度进行50%变形量的轧制时，复合界面由平直界面变为波浪状界面，在轧制温度为470 ℃时，复合界面为锯齿状，而在轧制温度为500和530 ℃时，复合界面仍为波浪状界面。复合板的结合强度随轧制温度的升高而提高。

(3)在相同温度，不同变形量轧制过程中，当变形量小于50%时，复合板的平均结合强度随着变形量的增大而增加。在变形量为25%时，复合板界面表现为凹凸锯齿状，此时，剥离曲线出现较大的波动，结合较不稳定；当变形量为75%时，由于钛层金属太薄，且变化不平均，导致钛层出现破裂使复合板失效。

参考文献：

[1] 《材料科学技术百科全书》编委会. 材料科学技术百科全书[M]. 北京：中国大百科全书出版社，1995.
Editorial Board of Encyclopedia of Materials Science and Technology. Encyclopedia of materials science and technology [M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1995.

[2] LIU M F, ZHANG C S, MENG Z J, ZHAO G Q, CHEN L. $TiAl_3$ nucleation mechanism and atomic-scale interface features in the Al/Ti composite structures [J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 226: 109331.

[3] ZHANG J Y, WANG Y H, LYU Z, CHEN Q A, CHEN Y Y, LI H Z. 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.

[4] LIU M F, ZHANG C S, HE H X, ZHAO G Q, CHEN L, MA X W. Interface microstructure evolution and mechanical properties of the extruded fiber-reinforced aluminum-based composite bar [J]. Materials & Design, 2020, 188: 108446.

[5] YU M R, ZHAO H Y, JIANG Z H, ZHANG Z L, XU F, ZHOU L SONG X G. Influence of welding parameters on interface evolution and mechanical properties of FSW Al/Ti lap joints[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(8): 1543-1554.

[6] 崔鹏鹏. 双金属带材固液复合铸轧过程的研究[D]. 太原：太原科技大学，2016.
CUI P P. Research on bimetal strip soild-liquid composite rolling-cast process[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science & Technology, 2016.

[7] 王文焱，史士钦，尚郑平，邵昌，黄文君，许开辉，谢敬佩，黄亚博，刘冀尧. 铸轧法制备钛铝复合板的界面组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金，2016, 36(10): 1084-1088.
WANG W Y, SHI S Q, ZHENG S P, SHAO C, HUANG W J, XUN K H, XIE J Y, HUANG Y B, LIU J R. Interfacial microstructure and properties of Ti/Al rolling-casted composite plate[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(10) : 1084-1088.

[8] 韩建超，刘畅，贾燚，任忠凯，王涛，郭继保，陈玉勇. 钛/铝复合板研究进展[J]. 中国有色金属学报，2020, 30(6): 1270-1280.
HAN J C, LIU C, JIA Y, REN Z K, WANG T, GUO J B, CHEN Y Y. Research progress on titanium/aluminum composite plate [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(6): 1270-1280.

[9] YU H L, LU C, TIEU A K, LI H J, GODBOLE A, KONG C. Annealing effect on microstructure and mechanical properties of Al/Ti/Al laminate sheets [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 660: 195-204.

[10] ZHANG X B , YU Y B, LIU B, ZHAO Y C, REN J Q, YAN Y J, CAO R, CHEN J H. In-situ investigation of deformation behavior and fracture mechanism of laminated Al/Ti composites fabricated by hot rolling [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 783: 55-65.

[11] FRONCZEK D M, WOJEWODA-BUDKA J, CHULIST R, SYPIEN A, KORNEVA A, SZULC Z, SCHELL N, ZIEBA P. Structural properties of Ti/Al clads manufactured by explosive welding and annealing[J]. Materials & Design, 2016, 91: 80-89.

[12] BATAEV I A, BATAEV A A, MALI V I, PAVLIUKOVA D V. Structural and mechanical properties of metallic-intermetallic laminate composites produced by explosive welding and annealing[J]. Materials & Design, 2012, 35: 225-234.

[13] 马志新，胡捷，李德富，李彦利. 层状金属复合板的研究和生产现状[J]. 稀有金属，2003, 27(6): 799-803.
MA Z X, HU J, LI D F, LI Y L. Overview of research and manufacture of layer-metal composite plate[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003, 27(6): 799-803.

[14] 刘环，郑晓冉. 层状金属复合板制备技术[J]. 材料导报，2012, 26 (S2): 131-134, 149.
LIU H, ZHENG X R. The manufacturing technique of clad metals sheet [J]. Materials Reports, 2012, 26(S2): 131-134,149.

[15] 刘晓涛，张延安，崔建忠. 层状金属复合材料生产工艺及其新进展 [J]. 材料导报，2002, 16(7): 41-43, 50.
LIU X T, ZHANG Y A, CUI J Z. Technology of clad metal production and its latest progress [J]. Materials Reports, 2002, 16(7): 41-43, 50.

[16] 陈泽军，陈全忠，黄光杰，刘雪峰. 铝/钛/铝三层复合板热轧工艺及微观组织研究[J]. 材料导报，2012, 26(3): 106-109.
CHEN Z J, CHEN Q Z, HUANG G J, LIU X F. Research on roll bonding technology and microstructure of Al/Ti/Al three-layer clad sheet fabricated by hot rolling[J]. Materials Reports, 2012, 26 (3): 106-109.

[17] 祁梓宸，余超，肖宏，许成. 异温轧制制备钛/铝复合板的变形协调性与复合性能[J]. 中国有色金属学报，2018, 28(6): 1120-1127.

QI Z C, YU C, XIAO H, XU C. Deformation coordination compatibility and bonding properties of Ti/Al composite plates prepared by different temperature rolling[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(6): 1120-1127.

[18] HUANG H G, CHEN P, JI C. Soild-liquid cast-rolling bonding (SLCRB) and annealing of Ti/Al cladding strip [J]. Materials & Design, 2017, 118: 233-244.

[19] 陈刚. 双辊铸轧钢/铝复合板坯工艺及理论研究[D]. 沈阳：东北大学，2017.

CHEN G. Study on technology and theory of twin-roll cast steel/aluminum clad sheet[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.

[20] XU J J, FU J Y, LI S J, XU G M, LI Y, WANG Z D. Effect of annealing and cold rolling on interface microstructure and properties of Ti/Al/Cu cald sheet fabricated by horizontal twin-roll casting [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 16: 530-543.