

文章编号: 1004-0609(2005)07-1107-05

不锈钢-3003 铝合金蜂窝夹芯板轧制复合工艺^①

祖国胤¹, 冯仁杰², 王 宁², 于九明², 温景林¹

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004;

2. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

摘 要: 研究了采用轧制复合方法生产不锈钢-3003 铝合金蜂窝夹芯板的工艺。结果表明: 经过表面清理的面板和芯板, 在加热至 500~550 ℃后进行轧制复合, 在变形率为 25% 以上时即可以实现牢固的初结合, 面板与芯板间的结合主要依靠“裂口机制”; 轧制过程中芯板上的圆孔出现了类似于墩粗的情况, 为使芯板上孔系能够发挥作用, 轧制变形率应当控制在 25%~40% 之间; 经过退火热处理后, 夹芯板的抗拉强度、弯曲强度和延伸率等力学性能均达到相关产品标准。

关键词: 不锈钢-3003 铝合金; 轧制复合; 蜂窝夹芯板; 裂口机制; 变形率

中图分类号: TB 321

文献标识码: A

Roll-bonding technology of stainless steel/ 3003 aluminum alloy honeycomb sandwich panel

ZU Guo-yin¹, FENG Ren-jie², WANG Ning², YU Jiu-ming², WEN Jing-lin¹

(1. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. State Key Laboratory of Rolling Technology and Automation,
Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The roll-bonding technology of stainless steel/ 3003 aluminum alloy honeycomb sandwich panel was studied. The results show that the skin and core plate whose surfaces are cleaned can realize excellent interface bonding when deformation rate exceeds 25% and temperature ranges from 500 to 550 ℃. The bonding way between both base metal is typically the split mechanism. And round holes of core plate appear bore-out-of-round during the course of roll-bonding. In order to make full use of the holes in the core plate, deformation rate of 25%~40% is demanded. The tensile strength, flexural strength and elongation of sandwich board all meet the correlative criteria after annealing heat treated.

Key words: stainless steel/ 3003 aluminum alloy; roll-bonding; honeycomb sandwich panel; split mechanism; deformation rate

钢质蜂窝夹芯板是由两层厚度薄但强度高的面板材料, 中间夹一层较厚而质量轻的蜂窝夹芯组成的复合板^[1]。这种材料具有质量轻、强度高、减震、耐冲击等突出的优点, 是一种高效的结构材料, 在航空、造船、汽车等领域具有广阔的应用前景^[2~5]。目前我国在航空航天领域应用的高性能钢质蜂窝夹

芯板主要依赖进口, 产品的开发和研究较为分散, 尚未形成规模化生产, 在生产工艺方面多采用胶接、热压等方法, 轧制复合制备技术的研究尚处于摸索阶段^[6~8]。

在采用轧制复合工艺制备钢质蜂窝夹芯板的研究中发现, 轧制变形率等工艺参数对产品的力学性

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2002AA334070); 国家自然科学基金资助项目(50174019)

收稿日期: 2004-12-02; 修订日期: 2005-04-26

作者简介: 祖国胤(1977-), 男, 讲师, 博士。

通讯作者: 祖国胤, 博士; 电话: 024-83686415; E-mail: zuguoyin@163.com

能有着很大的影响^[9, 10], 本文作者以不锈钢-3003 铝合金蜂窝夹芯板为研究对象, 通过系统实验得出轧制复合工艺中最佳的变形率条件, 探讨了材料的结合机制, 分析了复合过程中的轧件边缘效应和孔系的变形规律。

1 实验

1.1 实验材料

3003 铝合金板规格为: 长 120 mm, 宽 50 mm, 厚 3 mm。主要成分(质量分数, %)为 Si ≤ 0.20 , Mn 1.20, Mg 0.20, Cu 0.20, Zn ≤ 1.50 , Al 余量。

不锈钢带采用奥氏体不锈钢 304, 规格为: 长 120 mm, 宽 50 mm, 厚 0.27 mm。主要成分(质量分数, %)为 C 0.05, Si 0.47, Mn 1.22, Cr 18.19, Ni 8.34, Fe 余量。

