

加热温度对 AZ31 镁合金薄板压力 连接接头性能的影响

石柏军, 李 航, 彭 松, 廖树辉
(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘 要: 采用凹模加热法对 1 mm 厚的 AZ31 镁合金薄板进行加热, 加热温度区间为 150~375 °C, 然后进行压力连接试验, 并采用剪切和拉伸剥离两种试验方法对各组接头的连接强度进行测试。结果表明: 适合 AZ31 镁合金压力连接的凹模温度区间是 250~350 °C, 温度过低接头会出现颈部断裂, 温度过高会产生底部穿孔现象, 最佳凹模温度在 300 °C 左右; 在 300 °C 条件下压接 AZ31 镁合金, 其接头十字剥离最大承载力为 600 N, 而剪切最大承载力达到了 1 600 N, 连接强度较高。

关键词: 压力连接; AZ31 镁合金; 凹模加热法; 强度

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2013)012-0027-04

Effect of Heating Temperature on Clinching Joint of AZ31 Magnesium Sheets

SHI Bai-jun, LI Hang, PENG Song, LIAO Shu-hui

(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Clinching tests were carried out after AZ31 magnesium alloy sheets in thickness of 1 mm were heated by female die heating at temperature range of 150—375 °C. The joint strength was tested using shear test and tensile test. The results show that the suitable range of die temperature was 250 °C to 350 °C. If the temperature was too low, fracture in the neck would happen. If the temperature was too high, hole punching in the bottom of joints would be found. And the best die temperature was around 300 °C at which the joint strength was the highest. The normal bearing force of the joint clinched at 300 °C was 600 N and the shear bearing force was 1 600 N.

Key words: clinching; AZ31 magnesium alloy; female die heating; strength

0 引 言

镁合金是目前工业应用中密度最小的金属结构材料, 具有良好的导电性、导热性、电磁屏蔽性, 同时比强度和比刚度高, 减震性好, 切削加工和尺寸稳定性佳, 易回收, 有利于环保等优点, 在航空、汽车、电子等领域得到了越来越广泛的应用, 被誉为“21 世纪的绿色工程材料”。但由于镁在高温下化学稳定性、抗氧化性差, 热膨胀系数较大等原因, 导致采用传统焊接方法连接镁合金薄板时会出现疏松氧化层、热裂纹等问题, 因此一般认为镁合金不适宜焊接^[1]。

压力连接是通过挤压金属薄板使其发生机械变

形形成自内嵌互锁的一种连接方式, 一般应用于塑性较好的材料, 如钢板、铝板等。与其他连接方法(如传统熔化焊等)相比, 压力连接的应用范围更广阔, 既能实现不同材料薄板间的连接, 又能保证薄板表面镀层的完好性^[2], 同时无需铆钉等辅助物件, 也不会产生废料, 在经济性、环保性上可以达到更高的水平。目前, 工业生产中镁合金薄板的连接主要为镁-镁、钢-镁连接, 使压力连接技术具有相当大的优势。但镁合金为密排六方晶体结构, 常温下塑性变形能力较差^[3-4], 因此国内外对压力连接技术的研究与应用多集中在高强度钢板、铝合金薄板的连接上, 对于镁合金薄板压力连接的研究鲜有报道。

有研究表明, 随温度升高, 镁合金材料的抗拉强度下降, 塑性明显提高, 材料的各向异性指数下降^[5-7]。为丰富相关研究, 作者以 AZ31 镁合金作

收稿日期: 2012-10-21; 修订日期: 2013-10-11

基金项目: 广东省部产学研结合项目(2009B090300070)

作者简介: 石柏军(1966—), 男, 湖北大冶人, 副教授, 博士。

为压力连接试验对象,对不同温度下镁合金薄板的变形机理及连接效果展开探讨,旨在为镁合金压力连接技术的发展应用提供理论支撑。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验材料为 AZ31 镁合金薄板,尺寸 $175\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,化学成分如表 1 所示,室温下的力学性能如表 2 所示^[1]。

