压铸铝合金自冲铆接接头裂纹扩展行为及工艺优化研究

孙志强 祁靖媛 李绪鹏 李卓裔 王翔 陈逸昶

（比亚迪汽车工业有限公司，深圳 518000）

摘要：为解决AlSi10MnMg铸铝轮罩自冲铆接（SPR）过程中的开裂问题，采用试验与仿真相结合的方法，研究裂纹产生与扩展行为，并从铆接工艺、材料成分、压铸工艺3个方面进行优化。结果表明：铆接开裂由下层板材拉伸应力与邻近区域挤压应力引发，铸铝材料低伸长率及气孔缺陷易诱导裂纹；异型铆模可减少塑性变形与拉伸应力，Sr变质处理可优化共晶Si形态、提高伸长率，优化流道、渣包及模具温度可减少铸件缺陷，降低开裂风险。

关键词：AlSi10MnMg铸铝 自冲铆接 铆接裂纹

中图分类号：U466 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250342

Study on Crack Propagation Behavior and Process Optimization in Die-Cast Aluminum Alloy Self-Piercing Riveted Joints

Sun Zhiqiang, Qi Jingyuan, Li Xupeng, Li Zhuoyi, Wang Xiang, Chen Yichang

(BYD Industries Co., Ltd., Shenzhen 518000)

Abstract: To address the cracking problem during Self-Piercing riveting (SPR) on AlSi10MnMg die-cast aluminum shock towers, a combined experimental and numerical approach is employed to investigate crack initiation and propagation behavior. Optimization is conducted from 3 perspectives: the riveting process, material composition, and die-casting process. The results indicate that riveting cracking is induced by the tensile stress in the lower sheet and the compressive stress in the adjacent region, while the low elongation and porosity defects of the cast aluminum make it prone to crack initiation. A contoured riveting die reduces plastic deformation and tensile stress; Sr modification treatment optimizes the eutectic Si morphology and increases elongation; and optimizing the runner, overflow, and die temperature reduces casting defects, thereby lowering the cracking risk.

Key words: AlSi10MnMg cast aluminum alloy, Self-Piercing Riveting(SPR), Riveting crack

1 前言

高压压铸工艺有利于实现轻量化和零件集成、减少生产工序，在提升车身性能的同时，可大幅降低车身生产成本，提高生产效率，成为当前新能源汽车行业广泛采用的核心技术[1]。此类压铸件通常采用Al-Si(Mn, Mg)系高强度压铸铝合金制备，在某车型中铸铝轮罩区域涉及铸铝与钢材（如600/980双相钢（Dual Phase Steel, DP）D+Z）的异种材料连接。自冲铆接（Self-Piercing Riveting，SPR）工艺在车身轻量化领域应用广泛，可实现同种金属材料、异种金属材料以及金属与非金属材料之间的可靠连接，但由于其机械互锁机制对材料韧性等力学指标有一定要求，当应用于铸铝等偏脆性材料时，易产生开裂等连接缺陷[2]。目前，行业内针对铸铝SPR开裂机理及裂

作者简介：孙志强（1985—），男，工程师，学士学位，研究方向为汽车新材料连接工艺。

参考文献引用格式：

孙志强, 祁靖媛, 李绪鹏, 等. 压铸铝合金自冲铆接接头裂纹扩展行为及工艺优化研究[J]. 汽车工艺与材料, 2026(8): 44-57.

SUN Z Q, QI J Y, LI X P, et al. Study on Crack Propagation Behavior and Process Optimization in Die-Cast Aluminum Alloy Self-Piercing Riveted Joints[J]. Automobile Technology & Material, 2026(8): 44-57.

纹扩展行为的研究仍存在局限性,因此,开展铸铝SPR工艺中裂纹产生及扩展行为的系统研究,通过改进连接技术、优化铸铝材料及压铸工艺以减少或避免此类缺陷的产生,是当前新能源汽车车身轻量化领域亟待解决的问题。

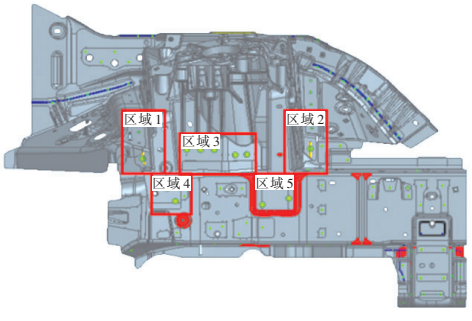
本文以AlSi10MnMg铸铝轮罩及其配合件为验证母材,采用SPR工艺分析铸铝铆接过程及铆接裂纹的产生与扩展规律,通过进一步提升材料力学性能、优化压铸与铆接工艺参数,改善铸铝铆接开裂失效问题,为AlSi10MnMg铸铝材料在轻量化车身结构件中的工程化应用提供技术支撑。

2　铸铝SPR连接工艺

2.1　铸铝轮罩SPR连接工艺

在现代汽车制造领域,铸铝轮罩作为车身轻量化中的核心部件,常需与钢材等异种材料连接。为保障连接接头的强度与耐久性,同时缓解异种材料间热膨胀系数差异引发的连接失效,通常采用SPR连接技术。

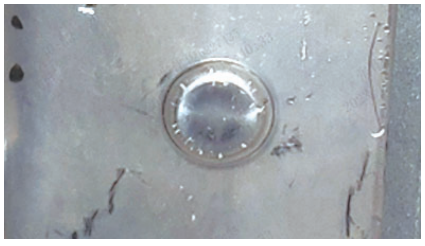
但在实际生产过程中,铸铝件采用SPR工艺连接易出现裂纹缺陷,严重影响连接接头的力学性能及结构稳定性。如图1所示为铸铝轮罩各连接区域SPR铆接后的实际状态,通过宏观观察可见,各连接区域的铸铝件在自冲铆接后均出现不同程度的开裂现象,开裂部位主要集中于铆接接头及周边母材区域。结合图2所示的该车型不同批次铸铝轮罩零件SPR开裂结果可知,不同批次铸铝轮罩的SPR质量稳定性极差,铆扣开裂现象在不同批次、不同连接区域中反复出现,在项目试制前期,该问题已严重制约铸铝轮罩的工程化应用进程,导致零件合格率偏低、生产进度受阻。



(a)某车型铸铝轮罩SPR连接区域



(b)区域1自冲铆接状态



(c)区域2自冲铆接状态



(d)区域3自冲铆接状态

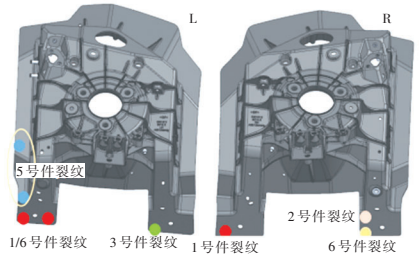


(e)区域4自冲铆接状态

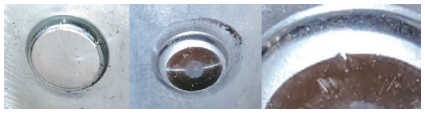


(f)区域5自冲铆接状态

图1　铸铝轮罩各连接区域自冲铆接状态



(a)不同批次铸铝轮罩SPR开裂示意



(b)实际开裂状态

图2　不同批次铸铝轮罩自冲铆接开裂情况示意

因此,研究铸铝轮罩的SPR连接工艺特性,分析铸铝自冲铆接过程中开裂行为的产生机理,并

针对性优化相关工艺参数以抑制开裂缺陷，已成为当前项目推进及铸铝轮罩工程化应用的迫切需求。

2.2 铸铝轮罩自冲铆接开裂的影响因素

自冲铆接过程中，铆杆在驱动力作用下向下运动，将铆钉挤压进入待连接板材，首先刺穿上层板材，随后推动上层板材嵌入下层板材，最终与铆钉共同在下层板材中形成稳定的机械互锁结构。在自冲铆接过程中，待连接板材会承受较大的塑性变形，且铆接区域易出现局部应力集中现象，当应力超过材料的承载极限时，板材会发生开裂。因此，探究自冲铆接过程中底层铸铝材料的应变分布、应力状态及材料流动规律，有助于分析铸铝自冲铆接裂纹的形成机理及扩展行为。

