

大型铝镁合金法兰盘锻冲成形超声探伤缺陷分析及控制

王玉弟¹, 李保先¹, 刘 恒¹, 房 超², 亓效刚², 王广春²

(1. 山东瑞烨新能源装备有限公司, 山东 济南 250217; 2. 山东大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 针对大型 5083 铝镁合金法兰盘自由锻锻粗与冲孔成形过程中近内孔区域超声探伤出现的质量问题, 建立了锻粗后饼坯冲孔有限元分析模型, 模拟获得了冲孔过程法兰坯近内孔区域材料的流动规律, 分析得出, 法兰坯近内孔区域超声探伤质量缺陷为反面压平过程中近内孔区域材料流动存在径向分流所致。基于上述分析, 提出对现行的正向冲孔-反面压平-连皮冲除工艺流程中的反面压平工序进行调整, 即在反面压平工序中留存正向冲孔的冲子以约束近内孔区域材料的内流。进一步模拟表明, 改进后的冲孔工艺能够显著改善近内孔区域材料的流动状态, 规避了导致近内孔区域质量缺陷的径向分流不利因素。生产实际表明, 调整后的工艺方案使得大型法兰盘锻冲成形过程中近内孔区域缺陷问题得到了有效解决。

关键词: 铝合金法兰盘; 冲孔; 缺陷控制; 流动状态; 超声探伤

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.08.002

中图分类号: TG319

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 08-0011-06

Ultrasonic flaw detection analysis and control on a large-scale aluminum-magnesium alloy flange in upsetting and punching process

Wang Yudi¹, Li Baoxian¹, Liu Heng¹, Fang Chao², Qi Xiaogang², Wang Guangchun²

(1. Shandong Ruiye New Energy Equipment Co., Ltd., Jinan 250217, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Aiming at the quality problems of ultrasonic flaw detection in the area near inner hole during the upsetting and punching process of free forging for large-scale 5083 aluminum-magnesium alloy flange, a finite element analysis model for the punching billet after upsetting was established, and the punching process was simulated to obtain the flow law of the material in the area near inner hole of flange billet. Then, it is concluded that the ultrasonic flaw detection quality defect in the area near inner hole of flange billet was caused by the radial shunt of the material flow in the area near inner hole during the reverse flattening process. Furthermore, based on the above analysis, it was proposed to adjust the reverse flattening process in the current process flow of forward punching, reverse flattening and trimming, that is, to keep the punch of forward punching in the reverse flattening process to constrain the inflow of material in the area near inner hole. The further simulation results show that the improved punching process can significantly improve the flow state of material in the area near inner hole and avoid the unfavorable factors of radial shunt that lead to the quality defects in the area near inner hole. The actual production shows that the adjusted process scheme effectively solves the problems of defects in the area near inner hole during the upsetting and punching process of large-scale flange.

Key words: aluminum alloy flange; punching; defect control; flow status; ultrasonic flaw detection

法兰盘是电力、化工、航空航天、机械等领域广泛使用的轴管连接件。在装备轻量化及节能减排等需求背景下, “以铝代钢” 成为当前法兰盘发展

的趋势之一。相对于传统的锻钢法兰盘, 铝合金法兰盘具有质量轻、导电率高且耐腐蚀性好、可重复利用等诸多优势。法兰的生产方式有多种, 如机加工、铸造、锻造等。传统的机加工方式简单易行, 但材料利用率低, 且机加工切断了材料纤维流线, 降低了产品力学性能尤其是耐腐蚀和抗疲劳性能; 铸造法生产的法兰容易产生缩孔缩松等缺陷, 尤其是在最后凝固的厚大部位的铸造缺陷更加明显, 从而使综合力学性能严重下降, 且气密性不足。目前, 锻造法已逐渐取代铸造法成为制造高性能铝合金法兰

收稿日期: 2022-10-31; 修订日期: 2023-01-28

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目 (2022TSGC2122)

