

同/异种合金焊接接头旋压成形研究现状及展望

贾震^{1,2}, 包惠莉^{1,2}, 孙泽霖^{1,2}, 文彦臻^{1,2}, 徐逸非²

(1. 沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 辽宁 沈阳 110136;

2. 沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 针对同/异种合金焊接接头的旋压成形是制造航空航天零件的重要加工方式, 主要综述了近年来国内外同/异种合金焊接接头旋压成形的研究进展, 总结了同种合金焊接接头的旋压成形的工艺过程和微观组织演化规律, 探究了不同工艺参数条件对成形的影响。结果表明: 对于同种合金, 先焊接后旋压有助于降低焊接接头组织的不均匀性, 在一定程度上提高焊接接头的力学性能, 降低后续成形难度; 通过分析旋压变形力的作用方向和对微观组织的作用机理能够有效地解释缺陷产生机理, 从而提高成形性能; 如何制备异种合金坯料并形成出高精度的异种合金拼焊构件, 以及在旋压过程中焊接接头的显微组织和力学性能的演化有待深入研究。

关键词: 同/异种合金; 旋压; 焊接接头; 微观组织; 力学性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.002

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 01-0017-07

Research status and prospect on spinning for welded joint of the same/dissimilar alloys

Jia Zhen^{1,2}, Bao Huili^{1,2}, Sun Zelin^{1,2}, Wen Yanzhen^{1,2}, Xu Yifei²

(1. Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Key Lab of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Spinning for welded joints of the same/dissimilar alloys is an important processing method for the manufacture of aerospace parts. Therefore, the research prospect of spinning for welded joints of the same/dissimilar alloy at home and abroad in recent years were mainly reviewed, the process of spinning for welded joints of the same alloy and the evolution laws of microstructure were summarized, and the influences of different process parameters on forming were explored. The results show that for the same alloy, the process of welding first and then spinning is helpful to reduce the structure inhomogeneity of the welded joints, the mechanical properties of the welded joints are improved to a certain extent, and the difficulty of subsequent forming is reduced. Through analyzing the direction of the spinning deformation force and the mechanisms of action on the microstructure, the defect generation mechanism can be explained effectively, and the forming performance is improved. However, how to prepare blanks of the dissimilar alloy and form high-precision tailor-welded components of the dissimilar alloys and the evolution of the microstructure and mechanical properties for the welded joints in the spinning process needs to be further studied.

Key words: the same/dissimilar alloys; spinning; welded joint; microstructure; mechanical properties

旋压是一种实现无切削近净成形的先进塑性成形方法, 用于回转体薄壁构件的成形, 并在旋压过程中起到改善工件组织性能的作用^[1-2], 在一些难变形合金的加工中其应用十分广泛。针对镁合金室温下塑性加工性能差、旋压时会产生严重硬化等问题, 一些学者通过有限元模拟和实验的方式进行了

相应的旋压成形, 通过改变润滑形式、温度条件以及旋轮转速和进给率等工艺参数进行成形效果对比, 从而完成参数优化, 得到成形良好的旋压件^[3-6]。一些学者分析了钛合金在旋压过程中的缺陷成因, 并且采用改变旋压形式和减薄率等工艺参数的方式来避免成形中产生的严重回弹和开裂缺陷^[7-10], 后续对于钛合金的提塑方法和机理的研究仍是钛合金旋压技术的关键所在。针对不锈钢合金的筒形件和锥形件, 大多采用多道次冷旋加中间退火的旋压工艺, 工序复杂不易操作。一些学者研究应用了滚珠旋压进行高精度管的成形和采用热强旋代替冷旋退火的方式,

收稿日期: 2021-01-21; 修订日期: 2021-04-15

基金项目: 航空科学基金资助项目 (2018ZE54028); 辽宁省自然科学基金资助项目 (2019ZD0240)

作者简介: 贾震 (1980-), 男, 博士, 副教授

E-mail: jjaz_2006@sina.com

通过建立有限元模型来掌握进给比和减薄率的参数范围,为不锈钢的旋压提供了理论依据^[11-13]。

随着航空航天领域的不断发展,要求航空装备尽可能地具有耗能少、运载能力强、使用寿命长等特点,若想满足上述要求,采用轻量化和高性能的构件是有效的途径。但一些坯料尺寸难以达到某些大型构件的制造要求,大直径筒坯也难以一体制造,采用板材焊接制坯再旋压可以解决这一问题。因此,研究同种合金焊接接头旋压成形的理论与技术既是航空航天等高端装备发展的迫切需求,也是塑性成形领域的研究前沿。

