

一体化压铸车身结构件的自冲铆接技术开发及应用

刘付曙 黄祥 万里 林韵 安肇勇 钟宇毅

(广东鸿图科技股份有限公司, 肇庆 526108)

摘要 在新能源汽车生产中,自冲铆接(SPR)连接方式在一体化车身压铸件与其他构件的连接中得到广泛应用,在SPR连接压铸件时有时会出现裂纹和互锁值问题,一定程度上削弱车身强度。针对一体化高强度压铸铝合金进行SPR铆接研究,寻找对铆接质量有影响的主要因素并总结规律。结果发现,铆接裂纹和互锁值与材料的伸长率、底模型腔深度、铆钉长度相关。在同样的铆接条件下,在深度浅的底模不容易出现裂纹,同样深度下,铆钉短的不容易出现裂纹。铆钉长的和底模型腔深的铆接中互锁值较大。

关键词 铝合金;自冲铆接;底模;裂纹;互锁值

中图分类号 TG249.2 **文献标志码** A **DOI**:10.15980/j.tzzz.T20240369

Development and Application of SPR in Integrated Body Die-casting Parts

LIU Fushu, HUANG Xiang, WAN Li, LIN Yun, AN Zhaoyong, ZHONG Yuyi

(Guangdong Hongtu Technology Co., Ltd., Zhaoqing 526108)

Abstract: In the production of new energy vehicles, self-punching riveting (SPR) connection mode is widely used in the connection of integrated body die-casting parts with other components. Cracks and interlock values commonly occur during SPR connection, weakening the body strength to a certain extent. SPR riveting of integrated high strength die casting aluminum alloy was investigated, and the main factors influencing the riveting quality were explored and the rules were summerized. The results indicate that the rivet crack and interlock value are related to the elongation, depth of bottom mold cavity and length of rivet. Under constant riveting condition, crack is hardly observed in the shallow bottom mold, which is the same in the shrot rivet under given depth. Interlock value in riveting with long rivets and deep bottom mold cavity is greater.

Key Words: Aluminium Alloy, SPR, Bottom Die, Crack, Interlock Value

随着汽车工业的发展,大型结构件向一体化压铸转变,乘用车制造中逐渐引入免热处理高强韧铝合金^[1]。目前,一体化压铸技术应用集中在乘用车白车身的下车体,其中后底板已经在多款车型上实现量产。

大尺寸电池壳体和非承载式车身车架正处于开发阶段。未来,一体化压铸技术有望进一步提升生产效率、降低成本并实现更高的集成度,推动汽车工业的持续发展^[2]。

收稿日期:2024-09-12;修订日期:2024-10-31

第一作者简介:刘付曙,男,1967年出生,工程师,E-mail:liufushu@ght-china.com

引用格式:刘付曙,黄祥,万里,等.一体化压铸车身结构件的自冲铆接技术开发及应用[J].特种铸造及有色合金,2025,45(6):954-957.

LIU F S, HUANG X, WAN L, et al. Development and application of SPR in integrated body die-casting parts[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(6): 954-957.

- [20] GLADYSHEVSKII R E, CENZUAL K, FLACK H D, et al. Structure of RNi_3Al_9 ($R=Y, Gd, Dy, Er$) with either ordered or partly disordered arrangement of Al-atom triangles and rare-earth-metal atoms[J]. Acta Crystallographica Section, 1993, B49(3): 468-474.
- [21] LIU B, YUAN X G, HUANG H J, et al. The effect of alloying elements on the microstructure of Al-5Fe alloys[J]. JOM, 2012, 64: 316-322.
- [22] RIBEIRO T M, CATELLAN E, GARCIA A, et al. The effects of Cr addition on microstructure, hardness and tensile properties of as-cast Al-3.8 wt.% Cu- (Cr) alloys [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 6 620-6 631.
- [23] 李荣德,赵素彦,周振平. Cr和Mg对Al-5Fe合金中初生 Al_3Fe 相形貌的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30(3): 284-287.
- [24] CREPEAU P. Effect of iron in Al-Si casting alloys: A critical

review[J]. AFS Trans., 1995, 103: 361.

