

DOI:10.13979/j.1007-7235.2018.12.005

AZ31B/6061 爆炸焊复合板平面应变压缩及轧制变形行为

陈志青¹, 唐巍¹, 曹晓卿^{1,2}, 杨文武¹, 王东亚¹

(1. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024;

2. 先进镁基材料山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要:采用爆炸+轧制工艺可以制备出较薄且表面质量较高的AZ31B/6061复合板,但AZ31B/6061爆炸焊复合板的轧制较难成功。本试验以平面应变热压缩对复合板的热轧进行物理模拟,通过轧前预热、AZ31B镁合金和6061铝合金的热压缩、复合板的平面应变压缩试验研究,选择出了合适的参数,成功地对复合板进行了轧制。结果表明,400℃5 min条件下压缩后的复合板在各压缩率下整体上包覆和“鼓肚”程度均比较小;AZ31B/6061爆炸焊复合板在400℃热轧温度下可以轧制成功,但不同压下率下轧制的复合板出现了不同程度的翘曲,且翘曲程度随着压下率的增加先减小后增大,30%压下率的复合板翘曲程度最小,平直度较高,无边裂,轧件质量良好。这种探究轧制参数的方法对于其他异种材料复合板也具有一定的参考价值。

关键词:AZ31B/6061 爆炸焊复合板;热处理;平面应变压缩;轧制

中图分类号: TG339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7235(2018)12-0021-06

Plane strain compression and rolling deformation behavior of explosive-welded AZ31B/6061 composite plates

CHEN Zhi-qing¹, TANG Wei¹, CAO Xiao-qing^{1,2}, YANG Wen-wu¹, WANG Dong-ya¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Advanced Magnesium-based Materials, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The thin AZ31B/6061 composite plates with high surface quality can be prepared by explosive welding and subsequent rolling process, but the rolling of explosive-welded AZ31B/6061 composite plates is difficult to achieve. The physical simulation of hot rolling of the composite plates is performed by the planar strain thermocompression. The suitable parameters were successfully selected for the rolling of composite plates through the experimental study of the preheating before rolling, the hot compression of AZ31B magnesium alloy and 6061 aluminum alloy and the plane strain compression of composite plates. The results indicate that the composite plates after compression at 400℃ for 5 min have a smaller coating and bulging degree on the whole under various reduction rates. The explosive-welded AZ31B/6061 composite plates can be successfully rolled at 400℃, but the warpage of different degrees appears after rolling at different reduction rates, and the warping degree decreases first and then increases with the increase of reduction rate. The relatively flat composite

收稿日期:2018-05-20

基金项目:国家自然科学基金(51375328);山西省归国留学人员科研项目(No.2015-036)。

第一作者简介:陈志青(1994-),男,河北保定人,硕士研究生。

plates with the least warping degree and no edge cracking are obtained at the 30% reduction rate. This method of exploring rolling parameters also has certain guiding significance for the other dissimilar-material composite plates.

Key words: explosive-welded AZ31B/6061 composite plates; heat treatment; plane strain compression; rolling

近年来,由于镁/铝叠层复合板兼具镁合金轻质高强,又具有铝合金良好的抗腐蚀性特点,镁/铝复合板的制备广受关注。爆炸焊工艺制备镁/铝复合板具有结合强度高、扩散层薄、无气孔等缺陷的优点,但它难以制备较薄且表面质量较高的的复合板^[1]。轧制复合工艺却可以弥补此缺陷^[2]。采用爆炸+轧制的组合工艺可以综合两种工艺的优点,制备出较高质量的复合板^[3]。但目前关于复合板的制备大多采用单一工艺,采用爆炸+轧制的工艺制备镁/铝复合板的较少。此外,关于爆炸焊镁/铝复合板的研究大多集中于热处理及其力学性能的研究^[4-6],关于其热变形鲜有报道,其轧制变形更是少见。究其原因是在镁/铝复合板在轧制时两种材料的流动能力不同,协调变形性较差,容易出现开裂分层,导致轧制失败。本试验首先对复合板进行了热处理,以期改善镁侧组织,提高镁合金塑性,提高复合板的协调变形能力。然后在 Gleeble 热模拟试验机中通过热压缩试验获得 AZ31B 镁合金、6061 铝合金在不同温度下的真应力-应变曲线,以此反映两种材料的流动能力,为后续复合板的平面应变压缩变形及轧制变形提供指导。然后在不同温度下进行不同压缩率的平面应变热压缩试验,以此对复合板的轧制进行物理模拟。最后根据复合板的平面应变压缩变形情况,选择参数进行试轧,以期减少试轧次数,节省材料,保证试轧成功,为后续镁/铝复合板的轧制变形研究提供基础。