表 1 AZ31 镁合金的化学成分(质量分数)

Tab. 1 Chemical composition of AZ31 Mg alloy (mass) %

Al	Zn	Mn	Ca	Si	Mg
2.5—3.5	0.7—1.3	≥ 0.2	≤ 0.04	≤ 0.30	余

表 2 室温下 AZ31 镁合金的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of AZ31

Mg alloy at room temperature

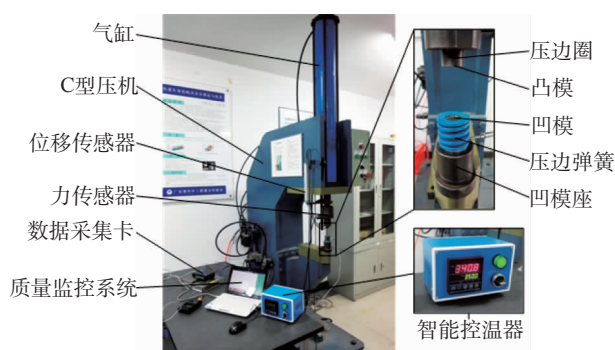
抗拉强度 /MPa	拉伸屈服 强度/MPa	压缩屈服 强度/MPa	伸长率 /%
250~275	155~175	95~105	10~14

AZ31 镁合金压力连接试验设备^[8-10]如图 1(a)所示。压机的动力机构为气液混合缸,其利用压缩空气最大能产生 50 kN 的压力,驱动凸模分三行程运作,达到压力连接的目的。凸/凹模的结构尺寸满足体积算法(即根据材料变形前后体积不变的原理,凸模压入板件部分体积等于凹模容积^[11-13]),主要尺寸如图 1(b)所示。

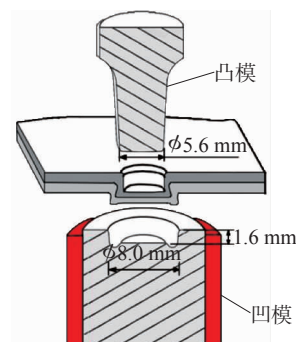
采用凹模加热法进行压力连接试验,即利用紧绕凹模的加热线圈对凹模进行加热,再由凹模把热量传递到板件接头处。凸模尾端与力传感器直接接触,过高的温度会影响力传感器的测量精度,因此仅对凹模进行加热。螺旋加热圈即表面由铜壳覆盖的电阻加热装置,其温度调控由智能控温器来完成。

镁合金薄板与周围常温空气的接触面积较大,冷却速率很快,因此压边圈周围薄板温度与凹模加热目标温度有一定差距,而直接测量接头处的薄板温度则难于实现。对于同样的试验设备和环境,凹模加热的目标温度与薄板接头处实际温差固定,因此接头处的温度可由凹模加热温度值减去温差得出。

AZ31 镁合金的压力连接与钢板、铝合金薄板压力连接的过程不同,为了确保薄板连接时的温度为目标温度,凸模在快进行程末端需要停留约 1 min 才能进入加压行程,压接流程如图 2 所示。



(a) 压力连接设备



(b) 模具尺寸

图 1 压力连接设备及模具尺寸

Fig. 1 Clinching devices (a) and mould dimensions (b)

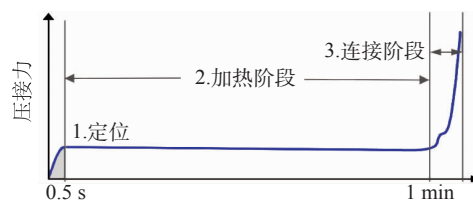


图 2 AZ31 镁合金薄板压力连接流程示意

Fig. 2 Clinching flow charts of AZ31 sheets

试验加热温度为 $150 \sim 375\text{ }^{\circ}\text{C}$,每间隔 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行一组试验,每组试验压三个接头,并编号为接头 A、B、C。其中,接头 A 用于 $1/2$ 剖切截面观测,接头 B、C 分别用于正面及背面的表面观测。此外,在光学显微镜下以 40 倍的放大倍数对 $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两种凹模温度下不同压入行程制备的接头进行了 $1/2$ 截面的观测。