1.2 实验工艺

在夹芯板的芯材孔系设计中, 目前较为常用的有正六角形、菱形、圆形和矩形等^[11]。考虑到 3003 铝合金板的变形特点及加工的经济性, 本实验采用圆形孔系, 圆孔的直径为 4 mm, 孔之间的最短圆心距为 7 mm。

实验采用传统的表面清理、轧制复合、扩散退火的“三步法”复合工艺。采用铁刷手工清刷的方式将不锈钢与 3003 铝合金板的表面刷至理想洁净的“砂面”效果, 用丙酮清洗后烘干。清理过的不锈钢及 3003 铝合金板在点焊机上点进行点焊定位后送入加热炉中加热, 在加热的过程中向炉中通入足量的氩气以防止不锈钢发生氧化。加热温度设定为 470、500、520 和 550 $^{\circ}\text{C}$, 轧制复合的变形率设定为 20%~50%。轧后的夹芯板采用 400 $^{\circ}\text{C}$ 退火 1 h 的热处理工艺, 使两种基体进行充分的元素互扩散, 形成牢固的冶金结合, 进一步提高材料的结合强度。

实验中检测了蜂窝夹芯板的主要力学性能指标。采用反复弯曲次数来反映材料的冷弯加工性能, 根据 GB2073-93 双金属弯曲性能的测试标准制备试样, 试样宽度为 35~40 mm, 夹口圆弧半径为 13 mm。在 Instron 4206 电子材料试验机上测定了夹芯板的抗拉强度和延伸率等指标。

2 结果及分析

2.1 金相组织观察及扫描电镜分析

在夹芯板的制备中, 复合界面结合的好坏直接

影响到产品的各项力学性能。实验发现当加热温度为 500~550 $^{\circ}\text{C}$ 时, 25% 的变形率即可实现不锈钢面板与 3003 铝合金芯板良好的初结合。图 1 所示为在加热温度为 520 $^{\circ}\text{C}$, 变形率为 30% 的工艺条件下轧后未经退火的夹芯板不同位置的显微组织。从图中可以看到坯料在经过轧制实现复合后, 在整个界面上不锈钢面板与 3003 铝合金芯板结合情况良好, 复合界面平直、连续, 为典型的轧制态形貌, 复合界面上没有明显的缺陷存在。芯板上圆孔的形状发生了明显的变化, 孔的边缘同不锈钢面板的结合处复合的效果也较为理想。