- [25] LIN B, ZHANG W X, ZHENG X P, et al. Developing high performance mechanical properties at elevated temperature in squeeze cast Al-Cu-Mn-Fe-Ni alloys [J]. Materials Characterization, 2019, 150: 128-137.
- [26] FANG J, DONG X X, JI S X. Effect of Mn on microstructure and mechanical properties of Al-4Ni Alloy[J]. JOM, 2021, 73: 3 819-3 826.
- [27] SHI Z M, WANG Q, ZHAO G, et al. Effects of erbium modification on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2015, A626: 102-107.

(编辑:栗万仲)

自冲铆接(SPR)是一种先进的冷连接技术,主要用于连接两种或两种以上的金属板材^[3],其工序周期短、效率高,可以自动化生产^[4]。该技术可以连接多种不同材质以及难以铆接的板材,包括同种金属板材、异种金属板材甚至是异种材料板材。自冲铆接技术已经广泛应用于汽车、航空航天、船舶等行业的板材连接中^[5-6]。

目前SPR铆接过程中面临的主要问题是铆扣裂纹。国内外的研究聚焦于提高铝合金的伸长率,但是由于材料本身的限制和压铸特性的影响,伸长率的提高程度有限。本研究针对铆接参数、铆钉规格、铆接底模的形状来解决铆扣裂纹问题。

1 自冲铆接的工作原理

自冲铆接过程中,特制铆钉在动力(如液压缸或伺服电动机)的作用下,穿透顶层板材,并在铆模的作用下,铆钉尾部的中空结构扩张刺入底层板材,但并不刺穿底层板材,从而形成牢固的机械内锁结构^[7]。自冲铆接的流程见图1^[8]。自冲铆接过程质量指标包括钉头高度、残余底厚、钉脚互锁值,见图2^[9-10]和表1、表2。钉脚互锁值是铆钉脚切入最底层板材的横向距离,互锁值大的铆接质量较好。

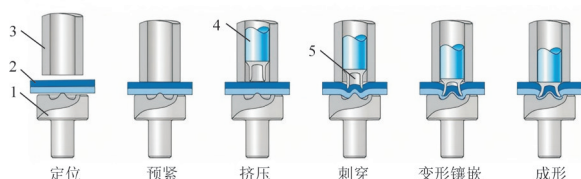


图1 SPR铆接工艺流程

Fig.1 Process flow chart of SPR riveting

1.底模 2.待铆接板材 3.预压紧装置 4.上模 5.铆钉

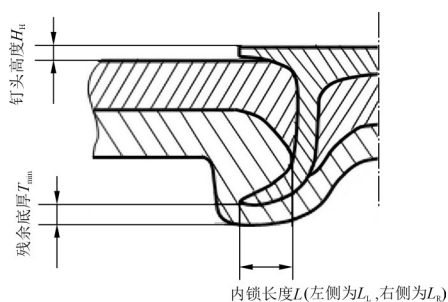


图2 自冲铆接质量指标

Fig.2 Quality index of SPR

SPR质量要求指标:没有铸件开裂(止口边开裂,铆扣开裂)^[11]。铸件的伸长率低或者底模深度太深时,在进行SPR铆接时会出现铆扣裂纹(见图3),此类裂纹对铸件的防腐和铆接的结构强度有负面影响,在生产中需要消除。

表1 互锁值质量指标

特性	要求
钉头高度 H_H	$-0.5 \sim +0.3 \text{ mm}$
$\phi 5 \text{ mm}$ 铆钉互锁值 (底板 $> 1.5 \text{ mm}$ 厚铝合金, 搭接不包含 7XXX 系列铝合金和钢材)	$(L_L + L_R) / 2 \geq 0.4 \text{ mm}$ $L_L \geq 0.2 \text{ mm}$ $L_R \geq 0.2 \text{ mm}$
$\phi 5 \text{ mm}$ 铆钉互锁值 (底板为 $\leq 1.5 \text{ mm}$ 铝合金, 搭接含钢、7XXX 系列铝合金)	$(L_L + L_R) / 2 \geq 0.2 \text{ mm}$ $L_L \geq 0.1 \text{ mm}$ $L_R \geq 0.1 \text{ mm}$
$\phi 3 \text{ mm}$ 铆钉互锁值	$(L_L + L_R) / 2 \geq 0.2 \text{ mm}$ $L_L \geq 0.1 \text{ mm}$ $L_R \geq 0.1 \text{ mm}$