1.2 试验方法

压力接头的失效形式主要有两种:上板颈部断裂和上下板分离^[11]。前者是由于上板颈部厚度小、强度低所致;后者则因薄板间互锁值小,锁止力不足而成^[12]。接头强度试验在三思微机控制电子万能试验机上进行,分为剪切试验、一字剥离试验以及十字剥离试验,以此来评价其连接效果,试样尺寸如图 3 所示。

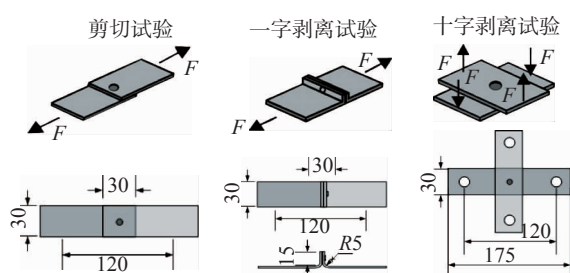


图3 强度试样尺寸

Fig. 3 Size of sample for strength tests

对凹模温度 300 °C 的试样分 D、E、F 三组测试,其中 D 组用于剪切试验, E 组用于一字剥离试验, F 组用于十字剥离试验, 拉伸速率为 $10 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 每组试验做 3 次, 结果取 3 次平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 加热温度对连接质量的影响

AZ31 镁合金的塑性明显受温度影响, 温度越高, 其塑性变形阻力越小。由表 3 可见, 在 150 ~ 250 °C 进行压力连接时, 上薄板颈部厚度很小, 甚至出现裂纹, 接头背面弯折处还出现褶皱。而接头上薄板颈部厚度和上下薄板间的互锁值是决定连接效果的两个指标, 两者要同时取得较大值才能获得较好的接头。这说明在该温度区间进行 AZ31 镁合金的压力连接无法形成质量较好的接头, 失效形式为颈部断裂。在 275 ~ 300 °C 进行压力连接时, 接头形貌良好, 但由于上下薄板在高温下粘着在一起, 难以测量上薄板颈部厚度与上下薄板间的互锁值, 故连接效果需要通过强度试验来进行进一步分析。压力连接温度在 300 °C 以上时, 随着加热温度的进一步升高, 在同样的压力下容易造成下薄板材料溢出在背面形成环形凸台, 甚至穿孔(如表 3 中最后一组)。

由图 4 可以发现, 由于镁合金在 175 °C 时塑性较 300 °C 时的差, 故其压力连接所需的压接力在大部分凸模行程中大于 300 °C 下所需的压接力; 凸模行程在 1.3 ~ 1.7 mm 之间时, 175 °C 下的压接力小于 300 °C 下的, 因为该温度下上薄板颈部出现颈缩并开始断裂; 而 300 °C 时, 随着凸模下压行程增加, 其压接力上升较为平缓。

压力连接温度在 300 °C 以上容易造成下薄板材料溢出在背面形成环形凸台甚至穿孔的原因是, 当温度达到 350 °C 后, AZ31 镁合金变得很软, 凸模行程容易过大, 导致接头底部过薄出现穿孔, 并且其穿孔后出现的底部落料会粘在凸/凹模上, 影响模具表