铸铝材料特性是影响SPR开裂敏感性的核心因素之一，其中，铝合金成分的差异对裂纹敏感性具有显著影响。例如，硅含量较高的Al-Si系压铸铝合金因塑性较差、脆性较大，在自冲铆接过程中易出现开裂缺陷。此外，材料的微观结构特征，如晶粒大小、相分布等，会直接影响铸铝材料的塑性和韧性，而材料的热处理状态则会通过改变内部组织形态调控材料的硬度、强度等力学性能。这些因素相互耦合、共同作用，在自冲铆接过程中直接影响铸铝材料的变形能力及裂纹形成倾向。因此，优化压铸铝合金的成分配比，可改善材料微观组织、提升材料综合性能、提高SPR连接质量以及抑制铆接开裂。

高压压铸（High Pressure Die Casting，HPDC）是通过压铸设备将熔融铝液在一定锁模压力、压射速度等工艺参数控制下铸造成型的工艺，可将多个分散零件整合为一个或几个总成部件，显著减少后续工序数量，提高生产效率、降低制造成本，是当前铸铝轮罩的主要成型工艺。压铸生产主要工艺流程为：熔炼→压铸→切边→热处理→毛坯检查→打磨→机械加工→表面处理。在实际压铸过程中，由于铝液熔炼、压射过程中存在气体卷入、溶解气体析出等原因，铸件内部易产生气孔、缩孔、夹杂等内部缺陷，这些缺陷会成为裂纹萌生的核心源头，在后续自冲铆接的外力作用下，易发生裂纹扩展。同时，压铸工艺中模具温度分布不均、冷却速率不一致等会导致铸件内部产生热应力并积累，降低材料的塑性和韧性，进一步增加铆接过程中裂纹产生的风险。因此，探究压铸工艺参数对铸件内部缺陷（如气孔、缩孔）的形成规律及其对材料力学性能的影响，对精准分析铸铝自冲铆接裂纹的形成及扩展行为、优化工艺方案具有重要作用。

SPR工艺参数直接决定铆接过程的稳定性及连接接头质量，材料特性决定了铸铝件对铆接过程的力学响应能力，而压铸工艺则影响铸铝件的初始成型质量和内部微观结构，三者相互关联、共同作用，直接决定了铸铝SPR连接接头的最终可靠性、耐久性及抗开裂能力。因此，本文从SPR工艺参数、铸铝材料特性及压铸工艺参数方面开展试验研究与工艺优化，探究铸铝自冲铆接裂纹的扩展行为及影响机制，以期有效减少铆接裂纹的产生，提高铸铝SPR连接质量，为铸铝轮罩的工程化应用提供技术保障。

3 试验及仿真

3.1 试验材料

本文以铸铝轮罩及其对手件为验证母材，涵盖AlSi10MnMg压铸铝合金及340/590 DP D+Z、600/980 DP D+Z钢板，所用AlSi10MnMg铸铝材料厚度为3.0 mm，340/590 DP D+Z钢板厚度为1.0 mm，600/980 DP D+Z钢板厚度为1.6 mm。本车型项目所用AlSi10MnMg铸铝材料的化学成分如表1中车型1、车型2所示。

表1 铸铝轮罩连接区域各板材化学元素（质量分数） %

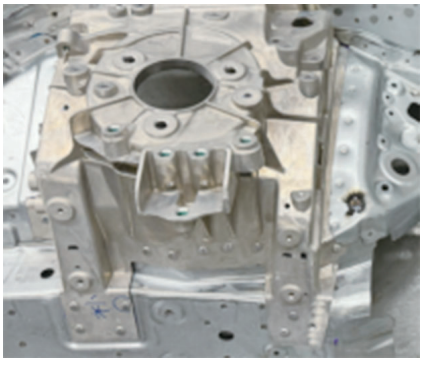
元素	Al	Si	Mn	Mg	Sr	Fe	Ti	Cu	Zn
标准	余量	9.0~11.5	0.4~0.8	0.15~0.45	0.01~0.027	≤0.25	≤0.12	≤0.05	≤0.07
车型1	余量	9.81	0.634	0.31	0.016	0.132	0.566	0.001 1	0.006
车型2	余量	10.71	0.56	0.53	0.020 8	0.137	0.076 3	0.022 2	0.016 5

3.2 试验方法

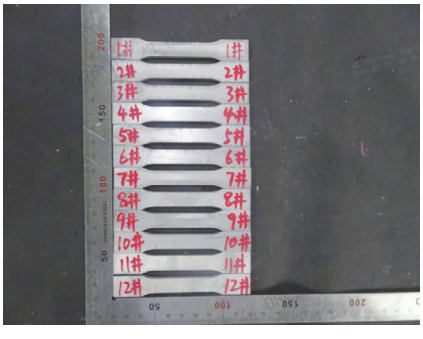
针对AlSi10MnMg铸铝与2种钢板的不同连接组合,开展了铸铝自冲铆接试验,所用铆接设备为SPR专用铆枪,如图3a所示,铸铝轮罩铆接完成后的零件状态如图3b所示,在铸铝轮罩指定区域制备拉伸试样,试样规格符合试验标准,如图3c所示。为深入分析铆接裂纹的微观形成机制,对部分铆接接头制备金相试样,经打磨、抛光、腐蚀等处理后进行显微组织观察与分析;同时结合铆接过程仿真分析,探究铸铝自冲铆接裂纹的形成及扩展行为。



(a)SPR铆枪



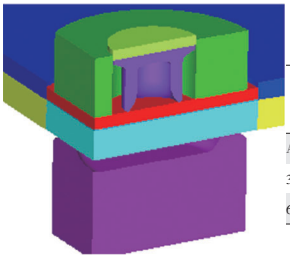
(b)铸铝轮罩铆后零件



(c)力学拉伸试样

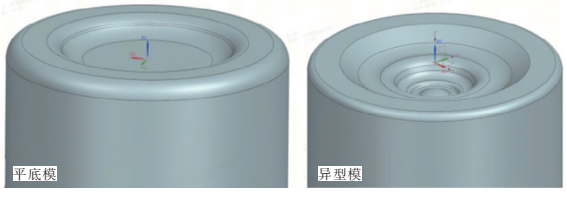
图3　铸铝轮罩SPR铆接试验所用设备

采用仿真软件搭建铸铝自冲铆接过程仿真模型,模拟分析铆接过程中等效塑性应变、等效应力的演变规律及材料流动特性,如图4a所示,同时标注了所涉及连接材料的基本力学性能参数。试验检测发现,不同批次、不同区域的AlSi10MnMg铸铝材料伸长率差异较大,取值范围为9%~13%,远低于340/590 DP D+Z和600/980 DP D+Z钢板。同时,其较低的屈服强度导致材料在铆接过程中易发生塑性变形过载,进而影响裂纹的产生,当铆接底部材料所累积的应变超过材料开裂阈值时,即会出现铆接开裂现象。图4b为本文铸铝SPR连接所采用的平底模与异型模,通过仿真模拟2种铆模的铆接全过程,对比分析2种铆模作用下铸铝材料的应力应变分布、材料流动差异,进而揭示铸铝铆接开裂的原因。



材料号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延展率/%
AlSi10MnMg	130~140	200~210	9~13
340/590D+ZDP	340~440	590	21
600/980D+ZDP	550~800	980	20