1 试验方法

试验材料为 12 mm 厚的 AZ31B/6061 双层爆炸焊复合板,其中 AZ31B 镁合金厚度为 10 mm,6061 铝合金厚度为 2 mm。爆炸焊复合板是以镁合金板为基板,以铝合金板为覆板,采用平行安置方法爆炸制备的。

由于爆炸焊复合板中不同位置界面结合情况稍有不同,为保证试验的可重复性以及减少试验结果的偶然性,从复合板中心相近位置切取若干 10 mm × 10 mm × 12 mm 小样进行平面应变压缩试验,切取

30 mm × 70 mm × 12 mm 试样进行轧制。取小样在热处理炉中进行热处理,加热温度分别为 300℃、350℃、400℃、450℃,保温时间均为 5 min,对各热处理条件下的复合板进行金相显微组织及界面形貌观察。

在 Gleeble 热模拟试验机中进行热压缩试验,获得 AZ31B 镁合金和 6061 铝合金在 300℃、325℃、350℃、375℃、400℃ 下压缩的真应力-应变曲线,应变速率为 1 s⁻¹。平面应变热压缩试验在 DNS200 万能试验机(配有高温电阻炉)上进行,在试样上下两端均匀涂抹石墨以减小压头与试样的摩擦,减小摩擦对压缩变形的影响。小样在压缩前进行预热,预热温度分别为 300℃、350℃、400℃、450℃,保温时间均为 5 min。在每一温度下分别进行压缩率为 20%、30%、40%、50% 的压缩试验,研究复合板的热压缩变形情况。

根据不同热压缩参数下复合板的平面应变热压缩变形情况选择较为合适的热轧参数进行轧制。

2 结果与分析

2.1 爆炸焊复合板的热处理

对于 AZ31B/6061 复合板而言,由于镁合金低温塑性很差,而铝合金塑性较好,在变形过程中两种材料的界面处必然会产生较大的应力,如果应力过大会造成复合板撕裂甚至分层,需探究出一个合适的热变形温度来改善镁合金的内部晶粒组织,提高镁合金的塑性变形能力,使复合板组元镁板和铝板具有较好的协调变形能力,保证复合板轧制成功。另一方面,恰当的热处理工艺可以在一定程度上消除爆炸焊接工艺中出现的残余应力和加工硬化现象,同时促进复合板界面的扩散,增强冶金结合,避免过多脆而硬的金属间化合物的形成和生长,提高界面结合强度,避免后续热变形过程中复合板界面处的开裂。

图 1 是不同温度热处理 5 min 后 AZ31B/6061 复合板界面形貌图。由图 1 可见,随着热处理温度的升高,界面扩散层的厚度随之增加。这是因为低温时镁和铝的互扩散系数较小,界面处镁和铝的扩

散量就小,扩散层的厚度就小;高温时它们的互扩散系数较大,相同时间内,镁和铝的扩散量很大,致使扩散层明显增厚。过厚的扩散层会严重恶化界面的结合性能,对后续热变形产生极大不利影响。由此