表3 不同温度下压力接头形貌

Tab. 3 Morphology of clinching joints at different temperatures

凹模温度 /°C	剖面	正面	背面
150	A ₁	B ₁	C ₁
175	A ₂	B ₂	C ₂
200	A ₃	B ₃	C ₃
225	A ₄	B ₄	C ₄
250	A ₅	B ₅	C ₅
275	A ₆	B ₆	C ₆
300	A ₇	B ₇	C ₇
325	A ₈	B ₈	C ₈
350	A ₉	B ₉	C ₉
375	A ₁₀	B ₁₀	C ₁₀

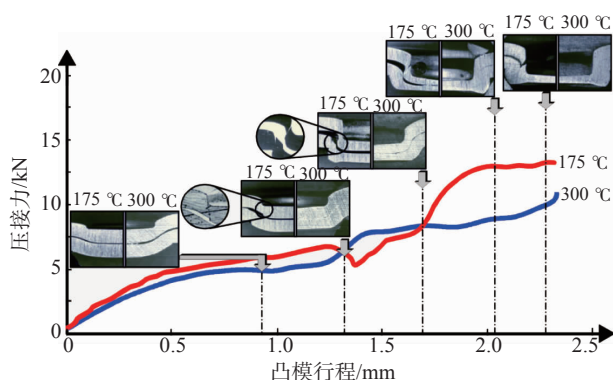


图 4 175 °C 和 300 °C 下 AZ31 镁合金的连接过程对比

Fig. 4 Comparison of AZ31 clinching processes between 175 °C and 300 °C

面性能。可见,在该温度区间所形成的接头虽然不会出现裂痕或者褶皱一类提前失效的情况,但其材料在压力连接过程中流动变形过大,导致其在形貌上差异较大,且上下板间结构变复杂,上薄板颈部厚度与互锁值不可控制。由于凸/凹模具结构尺寸满足体积算法,从表面看理想的压力连接效果应当是薄板材料基本填满凹模,而且接头底厚应为板厚的 0.2~0.4 倍,同时上下薄板均无材料溢出^[11-13]。因此,若要在该温度区间形成高质量的接头,则需要准确控制凸模下压行程的位移以及力度。

以上结果表明:适合 AZ31 镁合金压力连接的温度为 250~350 °C,最适宜温度在 300 °C 左右。压力连接过程监控系统对最大压接力的监控显示,随着温度的升高,最大压接力逐渐变小,其变化关系如图 5 中曲线所示。

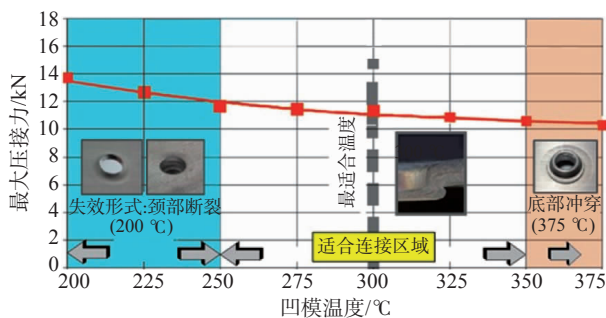


图 5 适合于 AZ31 镁合金压力连接的温度区域

Fig. 5 The suitable temperature zone of AZ31 clinching

2.2 连接接头的强度

从图 6 可见,接头其抗剪切强度最大,测得最大切向作用力达到了 1 600 N,切向位移很小,接头的破坏形式为上薄板颈部产生扭曲并断裂,接头十字剥离最大拉力为 600 N,拉伸位移较大,接头破坏形式为颈部被垂直拉断。而一字剥离试验的抗拉力为