(a)仿真模型搭建



(b)铆模

图4　铸铝SPR连接工艺仿真模型

为探究铸铝材料本身对自冲铆接裂纹产生的影响,对铸铝轮罩SPR连接接头的拉伸试样断口进行微观形貌观察,分析断口特征、裂纹萌生位置及扩展路径,明确材料特性与铆接开裂的关联。同时,在铸铝材料中添加不同含量的Sr元素,制备系列铸铝试样,通过金相显微镜观察其微观组织变化,同时对不同Sr含量的铸铝试样进行拉伸试验,测试其强度、伸长率等力学性能指标,对比分析Sr元素添加量对铸铝材料力学性能的影响规律,进而研究铸铝材料成分对自冲铆接过程中裂纹扩展行为的调控作用。

最后,通过仿真模拟分析铸铝轮罩的高压压铸工艺全过程,研究压铸过程中气孔、缩孔等内部缺陷的形成机制,以及此类缺陷对后续自冲铆接裂纹萌生与扩展的影响。针对压铸工艺存在的不

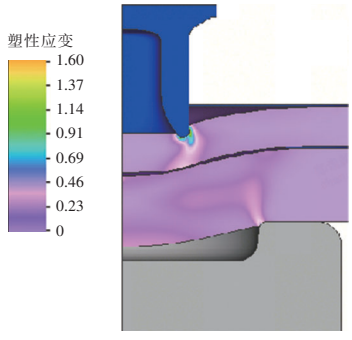
足，通过优化压铸流道的走向与截面尺寸、合理设计渣包的位置与大小、精准控制模具温度分布等方法改进压铸工艺，减少铸件内部缺陷，从而降低铸铝件在自冲铆接过程中裂纹的产生概率。

4 铸铝自冲铆接裂纹扩展行为

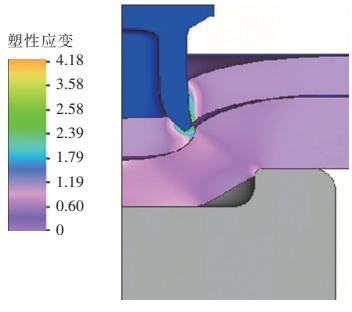
4.1 铆接工艺对开裂的影响

4.1.1 铸铝自冲铆接过程等效塑性应变

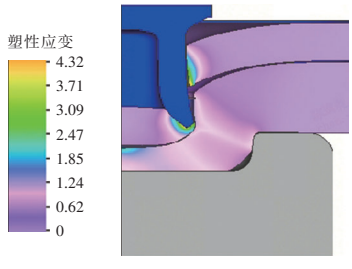
为探究铆接工艺对铸铝自冲铆接开裂的影响机制，首先对采用平底模的铸铝自冲铆接过程进行系统的仿真分析，研究铆接全过程中等效塑性应变的分布特征及演变规律，等效塑性应变直接影响铸铝材料的塑性变形，是判断裂纹萌生与扩展的重要依据。如图 5 所示为 AlSi10MnMg 铸铝与对应钢板自冲铆接过程中等效塑性应变的仿真分析结果，结合铆杆下压行程，可将铆接过程分为 4 个阶段。



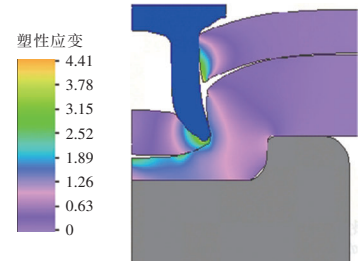
(a)第 1 阶段



(b)第 2 阶段



(c)第 3 阶段



(d)第 4 阶段

图 5 铸铝 SPR 铆接过程等效塑性应变

第 1 阶段：如图 5a 所示，当铆杆下压行程达到 2.0 mm 时，上、下层待连接板材同步发生初始塑性变形，未出现板材刺穿现象。其中，上层 AlSi10MnMg 铸铝板材的等效塑性应变主要集中在铆钉钉脚与上层板材的接触区域，应变分布相对集中且数值较小；下层钢板的等效塑性应变主要分布在下层板与铆模内半径尖角的接触位置，该区域因受力集中出现轻微塑性变形，未出现明显的应变峰值，材料处于安全变形范围。

第 2 阶段：如图 5b 所示，当铆杆下压行程增至 4.0 mm 时，上层 AlSi10MnMg 铸铝板材被铆钉顺利刺穿，随着铆杆下压行程的持续增大，上层铸铝板材的等效塑性应变呈现显著增大趋势，应变集中区域逐渐扩大至铆钉刺穿周围区域；同时，铆模内的下层钢板在铆钉的挤压作用下发生明显塑性变形，应变分布范围扩大，且在与铆钉接触的区域出现应变峰值，此时材料变形处于可控范围，未出现裂纹萌生迹象。

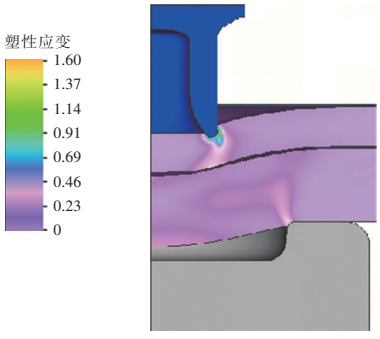
第 3 阶段：如图 5c 所示，当铆杆下压行程达到 5.0 mm 时，上层铸铝板材被刺穿的部分在铆杆的驱动力作用下持续向下挤压下层钢板。铆钉完全进入下层钢板后，其钉脚对下层钢板产生强烈的挤压作用，导致钉脚与下层钢板的接触区域出现较大的等效塑性应变，形成明显的应变集中区；同时，下层钢板在铆钉的挤压与铆模的约束共同作用下，与铆模接触的区域产生相对滑动，该滑动摩擦作用进一步加剧了局部应变集中，使该区域等效塑性应变数值显著升高，接近铸铝材料的开裂应变阈值，为裂纹萌生提供了条件。

第 4 阶段：如图 5d 所示，当铆杆下压行程达到 5.6 mm 时，铆接过程完成。此时，铆钉头部对上层铸铝板材的断口区域产生挤压作用，使该区域产

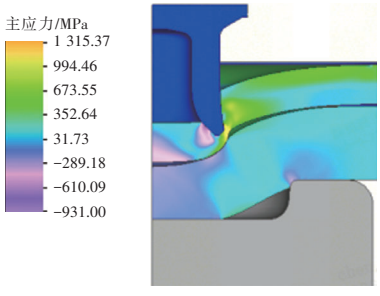
生较大的等效塑性应变;下层钢板在铆钉的挤压作用下充分充盈铆模型腔,铆钉钉脚与下层钢板的接触位置仍保持较高的等效塑性应变,且应变分布趋于稳定。该阶段若应变超过材料开裂阈值,上层铸铝板材断口周围及下层钢板应变集中区域将直接引发铆接裂纹。

4.1.2　铸铝自冲铆接过程平均应力

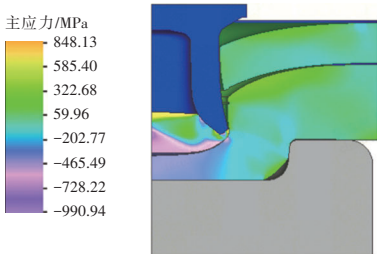
在铸铝自冲铆接过程中,平均应力的分布及演变规律直接影响材料的受力状态,与等效塑性应变的协同作用决定了裂纹的萌生与扩展,因此,在分析等效塑性应变的基础上,对铸铝自冲铆接过程的平均应力进行仿真分析。如图6所示为AlSi10MnMg铸铝与对应钢板自冲铆接过程中平均应力的仿真分析结果,结合铆接过程的受力特点,可将自冲铆接区域划分为不同应力特征区域进行针对性分析,各区域的划分如图7所示。