可见,热变形温度的选择尤为重要。此外,还可以观察到界面扩散层分为两层,靠近镁合金侧的为 $Mg_{17}Al_{12}$,靠近铝合金侧的为 Al_3Mg_2 。

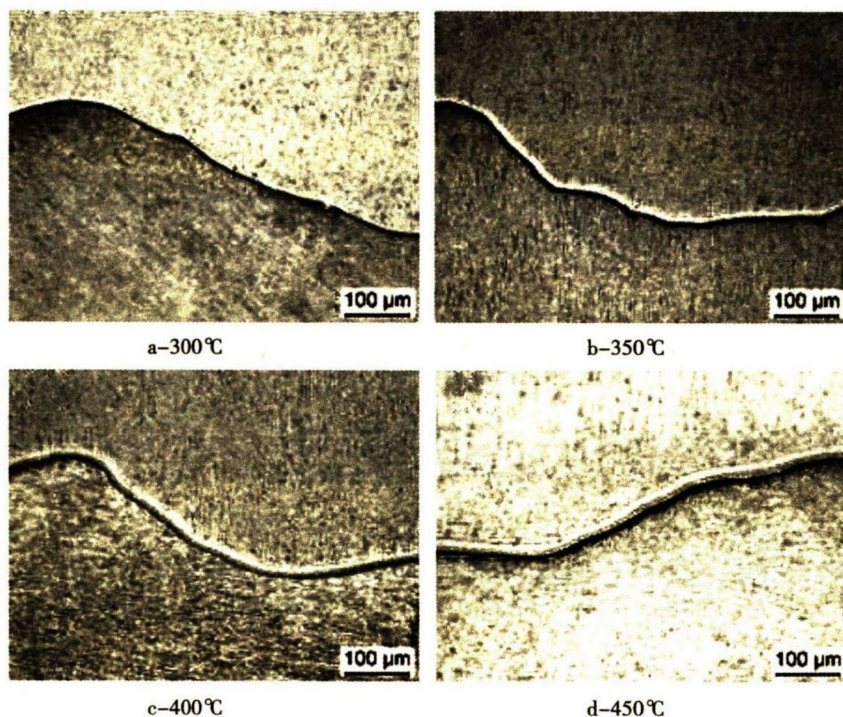


图1 不同温度热处理 5 min 后复合板界面形貌

Fig. 1 The interface morphologies of composite plates after heat treatment at different temperatures for 5 min

图2 是不同温度热处理 5 min 后复合板界面附近镁侧的显微组织。如图2所示,复合板在经过 300°C 5 min 的热处理后,原始板镁合金中的绝热剪切带、孪晶均消失^[6],镁合金发生了再结晶,但结晶程度不完全,晶粒大小不均匀。随着热处理温度的升高,镁合金再结晶程度增加,小晶粒尺寸占比增大,晶粒尺寸趋于均匀化。但温度为 450°C 时,晶粒异常粗大,出现二次长大现象。过于粗大的晶粒必然会影响镁合金的塑性,进而影响镁/铝复合板的协调变形。同时 450°C 热处理后的复合板扩散层过厚,在后续轧制变形过程中易产生裂纹,致使轧制失败。在后续压缩变形及轧制变形过程中,应严格控制预热温度,避开过高温度,如 450°C。

2.2 组元及其复合板的压缩试验

AZ31B/6061 复合板的变形主要受制于镁合金,镁合金室温塑性差,但在高于 225°C 进行热变形时,棱柱面和锥面等非基面滑移系通过热激活而启动,其塑性会显著提高^[7]。温度是影响镁合金塑性变形能力的关键因素,为了反映两种材料的流动能力,通

过热压缩试验获得了 AZ31B 镁合金和 6061 铝合金的真应力-应变曲线,如图3所示。

由图3可见,变形温度对其流变应力行为有显著影响。当应变相同时,变形温度越高,所对应的流变应力越低。在微小应变阶段,应力上升很快,说明该阶段以加工硬化为主,合金中只发生了部分动态回复或动态再结晶,其硬化作用远远超过软化作用。当应变继续增大,镁合金内部位错密度持续增加,动态回复和动态再结晶的程度也增加,材料软化效果提升,急剧增加的加工硬化现象部分与动态回复的软化作用相抵消,且抵消部分逐渐增大,因此应力-应变曲线斜率逐渐减小,应力随应变增加速率降低。当动态再结晶的软化程度和材料的加工硬化程度完全相抵消时,镁合金应力达到峰值。随后,动态再结晶的软化效果逐渐占据优势,其软化效果大于加工硬化的强化效果,应力随应变的增加而降低^[8]。铝合金的压缩应力-应变曲线与镁合金有类似的特点。与镁合金不同的是,铝合金加工硬化效果显著,铝合金迅速达到应力峰值,当铝合金应力达到峰值后,动态再结晶的