作者简介: 王玉弟 (1969-), 男, 硕士, 高工

E-mail: wangyujn@126.com

通信作者: 王广春 (1966-), 男, 博士, 教授

E-mail: wgc@sdu.edu.cn

盘的常用方法。锻造过程中的塑性变形能够在一定程度上消除铸造缺陷、细化晶粒并产生有益的流线组织,从而提高铝合金法兰产品的综合力学性能。

相比于碳钢锻件,铝合金锻件的成形难度较大,锻造工序多,缺陷类型也较多,且来源不一,如各类型夹杂、氧化膜等缺陷来源于原材料缺陷的遗留,粗晶和裂纹等缺陷来源于锻造过程中不合理的工艺条件,过烧等缺陷来源于热处理过程中不合理的温度和时间控制等^[1]。对于锻件内部缺陷,一般借助无损探伤、光学显微镜、扫描电镜、能谱分析等测试手段来探明锻件缺陷类型及其产生的原因^[2]。其中,超声波探伤是对铝合金锻件进行无损检测以保证锻件产品内部质量及进行验收的最有效检测手段^[3-4]。目前,铝合金锻件模锻成形工艺研究较多,针对不同形状结构的铝合金锻件,进行了相应的工艺参数与模具结构设计与分析^[5-6]。陈增奎等^[7]通过一模多件替代原自由锻工艺,对铝合金支撑接头精密模锻成形技术进行了研究,大幅提升了生产效率和产品性能。王小松等^[8]对大径厚比非对称铝合金弯管充液弯曲成形过程中的起皱现象进行了分析研究,并给出了解决措施。关于法兰盘成形工艺的研究,学者们结合企业生产条件进行了相应的成形工艺设计及分析工作。梁利霞^[9]针对某一 6A02 铝合金 H 形法兰进行了等温闭式模锻工艺分析开发及自加热模具结构设计,保证了铝合金成形工艺的稳定性,并实现了产品批量生产。王超^[10]也开展了 6A02 铝合金法兰盘等温塑性成形工艺研究,通过控温、降低模锻成形力等,保障了法兰盘成形质量和形状尺寸精度。Al-Mg 系铝合金,因具有良好的综

合力学性能、抗蚀性和可焊性能等,在法兰盘锻件上得到了重要应用。林高用等^[11]对 5083 铝镁合金高颈法兰进行了开式锻造过程的数值模拟,优化了管坯形状尺寸和模具结构。此外,刘旭等^[12]对 5083 铝镁合金搅拌摩擦焊接头的腐蚀行为和力学性能进行了研究。综上所述,目前关于铝合金法兰盘的研究主要集中在成形工艺分析方面,对于小规格的法兰锻件,也进行了模锻成形模具结构与开发研究。对于大规格法兰盘自由锻成形中的质量缺陷及控制问题的研究却鲜有报道。

本文针对某一系列大规格 5083 铝镁合金法兰盘在自由锻成形过程中近内孔区域超声探伤出现的质量问题展开研究,通过对棒坯镦粗-冲孔过程进行建模与有限元分析,探究了冲孔过程中法兰盘环坯近内孔区域材料的流动规律及成形质量缺陷原因,为工艺改进提供了科学指导。

1 法兰盘镦冲工艺

图 1 为某一大规格 5083 铝镁合金法兰盘,其径厚比较大,内孔相对外径较小,壁厚较大。该形状规格的法兰盘一般采用如图 2 所示的自由锻镦粗冲孔工序流程进行制造(图 2 中箭头为上模下行加载方向)。冲孔过程现场如图 3 所示。