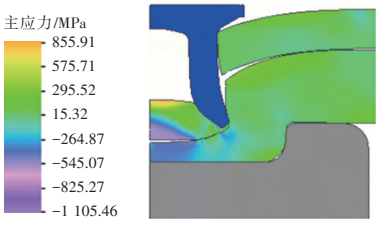
(a)第1阶段



(b)第2阶段



(c)第3阶段



(d)第4阶段

图6　铸铝SPR铆接过程平均应力

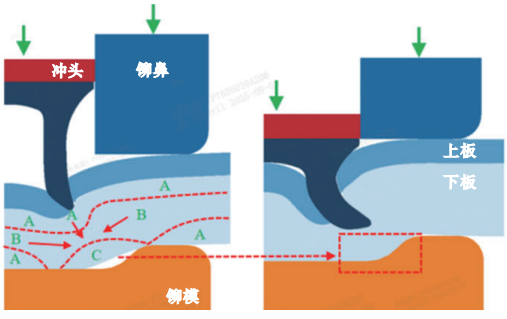


图7　SPR铆接过程不同区域应力分析

由于铸铝板材断裂表面与铆钉之间存在较大摩擦阻力,区域A(铆钉与板材接触核心区域)内的铸铝材料受到三向压应力作用。该区域的应力分布呈现显著的梯度特征,越靠近铆钉与板材的接触表面中心,在外层材料的约束阻碍及摩擦阻力的共同作用下,三向压应力越大,材料受挤压越强烈,塑性变形受到抑制,不易直接产生裂纹,但会为后续应力释放过程中的裂纹萌生埋下隐患。

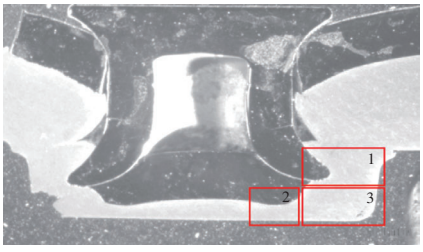
区域B位于区域A的外侧,受接触表面摩擦阻力的影响显著减弱,因此,该区域在水平方向上所受的压应力较小。在铆杆下压的轴向压应力作用下,区域B的铸铝材料发生显著的径向膨胀变形;同时,区域A在三向压应力作用下产生的压缩变形会对区域B产生持续挤压,轴向挤压与径向膨胀变形的综合作用会驱动区域C发生塑性变形。

区域C的外侧是自由表面,受表面摩擦影响较小,应力状态类似于单向压应力σ_3。然而,由于区域B的变形较大,当金属向外流动时,区域C受到径向压应力σ_2,导致该区域金属在切向方向上受到拉应力σ_1,且越靠近坯料表面,切向拉应力越大。当切向拉应力超过材料的强度极限或允许的切向变形程度时,将产生纵向裂纹。

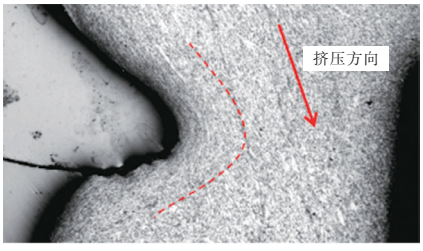
4.1.3　铸铝自冲铆接过程材料流动分析

材料流动行为是影响铸铝SPR裂纹萌生与扩展的关键因素,结合金相显微观察与仿真分析,可清晰

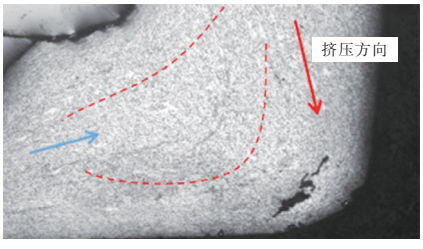
揭示铆接过程中铸铝材料的流动规律及与裂纹形成的内在关联。如图 8 所示为 AlSi10MnMg 铸铝自冲铆接过程中钉脚区域材料流动行为的金相显微形貌。



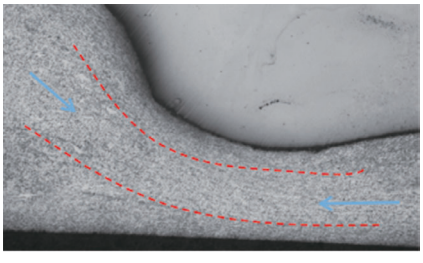
(a)整体形貌



(b)区域 1 放大形貌



(c)区域 2 放大形貌



(d)区域 3 放大形貌

图 8 铸铝自冲铆接过程材料流动分析

由图 8b 分析可知,该区域铸铝晶粒组织密集且呈平行排列,且越靠近铆钉钉脚边缘,晶粒变形量越大。其形成原因主要为铸铝与铆钉接触区域受到钉脚施加的挤压应力,发生塑性变形并向下填充铆模型腔。当铸铝材料接触到铆模边缘后,流动方向发生改变并向内侧流动,且越靠近铆模凸台侧的板材,受到的约束作用越强,变形与流动程度也越显著,导致该区域晶粒发生明显的定向变形。

由图 8c 分析可知,该区域铸铝晶粒呈细长状,且材料未发生明显的流动。在铆接过程中,铆钉向下施加垂直方向的压应力,下层铸铝材料与铆模底面接触后,受到铆模的反作用力,此时该区域铸铝材料主要承受轴向挤压力,未产生明显的径向或切向流动,长期挤压作用导致此处材料发生加工硬化,晶粒被挤压拉长,形成细长状组织。

由图 8d 分析可知,区域 3 为铆接接头的 R 角区域,在此区域可观察到铸铝材料 R 角外侧出现明显裂纹。结合前文压铸工艺对铸件缺陷的影响分析,推测该裂纹的产生与铸铝母材本身的内部缺陷密切相关,铸铝母材中该区域可能存在气孔等内部缺陷,当下层板材充盈铆模时,R 角区域受到弯折与拉伸复合应力作用,气孔所在位置因应力集中效应,成为裂纹萌生的核心,进而在内部产生裂纹并逐步扩展。

4.1.4 铸铝自冲铆接裂纹类型

如图 9 所示为铸铝轮罩 SPR 裂纹类型 Ⅰ 的金相显微形貌及开裂区域放大图。分析可知,该类型裂纹主要产生于下层铸铝板材,由于下层板材在铆接过程中处于压应力、剪切力及折弯力的复杂受力环境中,而 AlSi10MnMg 铸造铝合金伸长率较低、塑性变形能力较差,难以承受复杂应力作用下的塑性变形,最终导致该区域产生明显裂纹。结合图 5、图 6 的仿真分析结果,在接近钉脚区域的铸铝板材中可观察到较多微小的微裂纹。铆接过程中,下层板材充盈铆模时,钉脚穿刺下层铸铝,导致与铆模接触区域的铸铝受到钉脚挤压产生的剪切应力,内侧两端材料向钉脚处挤压流动,而外侧铸铝发生弯折并承受两侧的拉伸应力,外侧材料向两端流动。由于铆模对材料流动的约束作用,产生与流动方向相反的反作用力,进而引起铸铝材料发生相互错动的滑移位错。随着塑性变形的进一步累积,位错发生堆积,诱发钉脚处铸铝产生微裂纹,在后续板材充盈 R 角的过程中,微裂纹不断扩展并聚集,最终在 R 角处形成宏观裂纹。