表2 剩余材料最小厚度质量指标

特性	要求
$\phi 5 \text{ mm}$ 铆钉 (底板 $> 1.5 \text{ mm}$ 厚铝合金, 搭接不包含 7XXX 系列铝合金和钢材)	$T_{min} \geq 0.2 \text{ mm}$
$\phi 5 \text{ mm}$ 铆钉(底板为 $\leq 1.5 \text{ mm}$ 铝合金, 搭接含钢、7XXX 系列铝合金)	$T_{min} \geq 0.1 \text{ mm}$



图3 自冲铆接铆点底部裂纹形貌

Fig.3 Bottom crack morphology of SPR riveting point

2 试验结果与分析

自冲铆接试验采用 Epress 电动伺服铆接系统,配置包括 C 形框架、电动伺服控制和执行机构和铆接互锁值测量用的二次元工具显微镜。

2.1 底模深度对免热处理材料铆接质量的影响

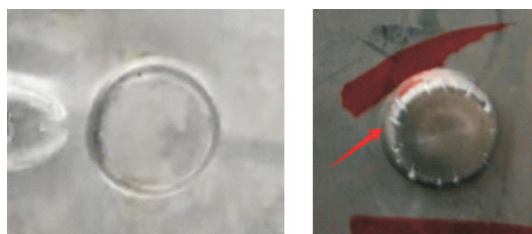
底模深度对铆钉的变形有较大的约束作用,影响材料本体的变形^[12-13]。采用同一种免热处理材料和不同型腔深度的底模对同一种铆钉(C5.5 $\times$ 5.5H5)进行试验,见图4~图6。试验说明底模型腔较深的容易产生



(a) G100110底模型腔深度1.1 mm (b) G115130底模型腔深度1.3 mm

图4 试验用不同深度的SPR底模

Fig.4 SPR bottom molds for experiment with different depths



(a) G100110底模铆接效果 (b) G115130底模铆接效果

图5 不同深度底模的铆接效果

Fig.5 Riveting effect of bottom molds with different depths


 (a) G100110铆接互锁值 $L_L=0.51\text{ mm}$, $L_R=0.53\text{ mm}$, $T_{\min}=1.01\text{ mm}$ (b) G115130铆接互锁值 $L_L=0.48\text{ mm}$, $L_R=0.38\text{ mm}$, $T_{\min}=0.43\text{ mm}$

图6 不同深度底模铆接互锁值

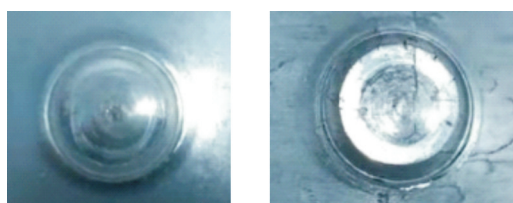
Fig.6 Riveting interlock values of bottom mold with different depths

生裂纹。

G100110底模的型腔深度较浅,在铝合金铸件变形量较小的情况下也能得到较好的铆接效果,可以获得较大的互锁值,底模较深的铆接点的铆接深度较大而互锁值相对较小。因此,较浅的SPR底模对铝合金的伸长率要求有所降低,免热处理材料可以考虑采用型腔深度较浅的底模设计。

2.2 铆钉长度对铆接质量的影响

铆钉的长度决定了铆钉刺入铝合金材料的深度,也影响材料在底模中的变形量^[14-15]。采用免热处理材料的试片,配合 G120100R24 底模(型腔深度为 1.0 mm)铆钉分别为杜克 C5.3×5.0H4 和杜克 C5.3×4.0H4 进行铆接,铆接效果件图 7 和图 8。可以看到,互