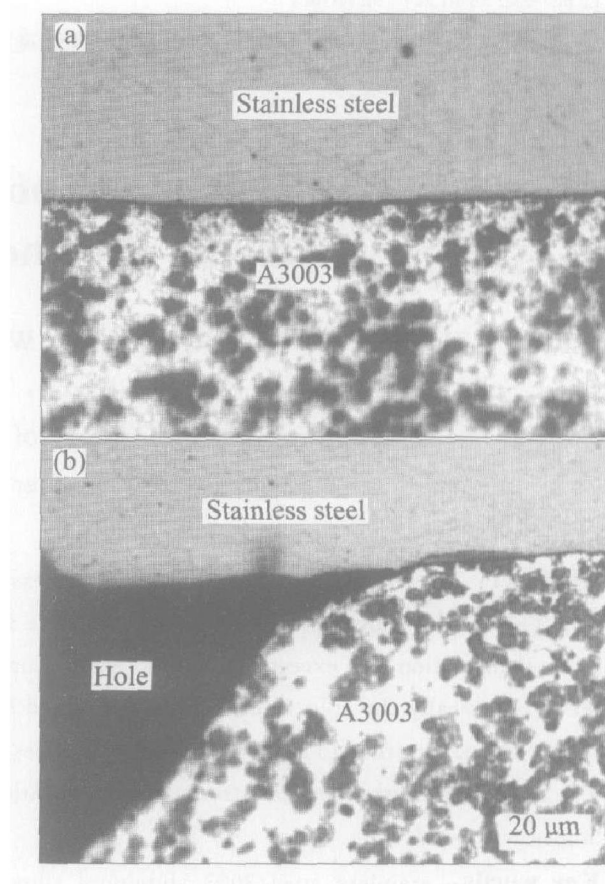


图 1 夹芯板不同位置的显微组织

Fig. 1 Microstructures on different positions of sandwich panel

(a) —Zone without hole; (b) —Zone with hole

对于不锈钢-3003 铝合金夹芯板而言, 由于不锈钢的变形抗力值远大于 3003 铝合金, 并且这种差别在加热后体现得更加明显, 因此在轧制复合过程中变形主要集中于 3003 铝合金芯板上。实验结果显示: 当坯料的变形率达到 50% 时, 不锈钢面板的变形率仅约为 6%。由于不锈钢面板变形很小, 其表面致密的氧化膜(主要成分为 Cr_2O_3) 很难被破坏。图 2 所示为加热温度为 520 $^{\circ}\text{C}$, 变形率为 50% 条件下轧后未经退火的夹芯板剥离后的背反射照

片。图 2(a) 中白色区域为铝元素, 由图可见在不锈钢基体上分布有大量的铝。造成这种现象的主要原因在于: 轧制过程中 3003 铝合金表面脆性的氧化膜被破坏后, 新鲜的金属大量被挤出并与不锈钢基体接触形成“粘和点”, “粘和点”占整个结合面的比例以及结合的牢固程度决定了复合效果。将复合板进行剥离时, 由于“粘和点”附近的 3003 铝合金同不锈钢的结合较之其同 3003 铝合金芯板的结合更为牢固, 所以剥离后在不锈钢面板上“粘”有大量的铝。图 2(b) 中所显示白色区域为不锈钢, 由图 2 可知, 在剥离后 3003 铝合金板一侧“粘”有不锈钢的面积就要少的多, 并且分布较为分散。分析认为这部分被“粘”到 3003 铝合金板上的不锈钢的来源主要是在清刷过程中在不锈钢表面形成的一些硬化块, 硬化块在轧制过程中被破坏, 同基体分离并与 3003 铝合金板结合, 但这种结合的强度较低, 并且只占结合面的很小一部分。通过以上的分析可见, 在不锈钢面板与 3003 铝合金芯板的轧制复合工艺中, 主要的结合方式为“裂口机制”^[12]。

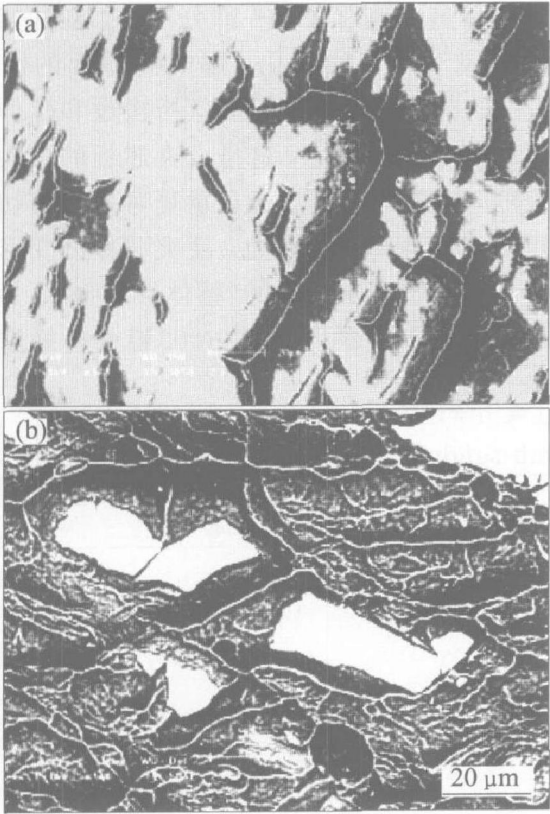


图 2 夹芯板剥离后的 SEM 背反射照片
Fig. 2 SEM back-reflection photographs of honeycomb sandwich panel after stripped
(a) —Stainless steel body; (b) —A3003 body