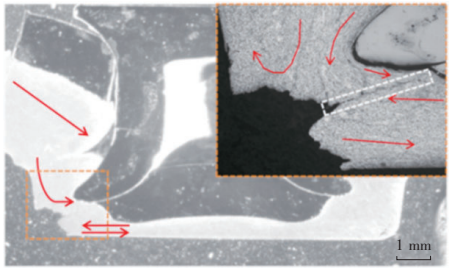
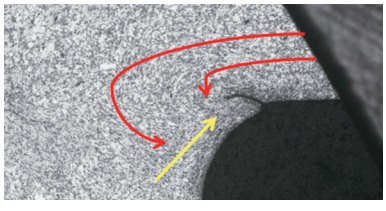
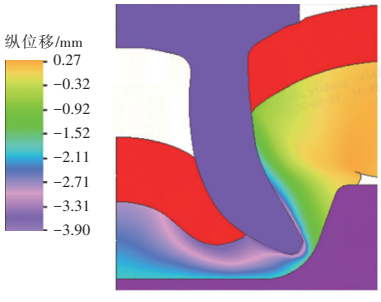


图 9 铸铝轮罩自冲铆接裂纹类型 Ⅰ 显微形貌

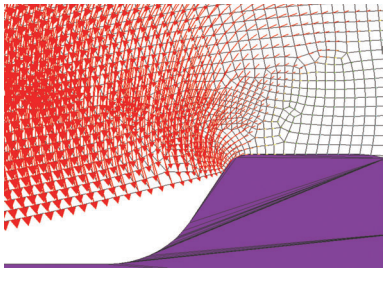
如图10所示为铸铝轮罩SPR裂纹类型Ⅱ的金相显微形貌及仿真分析结果,该类型裂纹主要出现在下层板材与铆模的结合处。结合图10b所示的SPR过程Z向位移云图可知,在下层板材与铆模结合处,下层板材局部发生Z向向上的位移,出现向上翘曲变形;结合图10c与图10d的仿真分析结果,在铆接第2阶段,下层板材与铆模接触位置受到折弯变形作用,晶粒呈现明显的拉伸状态;在铆接第4阶段,底层板材与铆模完全填充后,铆钉在铆杆作用下继续扎进板材,该区域内材料受到向上的挤压作用,在边角位置出现材料堆叠现象,最终导致该区域材料因承受剪切应力而产生裂纹。



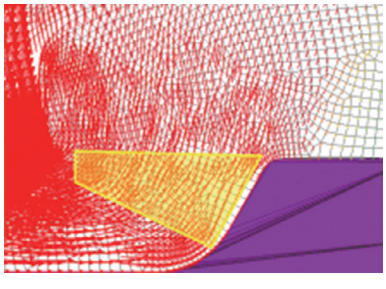
(a)局部放大



(b)Z向位移仿真



(c)第2阶段材料流动



(d)第4阶段材料流动

图10　铸铝轮罩自冲铆接裂纹类型Ⅱ显微形貌及仿真分析

如图11所示为铸铝轮罩自冲铆接裂纹类型Ⅲ的金相显微形貌,该类型裂纹呈尖角状,主要产生于下层板内侧。分析其产生原因是下层板材完全填充铆模后,铆钉在铆杆的持续作用下继续扎进板材,铆钉对上层材料施加向下的压力,上层板则对下层板材施加Z向斜向内下的挤压力,驱动下层板材材料向斜向内下方流动。同时,铆钉下压过程中,铆钉钉脚持续向外扩张,进一步促使该区域铸铝材料向斜下方流动。上述2种流动趋势的叠加,导致该区域下层板材料承受较大的剪切应力,当剪切应力超过材料的剪切强度极限时,便产生尖角状裂纹。

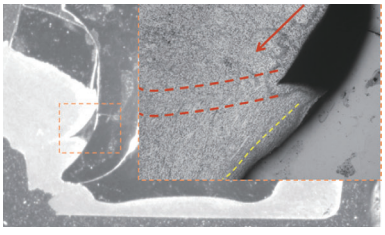


图11　铸铝轮罩自冲铆接裂纹类型Ⅲ显微形貌

如图12所示为铸铝轮罩SPR裂纹类型Ⅳ的金相显微形貌,该类型裂纹较为特殊,在铆钉钉脚的内侧与外侧均有产生。结合铆接全过程的应力变化及铆钉变形特征,其形成机理如下:在铆接第1阶段,铆钉在铆杆作用下刺穿上层板材,此时铆钉承受较大的挤压应力;在铆接第2阶段,铆钉刺穿上层板后发生明显的塑性变形,钉脚向外扩张并进一步穿刺下层板材;在铆接第3、4阶段,铆钉钉脚持续发生外张变形,直至铆接完成。在整个铆接过程中,铆钉钉脚内侧始终承受较高的拉伸应力,应力长期累积导致区域1(钉脚内侧)产生裂纹;此外,在上层板材与下层板材的搭接处,铆钉同时受到上层板材向下的压力与下层板材向上的反作用力,2个方向相反的作用力使该区域产生较大的应力集中,进而在区域2(搭接处钉脚外侧)产生裂纹。

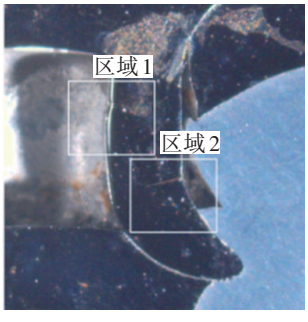
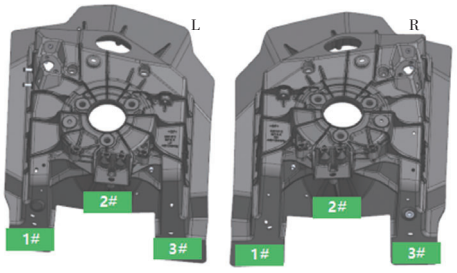


图12　铸铝轮罩自冲铆接裂纹类型Ⅳ显微形貌

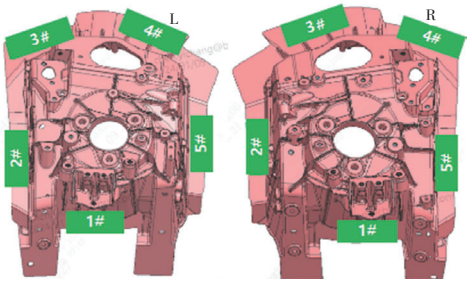
4.2 铸铝材料对自冲铆接的影响

相较于冲压铝合金、铝型材的 SPR 工艺，AlSi10MnMg 铸铝材料在自冲铆接过程中更易出现开裂缺陷，这与铸铝材料自身的组织特性、内部缺陷及力学性能密切相关。结合铆接过程仿真分析结果可知，铸铝材料的开裂多发生在铆接过程中塑性变形最大的区域，由此可得出下层铸铝材料的微观组织、内部缺陷及伸长率等核心因素直接决定铸铝材料的铆接性能，进而影响铆接裂纹的萌生与扩展。

图 13 所示为铸铝轮罩拉伸试样的取样位置，其中图 13a 为车型 1 铸铝轮罩取样位置，分为左右各 3 个区域，编号为 L1~L3、R1~R3，图 13b 为车型 2 铸铝轮罩取样位置，分为左右各 5 个区域，编号为 L1~L5、R1~R5，各取样区域的伸长率统计结果如表 2 所示。由表 2 数据可知，所选铸铝拉伸试样的伸长率取值范围为 8.0%~17.9%，其中，在铸铝轮罩的 SPR 连接关键区域，存在伸长率低于 10% 的情况。竞品调研及行业内相关研究结果表明，当 AlSi10MnMg 铸铝材料的伸长率低于 10% 时，其塑性变形能力难以满足自冲铆接过程中的塑性变形需求，极易出现铆接开裂现象。