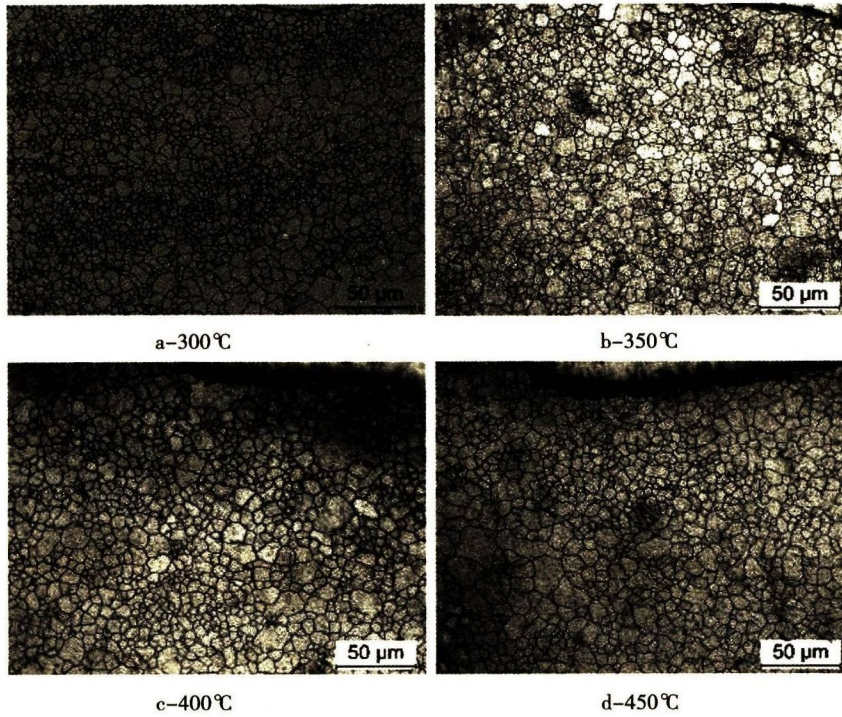


图2 不同温度热处理 5 min 后复合板镁侧显微组织

Fig.2 Microstructures of magnesium side of composite plates after heat treatment at different temperatures for 5 min

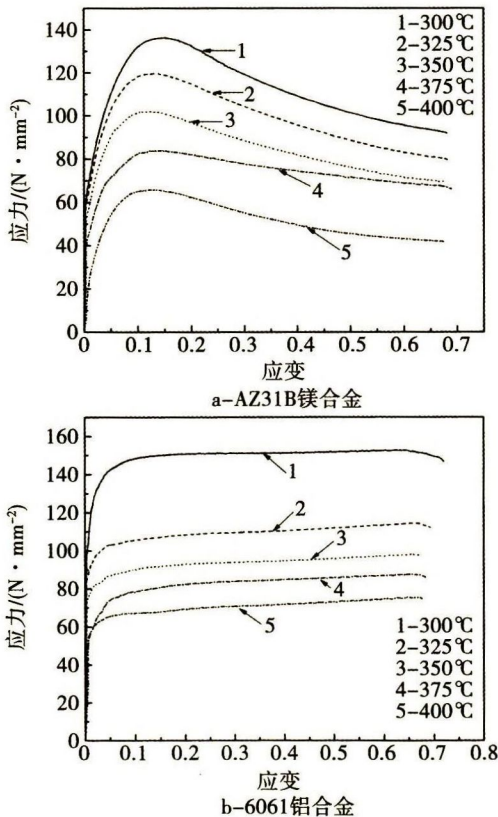


图3 不同温度下 AZ31B 镁合金和 6061 铝合金的压缩应力-应变曲线

Fig.3 Compressive stress-strain curves of AZ31B magnesium alloy and 6061 aluminum alloy at different temperatures

软化效果与热变形的加工硬化效果相当,应力值随应变的增加基本保持不变,出现稳态流变特征^[9]。

对于镁/铝爆炸焊复合板,其压缩变形更为复杂,其应力状态也更为复杂。基板镁合金与覆层铝合金变形抗力存在着很大差异,热压缩时双金属复合板的协调变形问题显得尤为重要。研究镁/铝复合板在压缩条件下的变形行为,可以为选择合适的镁/铝复合板热轧工艺参数提供指导。