2.2 轧制复合过程中的边缘效应和孔系的变形分析
在蜂窝夹芯板的制备工艺中, 由于在芯板上布

满圆孔, 在轧制过程中坯料受到轧制力的作用沿轧制方向要发生延展, 同时在两种基体的界面上还存在着摩擦力, 因而在复合后芯板上圆孔的形状会发生明显的变化。由图 1 可以看到轧后芯板上圆孔的变化情况, 而通过图 3 所示的孔周围的背反射图可以更加直观地了解圆孔的形状变化趋势。

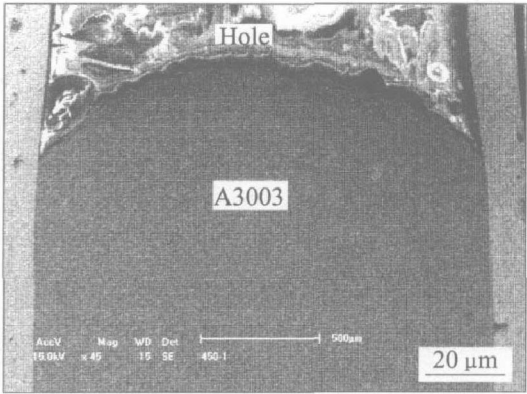


图 3 圆孔周围的 SEM 背反射照片
Fig. 3 SEM back-reflection photography of round-hole circum

由图 3 可见, 轧制复合后圆形孔变形为椭圆形, 椭圆的长轴与轧制方向平行。从厚度方向截面看圆孔周边金属出现了类似于墩粗的单鼓形。这是由于在轧制压力的作用下, 芯板和面板间的摩擦力很大, 金属的流动存在着部分粘着现象。轧制压力使芯板沿轧制方向延展, 圆孔内壁的金属比复合界面处的金属更容易流动, 造成芯板圆孔内壁的一部分金属翻平到接触面上, 使孔周边金属出现了类似于墩粗的单鼓形的变化。

对多孔夹芯材料而言, 孔系的控制非常关键。在轧制工艺中影响圆孔形状变化的主要因素是芯板的变形率, 变形率过大将使孔系消失, 失去蜂窝夹芯板的结构特点; 而变形率过小会降低芯板与面板结合强度, 影响使用性能。由于圆孔在轧制过程中由圆形变成椭圆形, 因此可以根据椭圆度的变化来分析在轧制过程中圆孔的变化情况, 所谓的椭圆度是指椭圆短轴与长轴的比值。图 4 反映了轧制过程中椭圆度与变形率的关系。

从图 4 可以看到, 在夹芯板变形率小于 40% 时, 孔的椭圆度变化较为平缓。当变形率超过 40% 后, 孔的椭圆度急剧变小, 表示此时在复合界面处孔周围的金属流动状态发生了突变。而当变形率达到 50% 时, 芯板上孔的椭圆度仅为 0.43, 此时孔系已经失去其应有的作用。数据分析表明: 采用轧制复合工艺制备不锈钢-3003 铝合金蜂窝夹芯板时,

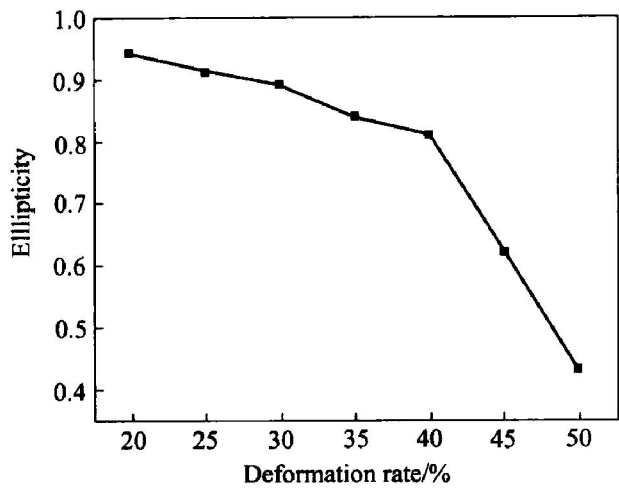


图 4 夹芯板椭圆度与变形率的关系

Fig. 4 Relation between ellipticity and deformation rate of honeycomb sandwich panel