(a)车型 1



(b)车型 2

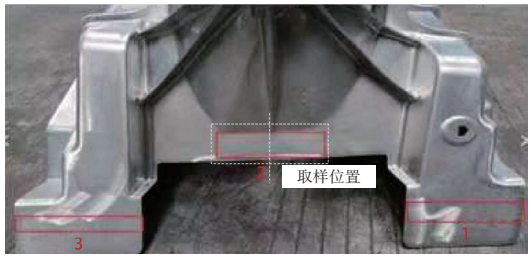
图 13 铸铝轮罩拉伸试样取样位置

表 2 车型 1 及车型 2 铸铝轮罩选区延展率统计 %

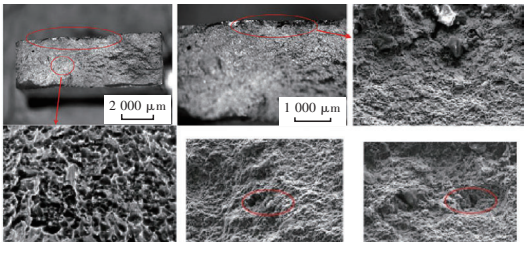
车型	左轮罩选区延展率					右轮罩选区延展率				
	L1	L2	L3	L4	L5	R1	R2	R3	R4	R5
车型 1	10.4 ~ 14.1	10.7 ~ 14.1	9.5 ~ 11.9			10.5 ~ 13.9	10.4 ~ 17.9	8.6 ~ 11.9		
车型 2	8.0	11.5	12.0	12.0	12.0	10.5	12.0	14.0	13.0	15.0

对车型 1 铸铝轮罩中选取的拉伸试样进行断口形貌观察，具体结果如图 14 所示。通过显微观察发现，试样 1 与试样 3 的断口处存在明显的气孔缺陷，此类气孔在拉伸过程中易成为应力集中点，诱导微裂纹萌生并扩展，最终导致试样呈现典型的脆性断裂特征，这与表 2 中该 2 处试样伸长率较低的试验结果高度吻合。而试样 2 的断口处可观察到明显的韧窝结构，呈现典型的韧性断裂特征，其伸长率也处于较高水平。

结合铸铝 SPR 连接工艺仿真分析结果，在自冲铆接连接区域，较低的伸长率导致铸铝材料抵抗塑性变形的能力较差，在下层铸铝材料填充铆模的过程中，随着塑性变形的不断累积，尤其是在铆模 *R* 角等应力集中区域，材料易发生塑性变形过载，极易形成铆接裂纹。综合行业内调研结果及铸铝材料自身特性，提出 SPR 连接区域铸铝材料的伸长率需≥10%，为铸铝材料的选用及性能优化提供明确的技术指标，从而抑制铆接开裂缺陷的产生。



(a)铸铝轮罩选取拉伸试样值置

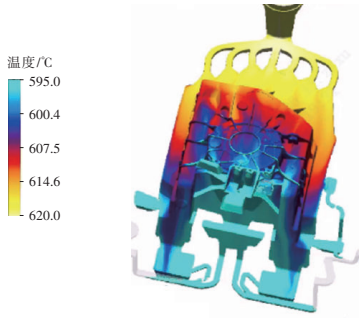


(b)试样位置细节

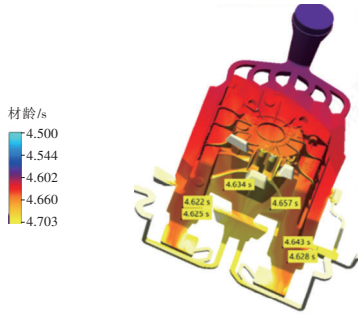
图 14 铸铝轮罩选取拉伸试样断口形貌

4.3　压铸工艺对SPR的影响

为进一步探究图13中试样1与试样3位置伸长率较低的原因,结合前文压铸工艺对铸铝件内部缺陷的影响分析,对该车型铸铝轮罩的HPDC工艺过程进行仿真分析,重点研究金属铝液的填充温度及填充时间对铸件质量的影响,仿真分析结果如图15所示。



(a)填充温度



(b)填充时间

图15　铸铝轮罩金属液填充仿真分析

由仿真结果可知,试样1与试样3所在位置处于金属铝液填充的末端区域。金属铝液在压铸过程中,需经过浇铸、抽真空、流动等多个环节,才能逐步填充至该末端区域。在此过程中,金属铝液不可避免地与空气发生接触,易在铸件内部形成气孔、夹杂等内部缺陷,同时,金属铝液在流动过程中会产生热量损失,当到达试样1与试样3所在的末端位置时,铝液温度显著降低,流动性大幅下降,易形成冷隔、缩孔等铸造缺陷。

上述铸造缺陷的存在,导致铸铝轮罩末端区域(即试样1与试样3所在区域)的成型质量较差,微观组织不均匀,进而使该区域的伸长率显著低于其他区域,塑性变形能力不足。在后续自冲铆接过程中,该区域材料难以承受铆接带来的塑性变形及应力作用,更易发生铆接开裂现象,这也进一步验证了压铸工艺对铸铝SPR性能的显著影响。

5　铸铝自冲铆接开裂控制策略

结合前文对铸铝SPR裂纹的产生和扩展行为研究及铸铝零件延展率的分析,可从铆接工艺、材料化学成分、压铸工艺3个方面进行优化。

5.1　铸铝SPR工艺优化

本文采用不同深度铆模及异型模验证铸铝SPR工艺,通过减少铆接塑性变形及改变铆接过程应力状态,在不改变铸铝材料延展率的情况下降低铆接开裂风险[3]。

5.1.1　铆模深度对铸铝SPR工艺的影响

采用3种不同型号的平底模开展铆接验证试验,不同铆模深度对应的铆后铆扣外观状态如图16所示。试验结果表明,采用A型号铆模(深度较大)进行铆接时,下层铸铝板材与铆模*R*角接触区域依旧出现明显的开裂现象,当降低铆模深度,采用B型、C型铆模进行铆接时,铆扣外观质量良好,未观察到明显的裂纹缺陷。



(a)A型



(b)B型



(c)C型

图16　不同铆模深度铸铝自冲铆接外观

5.1.2 铆模形状对铸铝 SPR 工艺的影响

在优化铆模深度的基础上，进一步探究铆模形状对铸铝 SPR 开裂的影响。采用平底模与异型模 2 种不同形状的铆模开展 SPR 试验，得到的异形模铆扣形貌如图 17 所示。平底模铆接后（图 16a），铸铝材料表面出现明显的裂纹缺陷，而异型铆模铆接后，铆扣表面光滑平整，未出现任何裂纹缺陷，铆接质量显著提升。

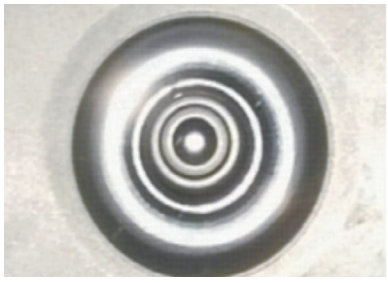
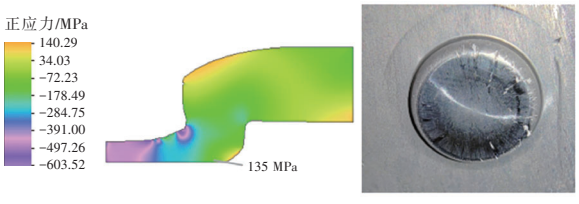


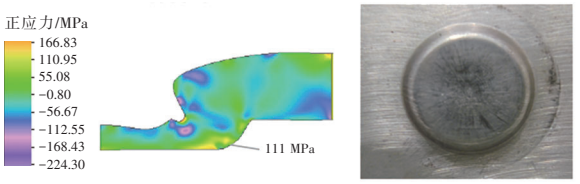
图 17 铆模类型铸铝自冲铆接外观

异型模的铆模底部采用非平面设计，设置多级台阶结构，该结构可在下层板材填充铆模的过程中，改变材料的受力状态与流动路径，有效减少铆模 *R* 角及底部区域的拉伸应力，避免铆模边缘出现应力集中，同时，多级台阶可分散铆接过程中的塑性变形，避免单一区域变形过载，从而避免铆接开裂现象。