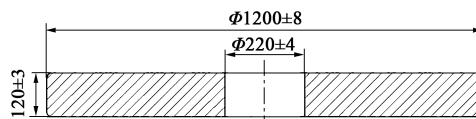


图 1 某一大规格 5083 铝镁合金法兰盘
Fig. 1 A large-scale 5083 Al-Mg alloy flange

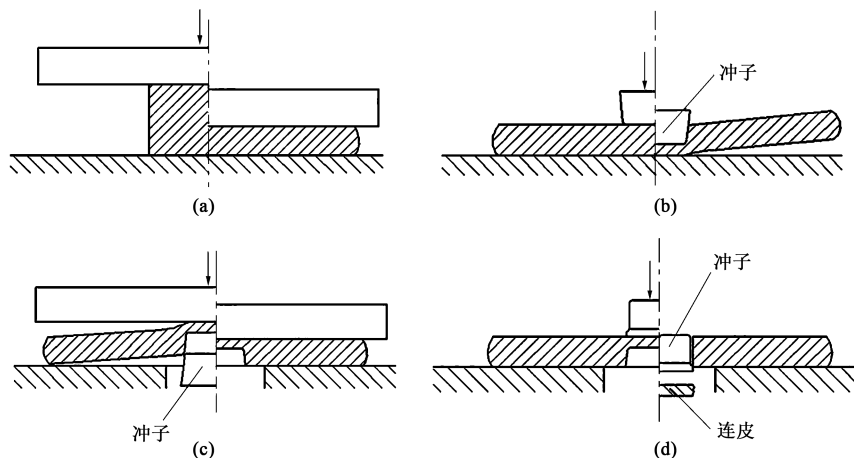


图 2 法兰盘镦冲工艺流程

(a) 镦粗 (b) 正向冲孔 (c) 反面压平 (d) 冲连皮

Fig. 2 Flow of upsetting and punching process for flange

(a) Upsetting (b) Forward punching (c) Reverse flattening (d) Punching wad

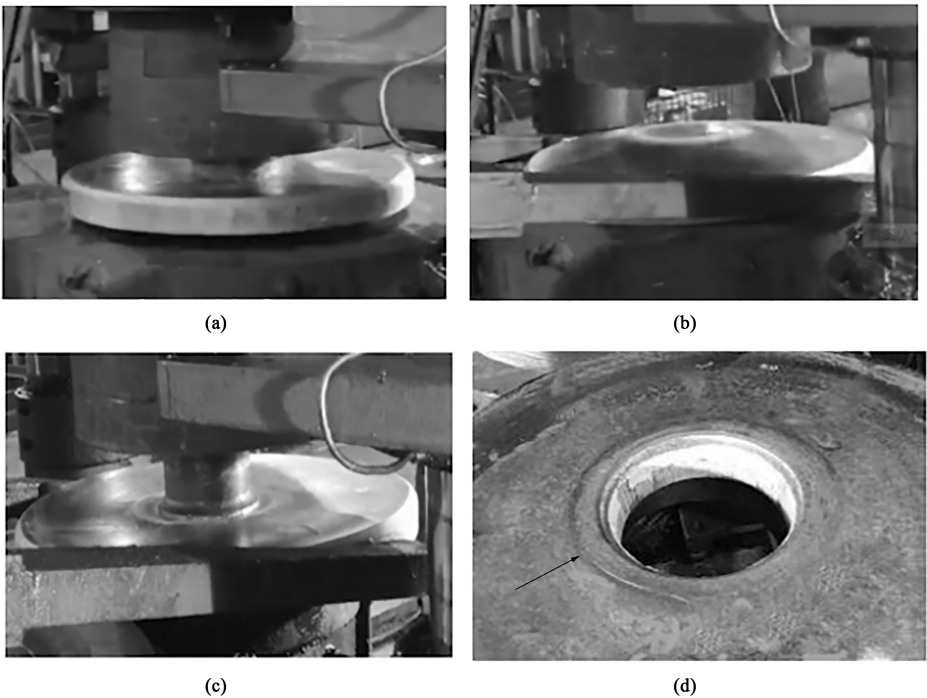


图 3 法兰盘现场生产冲孔过程

(a) 正向冲孔 (b) 反面压平 (c) 冲连皮 (d) 法兰盘锻件

Fig. 3 Punching process of flange during on-site production

(a) Forward punching (b) Reverse flattening (c) Punching wad (d) Flange forgings

从图 2 和图 3 可以看出，正向冲孔过程顺畅，随着冲子压入，冲子外侧区域材料上行带动饼坯外盘上升脱离砧座，饼坯正向冲孔后，其上面外形为草帽状，底部外形为飞碟状，如图 2b 和图 3a 所示。为便于完成最终的冲孔过程，需要将坯料翻转后进行压平，如图 2c 和图 3b 所示。饼坯反面压平后再用冲子将正向冲孔的连皮冲掉，得到法兰盘锻件，如图 2d 和图 3c、图 3d 所示。

铆冲成形的法兰盘锻件去除余量加工成法兰盘产品时，经超声探伤检测，发现在近内孔区域约 30~50 mm 处，即图 3d 中箭头所指的环形区域存在密集缺陷，超声波形态如图 4 所示，图 4 中横坐标为所探伤法兰盘产品在厚度方向上的深度，纵坐标为波形高度即探伤缺陷程度，可见在近内孔区域，该法兰盘不同深度位置均存在程度较大的探伤缺陷。其中，深度为 25 mm 左右时（图 4 中小框区域），缺陷程度相对较大，分析认为该区域内部密集缺陷为微裂纹或组织疏松，缺陷草状回波定量标定结果（图 4 中大框区域）表明最大尺寸达到 $\Phi 0.75$ mm。