(a)长度为4 mm铆钉铆接效果 (b)长度为5 mm铆钉铆接效果

图7 不同铆钉长度的铆接效果对比

Fig.7 Riveting effect comparison of different rivet lengths


 (a)长度为4 mm铆钉互锁值 $L_L=0.36\text{ mm}$, $L_R=0.38\text{ mm}$, $T_{\min}=1.3\text{ mm}$ (b)长度为5 mm铆钉互锁值 $L_L=0.42\text{ mm}$, $L_R=0.41\text{ mm}$, $T_{\min}=0.2\text{ mm}$

图8 不同铆钉长度的铆接互锁值

Fig.8 Riveting interlock values for different rivet lengths

锁值合格的条件下铆钉长度较短的 SPR 铆接组合不易出现裂纹。

2.3 铆接工艺参数对铆接质量的影响

铆接的工艺参数(铆接速度、缓冲速度等)影响铆钉刺入铝合金本体的速度和铝合金材料变形速率^[16]。采用 G092095 底模+广新 C5.3×5.5H2 铆钉,材料为 5754 铝合金片材+AlSi10MnMg 压铸件铝片。改变铆接速度、缓冲速度和保压时间观察底部裂纹的变化情况,见表 3~表 5。结果发现,铆接速度为 35 mm/s,保压时间为 0.3 s 时,不同的缓冲速度下铆接点的铆扣上都有轻微裂纹,外观上无明显差异,铆接的互锁值和底部残留量都符合要求且数据接近,可以推断出缓冲速度对铆接裂纹影响不大。不同的铆接速度下,外观上铆扣表面都有细小裂纹,且相互间无明显差异,各个铆接速度下的互锁值和底部残留厚度合格,可以推断出铆接速度的变化对底模裂纹影响较小。不同保压时间下,铆扣底部都有微小裂纹,且相互间无明显差异,铆接的互锁值和残留底厚合格满足标准要求,保压时间对铆接裂纹影响不大。

表3 缓冲速度对铆接裂纹的影响

Tab.3 Effects of buffering speed on riveting cracks

缓冲速度/ (mm·s ⁻¹)	铆接效果图	截面图	互锁值/mm
0.18			$L_L=0.547$ $L_R=0.503$ $T_{\min}=0.649$
2			$L_L=0.592$ $L_R=0.633$ $T_{\min}=0.735$
5			$L_L=0.502$ $L_R=0.531$ $T_{\min}=0.762$
7			$L_L=0.571$ $L_R=0.563$ $T_{\min}=0.634$
10			$L_L=0.553$ $L_R=0.533$ $T_{\min}=0.720$

表 4 铆接速度对铆接裂纹的影响

Tab.4 Effects of riveting speed on riveting cracks

铆接速度/ (mm·s ⁻¹)	铆接效果图	截面图	互锁值/mm
11			$L_L=0.583$ $L_R=0.663$ $T_{min}=0.835$
18			$L_L=0.463$ $L_R=0.556$ $T_{min}=0.765$
25			$L_L=0.656$ $L_R=0.644$ $T_{min}=0.925$
35			$L_L=0.656$ $L_R=0.446$ $T_{min}=0.629$

表 5 保压时间对铆接裂纹的影响

Tab.5 Effects of holding time on riveting cracks

保压时间/s	铆接效果图	截面图	互锁值/mm
0.3			$L_L=0.611$ $L_R=0.504$ $T_{min}=0.605$
0.6			$L_L=0.506$ $L_R=0.561$ $T_{min}=0.354$
1.0			$L_L=0.587$ $L_R=0.594$ $T_{min}=0.672$

2.4 试验结果及分析

从不同深度的底模试验中可以观察到,由于铆钉钉入板件内部,板件和铆钉同时产生塑性变形,铆钉的尖角处存在较大内应力,底模的深度不同会导致应力的分布差异,较深的底模在应力和变形更大,铝合金板材会出现互相撕扯的效果,型腔深的撕扯效果更加明显,较浅底模更加容易出现铆接裂纹。不同长度的铆钉在铆接时,较长的铆钉侵入被铆接材料的深度更深,铝合金板材在铆钉的挤压下被迫流动从而产生形变,当形变的量超过材料的忍耐极限的时候就会产生裂纹,形变量越大裂纹越大。