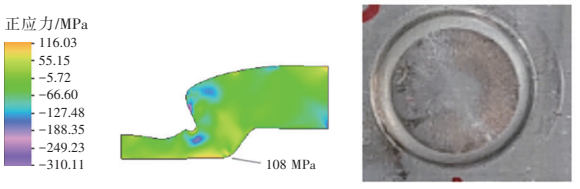
为进一步验证异型模的优化效果，对平底模与异型模铆接过程中的平均主应力进行仿真分析，仿真结果如图 18 所示。采用平底模具时，A 铆模比 B、C 铆模宽度和深度多 20%，但应力在 *R* 角处集中。实际铆接后，该应力集中区域出现开裂。为改善应力分布，D 铆模在保持 B 铆模相同容积的前提下，将型面调整为圆弧。结果发现，底部应力分散到整个底部面上，实际铆接后未出现开裂。进一步优化中，E 铆模在 A 铆模基础上增加了内部造型。然而，这种设计导致材料流动不顺畅，在边缘出现局部最大应力。基于 E 铆模，F 铆模通过分段增加材料流动造型，使底部应力最终控制在≤90 MPa。



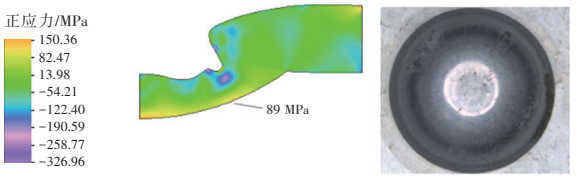
（a）A 型



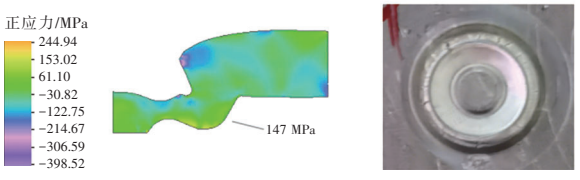
（b）B 型



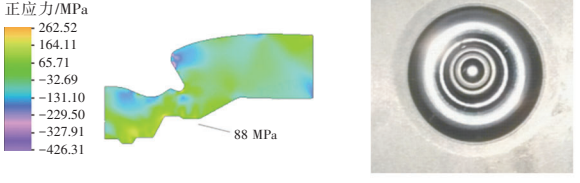
（c）C 型



（d）D 型



（e）E 型



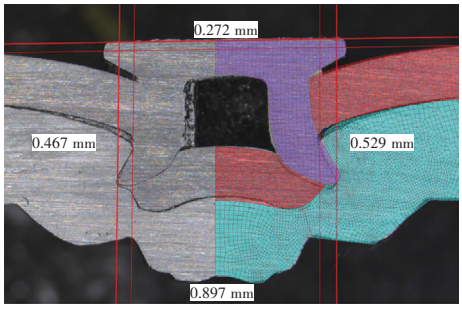
（f）F 型

图 18 不同铆模铆扣应力仿真分析

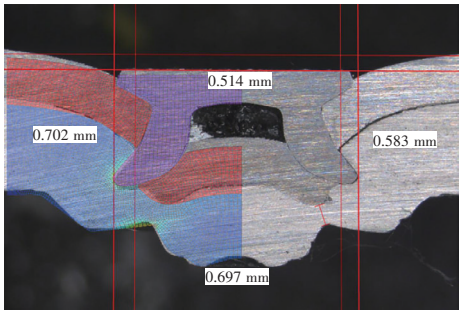
此外，异型模还能提高铆接过程中的压应力占比，平衡应力分布，从而在不改变铸铝材料伸长率的前提下，有效降低铸铝 SPR 开裂风险。

为验证仿真模型的准确性，在完成试验与仿真验证后，本文开展了试验与仿真的对比分析。如图 19 所示为 F 型异型铆模铸铝 SPR 金相组织与仿真结果的对比结束，其中，图 19a 所示铆接头高为 +0.3 mm，左、右互锁值分别为 0.467 mm、0.629 mm，剩余底厚为 0.897 mm。图 19b 所示铆接头高为 −0.5 mm，左、右互锁值分别为 0.702 mm、0.583 mm，剩余板厚为 0.697 mm。2 项指标均符合 SPR 金相质量要求，不仅验证了本文所搭建仿真模型的准

确性,也为后续铸铝SPR工艺的进一步优化提供了技术支撑。



(a)头高+0.3 mm



(b)头高−0.5 mm

图19　F型号异型铆模铸铝自冲铆接金相及仿真对比

5.2　铸铝化学成分优化

常用铸铝轮罩采用Al−Si(Mn, Mg)系亚共晶合金(如A356),其中,共晶Si的形态对铸件的塑性有直接影响。热处理前粗糙的共晶Si呈针状或板状。针状、板状共晶Si在材料发生塑性变形时,会导致材料各向受力不均匀,产生应力集中,严重降低铸铝件的塑性和韧性,进而增加SPR开裂概率。通过向铸铝材料中添加微量的Sr合金元素,可实现铸件组织结构的细化,有效改善共晶Si的形态,使其由针状、板状转变为球状。球状共晶Si可有效减少应力集中现象,提升材料的塑性变形能力,从而提高铸件的伸长率,为抑制SPR开裂提供材料层面的保障。

向铸铝中添加Sr元素后,对不同Sr含量的铸铝试样进行拉伸测试,得到的力学性能如图20所示。试验结果表明,Sr元素的加入不仅能有效提升铸铝材料的抗拉强度,还能大幅改善铸铝的伸长率。材料抗拉强度的提升可增强其抗挤压能力,而伸长率的提高则能提升其塑性变形能力,有助于铸铝材料在SPR过程中承受更大的塑性变形和复杂应力,从而降低裂纹形成的风险。

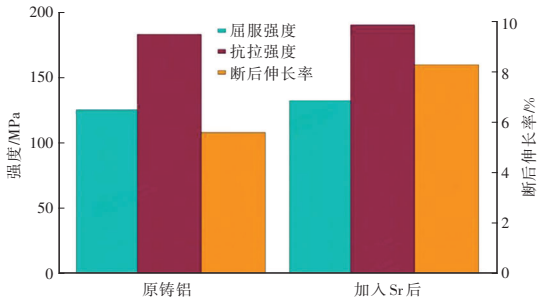


图20　不同Sr含量的铸铝力学性能

5.3　铸铝压铸工艺优化

通过优化压铸工艺,包括浇铸口布置、流道布置、渣包设计及压铸工艺参数等,可改善铝液在压铸模具中的流动性,减少因铝液返流、温度损失等造成的气孔、缩孔等缺陷,大幅提升压铸零件质量,降低SPR开裂风险[4]。其中,合理的渣包设计可有效收集前端铝液中的杂质和气体,避免在零件末端形成缺陷,而零件末端往往是车身SPR连接的关键区域。

5.3.1　压铸流道、渣包设计优化

针对铸铝轮罩压铸过程中铝液流动不均、末端温度损失过大、易产生气孔等问题,对其浇道及流道进行优化设计,具体优化方案如图21所示。增加两股侧面流道,对中间特征孔进行搭桥加厚处理,同时增设两侧副浇道,弥补金属液到达零件末端时的温度损失,改善末端区域的铸铝组织均匀性,避免因温度过低、流动性不足导致的填充不完全、冷隔等缺陷。