2 法兰盘冲孔过程有限元分析

针对上述 5083 铝镁合金法兰盘产品在近内孔区

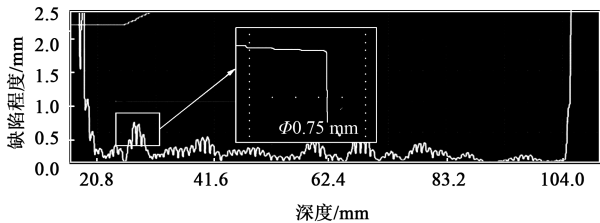


图 4 法兰盘缺陷超声波探伤结果

Fig. 4 Ultrasonic flow detection result of flange defect

域出现的超声探伤缺陷问题，以实际生产中铆粗后饼坯的冲孔工艺参数为基础，建立相应模型，进行有限元模拟分析，探究导致法兰盘产品近内孔区域超声探伤缺陷的成因。

2.1 模拟参数与模型建立

鉴于该铝镁合金法兰饼坯的简单轴对称结构，采用 Deform-2D 软件进行模拟。将饼坯视为塑性体，冲子与下平砧视为刚体，饼坯与模具之间的摩擦类型选用剪切摩擦，摩擦因数取值为 0.4，坯料与模具之间的热传导率取值为 $11 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。冲子的下行速度为 $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。模型及模拟参数如表 1 所示。正冲模拟时，冲子下行至连皮厚度为 25 mm 时停止，该厚度与实际正冲结束时的连皮厚度一致。

表 1 冲孔工艺模拟参数

Table 1 Simulation parameters of punching process

参数	数值
饼坯直径 D/mm	$\Phi 1200$
饼坯厚度 h/mm	120
冲子底面直径 d/mm	$\Phi 220$
冲子斜锥角/ $^{\circ}$	10
饼坯初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	370
模具温度/ $^{\circ}\text{C}$	300

2.2 模拟结果分析

图 5 为冲孔过程中饼坯在不同工步时的温度分布云图，其中，方框代表场量的最大值位置，三角代表场量的最小值位置，下文同理。因饼坯冲孔区域底部与冲子及下平砧在冲孔过程中一直保持接触，热量损失较多，温降比较明显，连皮区域整体温度下降至 340 ℃ 左右，如图 5a 所示。反面压平结束时，坯料近内孔区域温度继续降低，如图 5b 所示，温降区域扩大，尤其是在反面的表面，温降较多。

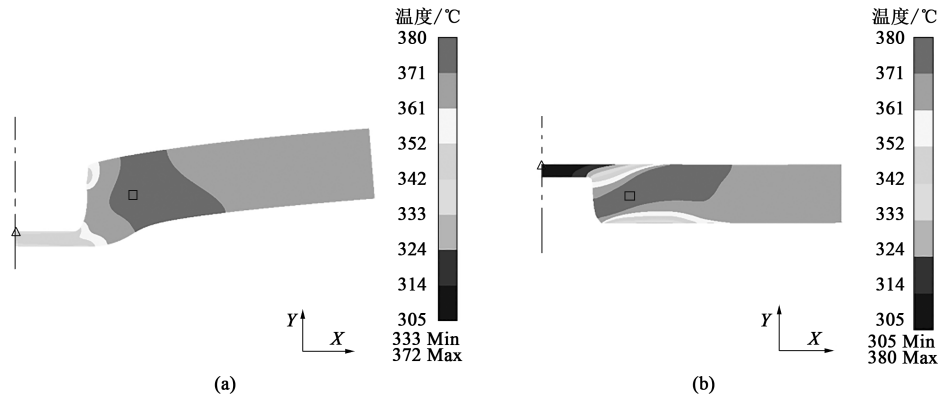


图 5 冲孔过程中不同工步时饼坯的温度分布

(a) 正向冲孔结束 (b) 反面压平结束

Fig. 5 Temperature distributions of plate billet at different steps during punching process