为了保证孔系在轧后能够发挥相应的作用，应当将变形率控制在 40% 以下。后续进行的夹芯板力学性能测试结果显示，在变形率小于 25% 时，夹芯板的初结合强度较低，将会严重影响到产品的各项力学性能。因此综合考虑在轧制过程中孔系的形状变化和夹芯板的初结合效果两个影响因素，不锈钢-3003 铝合金蜂窝夹芯板的在轧制复合工艺中的变形率应当控制在 25% ~ 40% 之间。

2.3 不锈钢-3003 铝合金蜂窝夹芯板的力学性能

对于一种新材料来说，产品的各项力学性能能否满足使用要求至关重要，实验中测定了不同工艺

条件下制备的不锈钢-3003 铝合金蜂窝夹芯板的各项主要力学性能，材料均采用 400 ℃条件下 1 h 的扩散退火处理，表 1 列出了检测后所得到的各项数据。为便于比较，表中同时列出了不锈钢-3003 复合板的相关数据。

由表 1 可见，采用轧制复合工艺制备不锈钢-3003 铝合金蜂窝夹芯板，在加热温度为 520 ℃时材料的各项力学性能达到最佳，变形率则控制在 30% 左右佳，此时夹芯板的各项力学性能指标均达到或超过 GB232-82 中的相关标准。由表 1 可知，夹芯板的抗拉强度随变形率的提高而增大，与文献[13, 14] 的研究成果一致，但随着变形率的提高，夹芯板的弯折次数和延伸率则先上升后下降，变形率为 30% 时，弯折次数和延伸率达到最大值。分析认为：夹芯板的弯折次数和延伸率不仅受复合界面结合强度的影响，同不锈钢在轧制过程中所产生的加工硬化也有着密切的关系。另外不锈钢-3003 复合板的抗拉强度明显高于相同工艺制度下夹芯板的指标，其原因在于夹芯板上布满了圆孔，造成有效的结合面积远小于无孔的实心复合板，并且夹芯板的圆孔内不可避免地要残留一部分空气，在加热的过程中会造成不锈钢的氧化，影响到界面的结合强度。表中的数据显示夹芯板的弯折次数和延伸率要高于无孔复合板的指标，这是由夹芯板的结构特点所决定的，夹芯板中的芯板在承受弯折和剪切等变形时可以很好地传递剪切力，使夹芯板的变形相比于复合板体现出更加明显的“整体性”特点。另外比较采用本工艺制备的不锈钢-3003 铝合金蜂窝夹芯

表 1 蜂窝夹芯板及复合板的主要力学性能

Table 1 Main mechanical properties of steel honeycomb sandwich panel and composite board					
Material	Heating-up temperature/ ℃	Deformation rate/ %	Tensile strength/ MPa	Number of repeated bending	Elongation/ %
SS/ A3003 honeycomb sandwich panel	500	20	136.4	11	50.36
	500	30	142.6	17	54.39
	500	40	146.5	12	46.35
	520	20	145.8	13	53.72
	520	30	157.6	20	59.25
	520	40	159.8	11	44.32
	550	20	130.5	9	47.13
	550	30	137.9	11	49.25
	550	40	141.4	6	45.25
SS/ A3003 composite sheet	500	30	198.3	6	40.26
	520	30	215.6	8	43.57
	550	30	192.3	4	37.28

板和不锈钢-3003 铝合金复合板的密度, 发现夹芯板质量可以减轻 40%~60%, 可见蜂窝夹芯材料在节约材料用量方面具有极大的优势。

3 结论

1) 轧制温度为 500~550 °C, 变形率为 25% 以上时, 可以实现不锈钢面板与 3003 铝合金芯板间牢固的初结合, 两种母材之间的结合主要依靠“裂口机制”。