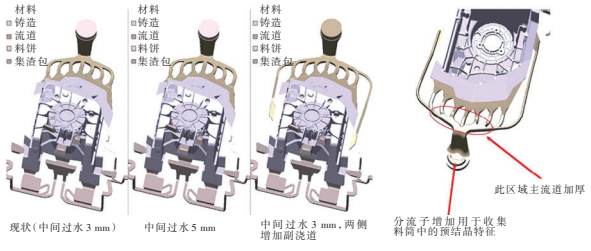


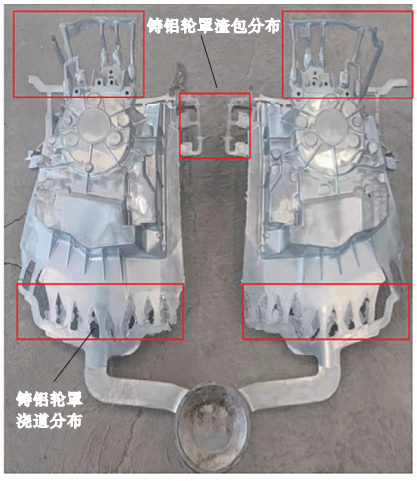
图21　铸铝轮罩浇道优化

铝液在压铸过程中,主流道的流动速度大于两侧副流道的流动速度。考虑到铸铝零件中间区域结构复杂、两侧结构简单的特点,对最外侧流道进行截断处理,确保铝液在压铸过程中始终保持中间先填充、再回流其他区域的流动顺序。

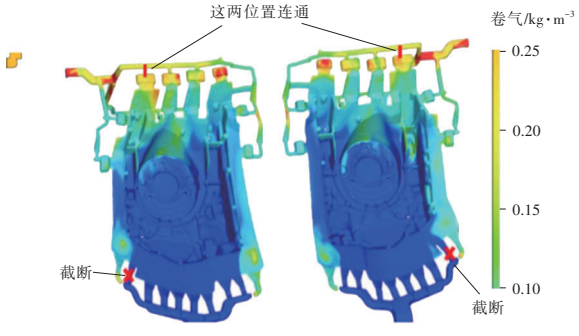
若最外侧流道未截断,会导致两侧铝液填充速度过快、中间填充速度较慢,两侧铝液易返流至中间区域,形成卷气缺陷。而中间区域由于结构

复杂，渣包布置难度较大、成本较高，且渣包设置过多易影响铸铝零件的整体结构性能，因此，通过截断最外侧流道，可从根源上避免铝液返流卷气，提升压铸质量。

优化后的铸铝轮罩压铸后零件实物及渣包分布如图 22 所示。在铸铝轮罩末端的两侧均布置渣包，同时与溢流道连通，加强前端铝液的收集排渣作用，减少该区域气孔等缺陷。



(a)铸铝轮罩零件



(b)优化后铸铝轮罩模流分析

图 22 铸铝轮罩渣包优化分布

5.3.2 压铸流道与渣包设计优化

压铸工艺参数直接影响铝液的流动性、填充效果及铸件内部缺陷的产生，其中，铝液温度和模具温度是关键参数。如图 23 所示为铸铝轮罩压铸工艺参数及模具表面温度检测结果，本次优化确定铝液温度为 700 ℃，同时将模具温度由 150 ℃提升至 180 ℃，模具温度的提升可极大改善铝液的流动性，尤其能缓解零件末端铝液的温度损失问题，避免因铝液温度过低导致的排渣不充分、填充不完全、冷隔等现象，进一步减少铸件内部缺陷。

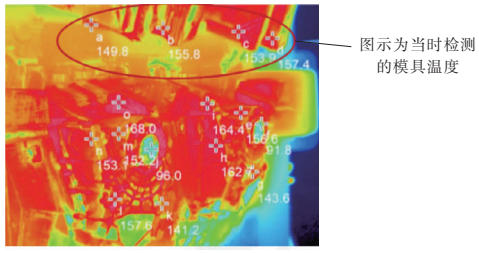


图 23 铸铝轮罩压铸工艺参数及模具表面温度检测

为验证压铸工艺优化的效果，对优化后的铸铝轮罩进行 X 射线检测，检测结果如图 24 所示。本次共对铸铝轮罩 8 处关键区域进行 X 射线检测，结果显示，铝液填充充分，所有检测区域均未发现缩孔、气孔等缺陷。这表明，通过流道、渣包设计优化及工艺参数调整，可有效减少铸铝材料内部的气孔、缩孔等缺陷，提高铸铝件的平均伸长率，增强材料的塑性变形能力，从而减少铸铝自冲铆接过程中裂纹的形成。

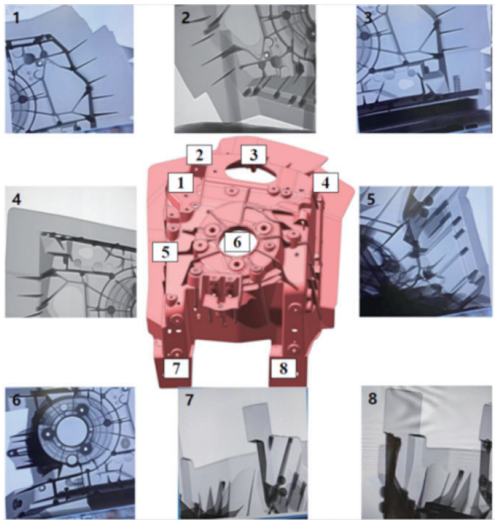


图 24 车型 2 铸铝轮罩 X 射线检测结果

6 结束语

本文以 AlSi10MnMg 铸铝轮罩及配合件为验证母材，采用自冲铆接工艺分析铸铝铆接过程及铆接裂纹的形成及扩展行为，通过进一步提升压铸与铆接工艺，改善铸铝铆接开裂失效，主要结论如下：

a. 铸铝 SPR 开裂的核心机理，铆接过程中，下层铸铝板材局部区域因弯折产生拉伸应力，邻近区域因挤压产生压应力，当复合应力超过材料的塑性变形极限时，会萌生微裂纹，随着铆接过程的持续，塑性变形进一步加剧，微裂纹不断扩展并聚

集,最终形成宏观裂纹。同时,铸铝材料本身伸长率较低、抗塑性变形能力较差,且内部易存在气孔等缺陷,此类缺陷易形成应力集中,进一步诱导裂纹萌生与扩展,加剧铆接开裂。

b. 采用异型铆模,可减少单一区域的塑性变形量,且避免下层板材在铆模*R*角与底部受到过大的拉伸应力。增大铆接过程的压应力,能够在不改变材料延展率的情况下有效减少铸铝SPR开裂现象。

c. Sr合金元素可将粗糙的针状共晶Si优化为等轴状的Si相,有效减少应力集中,显著提高材料的伸长率和塑性变形能力,从材料层面减少铆接裂纹的形成。

d. 通过合理布置压铸流道与渣包、提高模具温度等优化措施,可确保铝液充分填充压铸模具,有效排除铝渣及卷入的气体,减少铸件内部气孔、冷隔等缺陷的形成,提高铸铝件的平均伸长率,增强材料抗塑性变形能力,进而降低铸铝自冲铆接过程中的裂纹形成倾向。

参考文献:

[1] 赵旭, 王平, 孙晶莹, 等. 压铸AlSi10MnMg铝合金中铸态缺陷分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(12): 1291-1293.

[2] 胡晓雅, 黄理, 陈秋任, 等. 铸铝自冲铆接接头裂纹扩展行为研究及仿真预测[J]. 锻压技术, 2023, 48(9): 113-118+141.

[3] 胡光山, 顾时茂, 贺丽丽, 等. 钢铝混合后地板总成的自冲铆连接性能研究[J]. 汽车工程学报, 2020, 10(3): 213-218.

[4] 汪学阳, 黄志垣, 廖仲杰, 等. 高真空压铸铝合金减震塔工艺开发及应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(8): 860-863.

AT&M