如图 4a 所示,不同条件下平面应变压缩后的 AZ31B/6061 复合板发生了不同程度的基层镁合金包覆覆层铝合金的现象,且这种包覆程度随着压缩率的增加而增加。这是因为在较大应变情况下,镁合金的流动能力随着应变的增加而增加,而铝合金的流动能力基本保持不变,且铝合金的流动能力小于镁合金的,致使较厚的镁合金包覆铝合金。包覆现象出现的原因也与复合板上下表面受平面应变压缩模具的摩擦力有关。随着应变的增加,镁合金流动能力愈强,镁合金与铝合金流动能力差值持续增大,致使镁合金包覆铝合金的程度越大。明显可以看出,400℃压缩后的复合板整体包覆程度比较小。这是因为在 400℃变形,镁合金与铝合金流动能力相差不大,协调变形性较好。

除包覆现象之外,如图 4b 所示,压缩后的复合板试样也发生了不同程度的“鼓肚”,这是因为复合

板试样上下表面与平面应变压缩模具有接触,且在正向压力作用下,接触面上有较大的摩擦力阻碍材料流动变形,虽然试样表面均涂抹了石墨以减小摩擦因素,减小摩擦力,但很难消除摩擦力对复合板压缩变形的影响。复合板中部材料流动较快,上下两侧流动较慢,造成了这种“鼓肚”现象。随着热压缩温度的升高,这种“鼓肚”现象的程度越来越小。这是因为,随着温度的升高,材料的流动能力增强,接触摩擦对材料流动的影响减小,“鼓肚”程度也越来越小。与其他温度相比,400℃下压缩的复合板“鼓肚”程度最小。

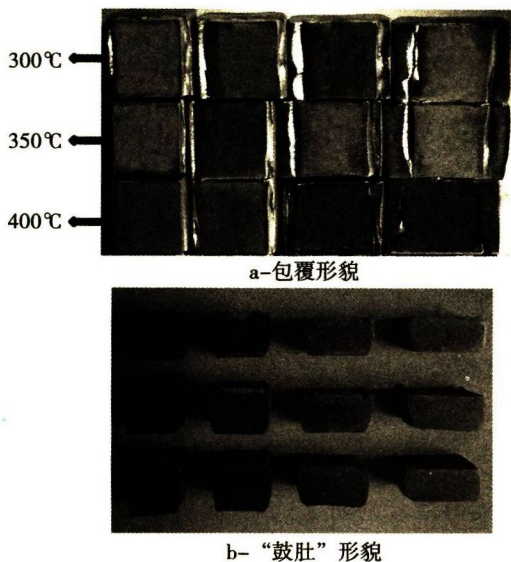


图4 不同条件平面应变压缩后的 AZ31B/6061 复合板的包覆和“鼓肚”的宏观形貌

Fig. 4 Macroscopic morphologies of coating and bulging of AZ31B/6061 composite plates after plane strain compression under different conditions

综上所述,在 400℃ 下进行热变形, AZ31B/6061 爆炸焊复合板具有较好的协调变形能力,压缩后复合板质量较好。

2.3 爆炸焊复合板的轧制

基于上述热压缩变形结果,选择在 400℃ 下对 AZ31B/6061 爆炸焊复合板进行热轧,压下率分别为 20%、30%、40%、50%,轧制结果如图 5 所示。AZ31B/6061 复合板轧后出现了不同程度的翘曲,且翘曲程度随着压下率的增加先减小后增加,30% 压下率下复合板翘曲程度最小,平直度较高。此外,40% 压下率下复合板出现了轻微边裂,50% 压下率下复合板边裂严重,其他压下率下复合板无边裂现象的发生。

复合板轧后翘曲是由轧制过程中的不对称变形条件引起的,这种不对称变形与铝镁两种不同材料的变形抗力不同有关。如图 3 所示,400℃ 时 AZ31B 镁合金的变形抗力低于 6061 铝合金的,下层镁合金的流动能力高于上层铝合金的,致使这种向上翘曲现象的发生。同时由于两种材料的散热系数不同,镁合金散热较快,导致复合板上下表面产生温度差,也会对翘曲产生影响。边裂的产生是由于镁合金在空气中降温较快,复合板边部与空气发生对流换热较多,相较于中部降温较快,导致复合板中部与边部产生温度差。此外,随着压下率的增大,复合板内部塑性变形热增加,致使复合板中部与边部温度差增大,使边裂加剧^[10]。