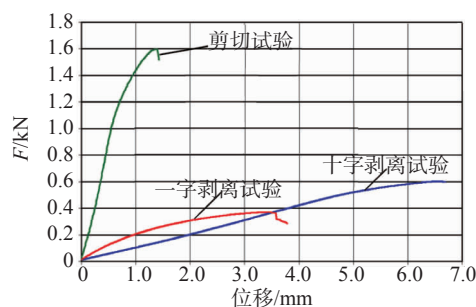


图 6 300 °C 下 AZ31 镁合金连接接头的强度试验位移-力曲线

Fig. 6 Displace vs force curves of AZ31 Mg alloy clinching joints at 300 °C

380 N,说明剥离过程中接头四周受力均匀,更好地发挥了压力连接技术使薄板间自内嵌的互锁效果。

3 结 论

(1) 适合 AZ31 镁合金压力连接的温度区间是 250~350 °C,以 300 °C 左右为最佳,温度过低容易导致接头颈部出现裂痕甚至断裂,温度过高时 AZ31 镁合金变软使得凸模下压行程过大,导致接头处材料的流动变形过大,底部过薄甚至穿孔。

(2) 在 300 °C 条件下压接 AZ31 镁合金,其接头十字剥离最大承载力为 600 N,而剪切所能承载的作用力达到了 1 600 N,连接强度较高。

参考文献:

- [1] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] SABERI S, ENZINGER N, VALLANT R, *et al.* Influence of plastic anisotropy on the mechanical behavior of clinched joint of different coated thin steel sheets[J]. International Journal of Material Forming, 2008, 1(1): 273-276.
- [3] AVEDESIAN M M, BAKER H. Magnesium And Magnesium Alloys[M]. United States: ASM International, 1999: 314.
- [4] WAGENER H W, LEHNERT F. Deep drawing of magnesium sheet metal at room temperature [J]. Manufacturing Processes Sheet Metal Processing, 2004(14): 616-620.
- [5] DOEGE E, DRÖDER K. Sheet metal forming of magnesium wrought alloys-formability and process technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 115(1): 14-19.
- [6] 张凯锋, 尹德良, 吴德忠, 等. AZ31 镁合金板的热拉深性能[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(6): 1506-1509.
- [7] TAKUDA H, MORISHITA T, KINOSHITA T, *et al.* Modelling of formula for flow stress of a magnesium alloy AZ31 sheet at elevated temperatures[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164/165: 1258-1262.
- [8] 童伟, 石柏军, 庄文辉. 新型汽车钣金件压力连接方法及设备[J]. 机床与液压, 2008, 36(7): 93-95.

(下转第 34 页)