(a) End of forward punching (b) End of reverse flattening

图 6 为反面压平后期金属材料流动速度场分布云图。从图 6a 可以看出，在反面压平后期近内孔区域的材料径向流动存在分流面，即分流面内侧材料径向向内流动，外侧材料径向向外流动。该分流面处的材料在径向分流流动过程中如果厚度方向材料补充不充分，便会在此区域拉空为疏松的孔隙；而

在反面压平结束时，这种材料径向流动相反方向的现象更加严重，如图 6b 所示。造成这种现象的原因：反面压平时，正向冲孔近内孔区域材料向内收缩流动，造成近内孔区域存在径向流动分流面，即该分流面内材料向内流动，分流面外材料向外流动。这样在分流面区域即会产生拉伸变形，材料缩口凸

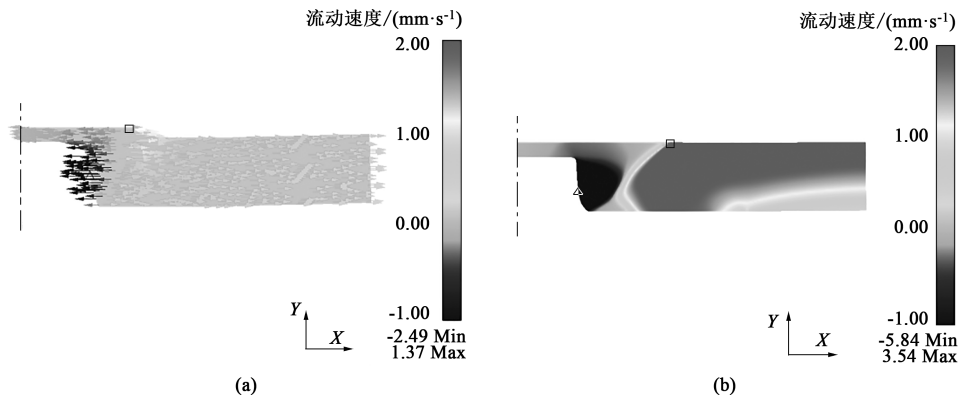


图 6 反面压平后期材料的流动速度场

(a) 矢量图 (b) 云图

Fig. 6 Material flow velocity field in later stage of reverse flattening

(a) Vector image (b) Cloud image

出部分的材料受上、下模的挤压,受拉沿径向向内流动,外侧区域的材料向外流动。拉伸变形在温度相对较低时,容易导致微观裂纹产生或原铸态组织中疏松孔隙的拉长。从模拟获得的流动分流面位置及锻件超声探伤缺陷位置的一致性可以判断,镦冲法兰盘锻件近内孔区域超声探伤质量缺陷是冲孔过程中反面压平时近内孔区域的材料向内流动所致。

3 法兰盘冲孔工艺改进

通过冲孔过程材料分析,探明了冲孔过程中内孔收缩变形是造成法兰坯近内孔区域质量缺陷的主要因素。为此,提出反面压平过程中保留正向冲孔冲子对冲孔工艺进行改进,减小正向冲孔冲子锥度,

使之在反面压平时保留在饼坯内孔中以约束材料内流,从而调控近内孔区域的材料流动状态,规避因分流导致的流动分流面发生的材料拉伤缺陷。图7为改进前后反面压平结束时近内孔区域的等效应变分布,规律较为相近。图8为改进冲孔工艺方案中反面压平时材料流动速度场与改进前的对比。从图8a可以看出,将冲子留在饼坯内进行反面压平后,中心内孔附近材料的分流面与原工艺相比明显左移且近内孔区域的材料因孔内冲子的约束向内流动的速度场接近于0,向内流动的速度场最大值为 $0.25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (图8a中三角形处)。图8b为改进前的近内孔区域反面压平时的速度场,明显看出,在近内孔区域存在径向分流面,且向内流动速度最大值为 $5.37 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,显著高出冲子约束压平的内流速度最大值 $0.25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