2) 为了充分发挥孔系的作用并保证初结合强度, 不锈钢-3003 铝合金蜂窝夹芯板的轧制变形率应当控制在 25%~40% 之间。

3) 采用本工艺制备的不锈钢-3003 铝合金蜂窝夹芯板的各项力学性能均可以达到 GB232-82 中的相关标准, 其弯折次数和延伸率指标明显高于无孔复合板。

REFERENCES

- [1] 张媛, 郑百哲, 李妮. 蜂窝夹芯板的理论研究[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2001, 19(4): 47-50.
ZHANG Yuan, ZHENG Baizhe, LI Ni. Theoretical research of honeycomb sandwich panel[J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2001, 19(4): 47-50.
- [2] 冯仁杰, 于九明. 蜂窝夹芯复合板及其在汽车工业中的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2003(8): 30-32.
FENG Renjie, YU Jiuming. Honeycomb filled board and its application in automotive industry[J]. Automobile Technology and Material, 2003(8): 30-32.
- [3] Renji K, Shankar N S. Loss factors of composite honeycomb sandwich panels[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 250(4): 745-761.
- [4] Cise D, Lakes R S. Moisture ingress in honeycomb core sandwich panels[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1997, 6(6): 732-736.
- [5] Davies G O, Hitchings D, Besant T, et al. Compression after impact strength of composite sandwich panels[J]. Composite Structures, 2004, 63(1): 1-9.
- [6] Daurelio G, Ludovico A, Nenci F, et al. Thin stainless steel sandwich structural panels all welded by laser technology[A]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering[C]. Tsukuba Japan, 1997. 184-211.
- [7] Soutis C, Spearing S M. Compressive response of notched, woven fabric, face sheet honeycomb sandwich panels[J]. Plastics Rubber and Composites, 2002, 31(9): 392-397.
- [8] Toribio M G, Spearing S M. Compressive response of notched glass-fiber epoxy/honeycomb sandwich panels[J]. Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001, 32(6): 859-870.
- [9] Narayana K B, Ramanath K S, Bonde D H. Modelling honeycomb sandwich panels with shell elements in finite element analysis[J]. Journal of Spacecraft Technology, 1995, 5(3): 33.
- [10] 朱旭霞, 彭大暑, 黎祚坚. 不锈钢/铝(合金)/不锈钢多层复合板的冲压成型性能[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 914-918.
ZHU Xu-xia, PENG Dashu, LI Zuo-jian. Numerical simulation of deep drawing procedure of stainless steel/aluminum alloy/stainless steel composite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(4): 914-918.
- [11] 符定梅, 韩静涛, 刘靖, 等. 钢质蜂窝夹芯板的研究进展[J]. 航空精密制造技术, 2004, 40(3): 14-15.
FU Ding-mei, HAN Jing-tao, LIU Jing, et al. Process on study of honeycomb sandwich steel panel[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2004, 40(3): 14-15.
- [12] 李河宗, 李玉刚, 于九明, 等. 不锈钢和铝固相轧制复合的结合机理[J]. 河北理工学院学报, 2002, 24(2): 25-28.
LI He-zong, LI Yu-gang, YU Jiuming, et al. Mechanism of solid bonding of stainless steel with aluminum by rolling[J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 2002, 24(2): 25-28.
- [13] 祖国胤, 王宁, 于九明, 等. TLP 连接技术在不锈钢-3003 铝合金复合板制备中的应用[J]. 中国有色金属学报, 2003: 15(1): 79-83.
ZU Guoyin, WANG Ning, YU Jiuming, et al. Application of TLP joining techniques in preparing bonding plates of stainless steel/A3003[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003: 15(1): 79-83.
- [14] Narayana K B, Ramanath K S, Bonde D H. Modelling honeycomb sandwich panels with shell elements in finite element analysis[J]. Journal of Spacecraft Technology, 1995, 5(3): 33.
- [15] Wolff E G, Chen H, Oakes D W. Hydrothermal deformation of composite sandwich panels[J]. Advanced Composites Letters, 2000, 9(1): 35-43.

(编辑 龙怀中)