主要的铆接参数有铆接速度、缓冲速度和保压时间,铆接参数影响铆钉侵入板材的速度和停留时间,一般情况下都期望缩短节拍时间;铆接速度设定值对铆钉侵入造成的材料变形速度的影响很小;保压时间阶段也不会造成裂纹的出现或扩展,从试验结果看铆接参数对 SPR 铆接的裂纹影响并不显著。

3 结 论

(1)SPR 铆接的底模采用较浅的型腔设计有利于铆扣底部裂纹的改善,以适应压铸过程中铸件本体铆接处伸长率的波动。

(2)铆钉的长度对铆扣底部的裂纹有明显影响,在保证互锁值的前提下,为减少铆钉对板材的过度挤压导致板材开裂,宜采用较短的铆钉铆接。

(3)SPR 铆接时,不同的铆接参数对被铆接板材和铆钉的变形影响不大,对铆接质量无显著影响。

参 考 文 献

- [1] 张百在,万里,黄志垣.大型复杂铝合金汽车动力部件的压铸技术开发及质量控制[J].特种铸造及有色合金,2009,29(3):219-222.
- [2] 安肇勇,万里,黄志垣.油底壳压铸成形的缺陷分析及对策[J].特种铸造及有色合金,2012,32(3):250-251.
- [3] 楼铭,李永兵,黄舒彦,等.模钉体积比对异种金属自冲铆接接头成形性能影响分析[J].中国机械工程,2009,20(15):1 873-1 876.
- [4] 单丰武,杨海,聂小勇,等.铆模形状和结构胶对热成型钢和铝合金薄板自冲铆接性能的影响[A]//2020 中国汽车工程学会论文集[C].上海,2020.
- [5] 赵新华,姬琳辉,孟宪明.半空心铆钉自冲铆接的研究进展[J].新技术新工艺,2019(10):1-6.
- [6] 聂小勇,杨海,李慎国.真空压铸铝合金减震塔在铝车身上的应用[J].特种铸造及有色合金,2020,40(3):286-290.
- [7] 朱凯,徐心洁,杨群,等.大型薄壁铸件铆接裂纹原因分析[J].宇航材料工艺,2013(4):105-109.
- [8] 许竞楠,何晓聪,曾凯,等.自冲铆接头组织及性能分析[J].焊接学报,2014,35(7):91-95,118.
- [9] HE X C, PEARSON I, YONG K. Self-pierce riveting for sheet materials: State of the art[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007,199(1):27-36.
- [10] HE X C, GU F S, BALL A. Recent development in finite element analysis of self-piercing riveted joints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012,58(5-8):639-643.
- [11] 刘瑞军,于胜武,朱翠娟,等.半空心自冲铆接工艺在车身轻量化中的应用[J].北华大学学报(自然科学版),2007(4):369-372.
- [12] 黄华,但昭学,朱宇,等.一体化压铸免热处理铝合金研究进展[J].特种铸造及有色合金,2024,44(8):1 054-1 061.
- [13] 吴小丹,王敏,孔谅,等.铆速对 SPR 自冲铆接接头成形性能的影响[J].机械设计与制造,2017(2):210-212,217.
- [14] 黄志超,刘伟燕,夏令君,等.铆钉高度和边距对自冲铆接连接质量的影响[J].机械科学与技术,2012,31(9):1 401-1 405.
- [15] 李春平,朱政强,杨上陆,等.凹模形状对铝合金自冲铆接接头力学性能的影响[J].南昌大学学报(工科版),2017,39(1):73-77.
- [16] 万淑敏,胡仕新,张连洪,等.模具工艺参数对自冲铆接工艺过程及铆接质量的影响[J].机械设计,2008(4):62-65.

(编辑:彭瑾)