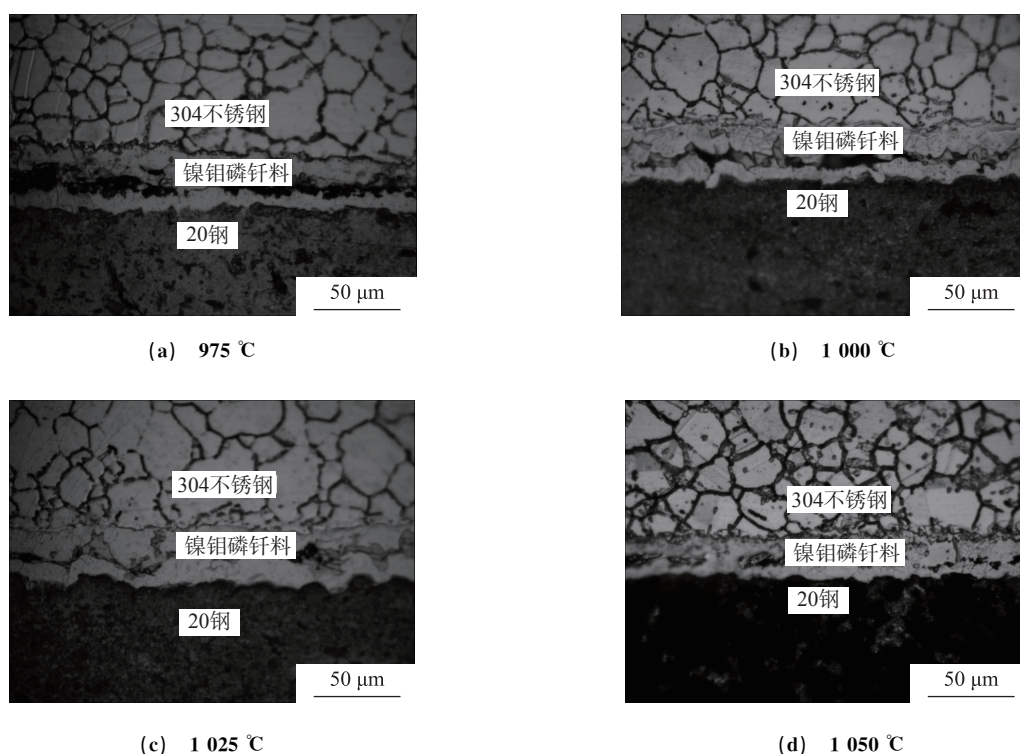


图5 不同焊接温度下钎焊接头的显微组织

Fig. 5 Microstructure of the brazed joints at different brazing temperatures

参考文献:

- [1] 张启运,庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京:机械工业出版社,2008, 217-218.
- [2] 俞伟元,陈学定,路文江,等. 瞬间液相焊非晶铜基钎料的制备及其性能研究[J]. 电焊机,2008,38(7):9-11.
- [3] INOUE A, KOSHIBA H, ZHANG T, *et al.* Thermal and magnetic properties of $\text{Fe}_{50}\text{Co}_7\text{Ni}_7\text{Zr}_{10-x}\text{Nb}_x\text{B}_{20}$ amorphous alloys with wide supercooled liquid range[J]. Mater Trans J M, 1997,38:577-582.
- [4] 马立群,王立民,张涛,等. Zr, Nb 对 Fe-B 合金非晶形成能力的影响[J]. 金属学报,1999,35(6):631-633.
- [5] 丁毅,王小霞,周栋,等. 高频感应加热钎焊工艺制备碳钢/不锈钢复合板接头的显微组织[J]. 机械工程材料,2011,35(9):68-71.
- [6] TAKEUCHI A, INOUE A. Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element[J]. Materials Transactions, 2005, 12:2817-2829.
- [7] 邹家生,许志荣,蒋志国,等. Ti-Zr-Ni-Cu 非晶钎料[J]. 焊接学报,2005,26(10):51-53.
- [8] 李维火. 多元非晶形成及力学性能研究[D]. 上海:上海大学, 2002.
- [9] INOUE A, GOOK J S. Multicomponent Fe-based glassy alloys with wide supercooled liquid region before crystallization[J]. Mater Trans J M, 1995,36:1180-1183.
- [10] INOUE A, ZHANG T, ITOI T, *et al.* New Fe-Co-Ni-B amorphous alloys with wide supercooled liquid region and good softmagnetic properties[J]. Mater Trans J M, 1997, 38:359-362.
- [11] 陈忠宝. Ni-P 钎料真空钎焊不锈钢接头性能及扩散行为的研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2007.
- [12] 余伟元,陈学定,路文江,等. 快速凝固钎焊薄带[J]. 焊接技术,2006,35(3):2-4.
- [9] 石柏军,何灿荣,何涛. 基于机械变形的钣金件连接过程实时监控方法的研究与应用[J]. 机床与液压,2009,37(5):35-37.
- [10] 石柏军,田恒宇,刘松林. 基于窗口技术的压接质量在线监控方法的研究[J]. 机床与液压,2010(9):151-154.
- [11] VARIS J P, LEPISTÖ J. A simple testing-based procedure and simulation of the clinching process using finite element analysis for establishing clinching parameters [J]. Thin-Walled Structures,2003,41(8):691-709.
- [12] 石柏军,刘松林,田恒宇. 压力连接模具参数的设计方法[J]. 汽车技术,2010(6):52-55.
- [13] MUCHA J. The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint[J]. Materials and Design,2011,32(10):4943-4954.

(上接第 30 页)