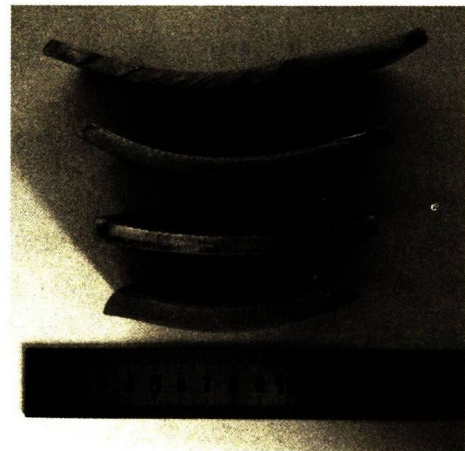


图5 轧后的 AZ31B/6061 复合板宏观形貌
Fig. 5 Macroscopic morphology of the post-rolled AZ31B/6061 composite plates

3 结 论

通过 AZ31B/6061 爆炸焊复合板的平面应变热压缩试验,对该复合板的热轧进行物理模拟,探究变形温度、变形程度对 AZ31B/6061 复合板热变形的影响,成功进行了 AZ31B/6061 爆炸焊复合板的轧制,得出如下结论:

1) AZ31B/6061 爆炸焊复合板扩散层厚度随热处理温度的升高而增加,热处理后扩散层均出现分层,分别为 Al_3Mg_2 和 $Mg_{17}Al_{12}$ 。热处理后镁侧发生了再结晶,随着温度的升高,再结晶程度增大。400℃ 5 min 热处理后镁侧整体上晶粒较细小、均匀。

2) 平面应变压缩后的复合板发生了不同程度的包覆和“鼓肚”现象,且包覆程度随压缩率的增加而增加,“鼓肚”程度随温度的升高而减小。400℃ 压缩下的复合板整体包覆程度和“鼓肚”程度均比较小。

3)400℃不同压下率下轧制的复合板出现了不同程度的翘曲,且翘曲程度随着压下率的增加先减小后增加,30%压下率下复合板翘曲程度最小,平直度较高,无边裂,轧件质量良好。

参考文献:

- [1] FINDIK F. Recent developments in explosive welding[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(3):1081-1093.
- [2] ABBASI M, TOROGHINEJAD M R. Effects of processing parameters on the bond strength of Cu/Cu roll-bonded strips[J]. *Journal of Materials Processing Tech*, 2010, 210(3):560-563.
- [3] CHEN Z, WANG D, CAO X, et al. Influence of multi-pass rolling and subsequent annealing on the interface microstructure and mechanical properties of the explosive welding Mg/Al composite plates[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2018, 723:97-108.
- [4] ZHANG N, WANG W, CAO X, et al. The effect of annealing on the interface microstructure and mechanical characteristics of AZ31B/AA6061 composite plates fabricated by explosive welding[J]. *Materials & Design*, 2015, 65:1100-1109.
- [5] 颜银标,王进华,申小平,等. 铝合金/镁合金爆炸复合界面低温退火后的结构演化[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(4):674-680.
- [6] 颜银标,申小平,王进华,等. 加热对AZ31B/7075爆炸复合板界面的影响[J]. *南京理工大学学报*, 2010, 34(5):702-707.
- [7] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- [8] 郭强,严红革,陈振华,等. AZ31镁合金高温热压缩变形特性[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(6):900-906.
- [9] 赵培峰,任广升,徐春国,等. 6061铝合金材料常数的研究[J]. *塑性工程学报*, 2006, 13(4):79-81.
- [10] 马立峰,庞志宁,黄庆学,等. AZ31B镁合金板材轧制边裂与温度场研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014(s1):387-392.

肯联铝业公司墨西哥汽车零部件厂投产

肯联铝业公司(Constellium)新建的全路易斯波托西(San Luis Potosi)汽车铝零部件厂已于2018年3月投产,工厂的主导产品为防撞系统与结构件。工厂建筑面积5 000 m²,采用当今先进的成形、切削、焊接、热处理工艺制造所有的工件,因而零件尺寸达到高精级,能满足汽车工业最严格的标准要求。这个厂有员工约100人,还将扩大厂房面积到13 000 m²,扩大生产,以满足汽车工业对铝合金零部件日益增长的需求。2020年墨西哥组装的汽车可达500万辆。

(王祝堂)