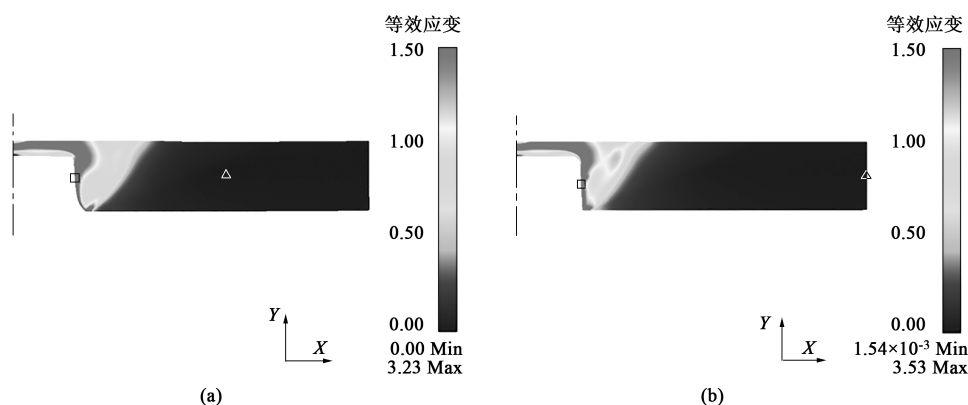


图7 不同冲孔工艺反面压平结束时等效应变分布云图

(a) 改进前 (b) 改进后

Fig. 7 Equivalent strain distribution cloud diagrams at end of reverse flattening for different punching processes

(a) Before improvement (b) After improvement

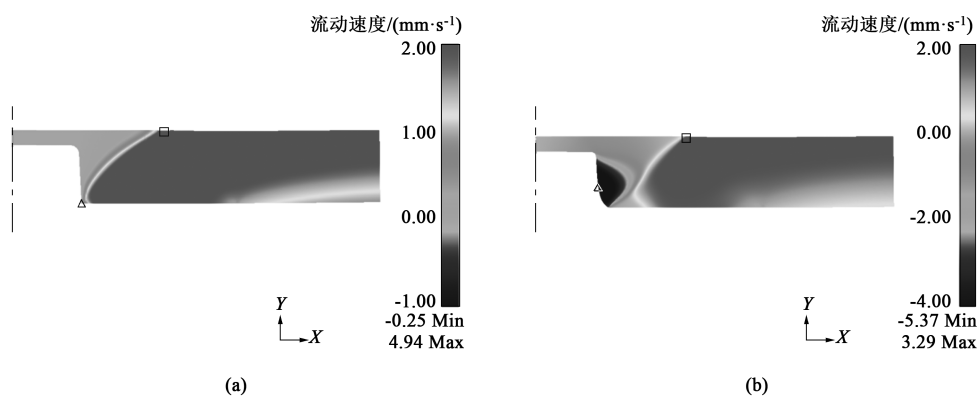


图8 不同冲孔工艺反面压平结束时材料流动速度场

(a) 改进后 (b) 改进前

Fig. 8 Material flow velocity fields at end of reverse flattening for different punching processes

(a) After improvement (b) Before improvement

采用本文提出的反面压平过程中原正向冲孔冲子留存在内孔中的改进措施,进行了现场工艺实施,并对改进冲孔工艺的法兰盘锻件进行了同样的超声检测,检测获得的超声波形如图 9 所示,与图 4 对比可见,未探及明显的缺陷波形,表明原近内孔区域成形缺陷得到了较好控制,成形质量完好。

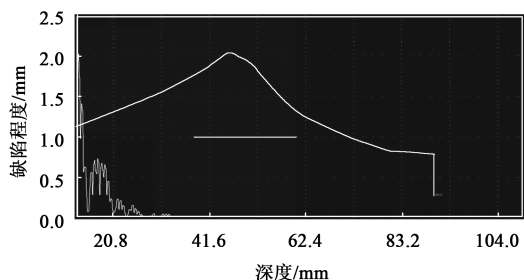


图 9 改进后法兰盘超声波探伤结果

Fig. 9 Ultrasonic flaw detection result of flange after improvement

4 结论

(1) 根据某一大规格 5083 铝镁合金法兰盘锻造成形工艺流程,建立了法兰盘冲孔工艺有限元模型,对正向冲孔-反面压平工艺过程进行了模拟分析,发现反面压平过程中,材料向内孔区域流动使近内孔区域出现的径向流动分流面是近内孔区域内部超声探伤质量缺陷产生的原因。

(2) 针对法兰盘近内孔区域探伤缺陷的成因,提出在反面压平过程中将正向冲孔时的冲子保留在饼坯内的工艺方案,通过冲子约束近内孔区域材料内流,以规避近内孔区域在反面压平时出现径向流动分流面,从而达到消除原工艺成形时法兰出现的锻件缺陷。

(3) 模拟结果表明,改进方案较好地抑制了法兰盘反面压平中近内孔区域材料的内流现象,生产实践表明,改进方案较好地解决了某一型号大规格 5083 铝镁合金法兰盘原自由锻成形工艺中出现的超声探伤缺陷问题。

参考文献:

[1] 冯扬明,黎家行,何梅琼,等. 铝合金锻件的主要缺陷分析与质量控制 [J]. 铝加工, 2021, 44 (4): 11-14.
Feng Y M, Li J X, He M Q, et al. Main defect analysis and quality of aluminum alloy forgings [J]. Aluminium Fabrication, 2021, 44 (4): 11-14.

[2] 程思梦,林海涛,温庆红,等. 7B04 铝合金锻件探伤缺陷研究 [J]. 铝加工, 2021, 44 (5): 51-54.
Cheng S M, Lin H T, Wen Q H, et al. Study on flaw detection of

7B04 aluminum alloy forgings [J]. Aluminium Fabrication, 2021, 44 (5): 51-54.

[3] GB/T 6519—2013, 变形铝、镁合金产品超声波检验方法 [S].
GB/T 6519—2013, Ultrasonic inspection of wrought aluminium and magnesium alloy products [S].

[4] 程辉,张晓霞,奚刚,等. 大规格铝合金锻件超声波纵波探伤缺陷判定方法 [J]. 科技创新与应用, 2013, (24): 40.
Cheng H, Zhang X X, Xi G, et al. Determination method of ultrasonic longitudinal wave flaw detection for large aluminum alloy forgings [J]. Technology Innovation and Application, 2013, (24): 40.

[5] 王孟君,彭大暑,易德辉. 铝合金模锻成形 [J]. 铝加工, 1998, 21 (3): 30-33.
Wang M J, Peng D S, Yi D H. Die forging of aluminum alloy forgings [J]. Aluminium Fabrication, 1998, 21 (3): 30-33.

[6] 王东亚,侯旭,马臣,等. 铝合金轮毂模锻成形仿真模拟优化分析 [J]. 锻造与冲压, 2021, (3): 25-28.
Wang D Y, Hou X, Ma C, et al. Numerical simulation and optimization of die forging process of Al-alloy wheel hub [J]. Forging & Metalforming, 2021, (3): 25-28.

[7] 陈增奎,张浩,方泽平,等. 7A04 铝合金支撑接头精密模锻成形技术研究 [J]. 航天制造技术, 2016, (2): 1-3, 61.
Chen Z K, Zhang H, Fang Z P, et al. Study on precision forging process of 7A04 aluminum alloy support joint [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2016, (2): 1-3, 61.

[8] 王小松,刘峻岐,傅孟春,等. 大径厚比非对称 5083 铝合金弯管充液弯曲成形 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 36-43.
Wang X S, Liu J Q, Fu M C, et al. Hydro-bending of asymmetric 5083 aluminum alloy bent tube with large diameter-thickness ratio [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 36-43.

[9] 梁利霞. 6A02 铝合金法兰锻件等温模锻工艺与模具 [J]. 机械工程与自动化, 2018, (4): 142-143.
Liang L X. Isothermal die forging process and dies for 6A02 aluminum alloy flange forgings [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2018, (4): 142-143.

[10] 王超. 铝合金法兰盘成形工艺及模具设计 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (13): 199-200.
Wang C. Forming process and die design of aluminium alloy flange [J]. Hot Working Technology, 2011, 40 (13): 199-200.

[11] 林高用,冯迪,孙利平. 5083 铝合金法兰盘锻造过程的数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2008, 37 (13): 54-58.
Lin G Y, Feng D, Sun L P. Numerical simulation of forging process for 5083 aluminum alloy flange [J]. Hot Working Technology, 2008, 37 (13): 54-58.

[12] 刘旭,贾瑞灵,张慧霞,等. 轴肩直径对 5083 铝合金 FSW 接头腐蚀行为和力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (8): 1006-1012.
Liu X, Jia R L, Zhang H X, et al. Corrosion behavior and mechanical properties of FSW joint for 5083 aluminum alloy with different shaft shoulder diameters [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (8): 1006-1012.