在对筒形件和板料同种合金焊接接头旋压成形的工艺过程和微观组织演化进行归纳和总结后,提出了对异种焊接接头进行旋压成形的设想,以期旋压件的功能多样化和轻量化拓展思路。

1 筒形件接头旋压成形

随着航空航天领域对构件轻量化的要求越来越

高,薄壁筒形件在航空航天装备上的应用也越来越多,制造筒形件的一些成形工艺对管坯的几何尺寸及成形性能要求也越来越苛刻。但是,总是存在坯料尺寸难以达到某些大型构件的制造要求的问题,或是大直径筒坯难以进行一体制造等问题,其制约了许多轻量化制造技术的发展,因此,通常用板材卷焊再进行旋压作为制作薄壁筒形件的成形方法。

1.1 内高压成形制坯

苑世剑团队^[14-15]采用 2024 铝合金管材 FSW-旋压复合成形新方法制备薄壁筒形坯料,用于后续的内高压成形。研究总结了制备过程中材料的微观组织以及力学性能的变化规律,为塑性成形的预制坯料方法提供了新思路。

1.1.1 工艺过程

设计了如图 1 所示的工序用于管材的制备^[14-15],选取铝合金板材对其进行卷焊,将焊管滚圆后进行变薄旋压,成功地得到了可用于后续内高压成形的薄壁铝合金管材,解决了大直径管坯制备的难题。

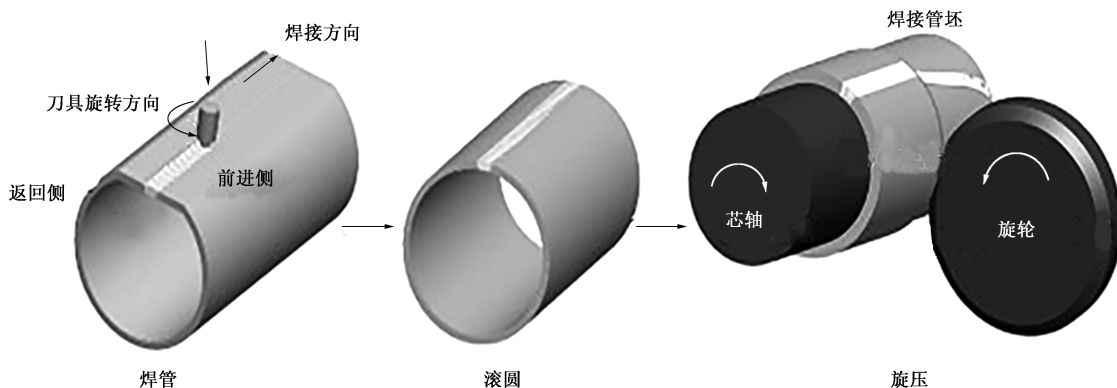


图 1 薄壁铝合金管材复合制造新方法

Fig. 1 New method for composite manufacturing of thin-wall aluminum alloy tube

1.1.2 旋压对微观组织的影响

对搅拌摩擦焊后制成的管坯进行变薄旋压的对比实验^[14-15],确定了成形温度为 200 ℃、减薄率为 20% 为最佳工艺条件。温度过低或过高均会导致焊缝开裂以及管坯失稳隆起,单次减薄率过大则会在旋轮前端产生材料堆积隆起的现象,图 2 和图 3 为不同工艺条件下的失效形式。

对比旋压前后母材和焊缝的平均晶粒尺寸可以看出,旋压减薄率对 FSW 管材焊缝微观组织的影响并不大,但对于 FSW 管材的母材而言,旋压细化晶粒的效果明显。这极大地缩小了母材与焊缝之间的组织差异,增强了接头的力学

性能。

由以上研究可以看出,利用焊接-旋压制坯能解决大直径筒坯无法一体制造的问题,与其他加工方法相比,旋压能很好地将焊接造成的接头组织不均匀性降低到最小,使薄壁筒坯的组织接近均匀,为之后复杂的成形加工降低了难度。

1.2 锯齿槽旋压制坯

1.2.1 工艺过程

Jia Z 等^[16]针对高温合金的焊接预制坯采用了内旋压的工艺方法来进行锯齿形沟槽的加工,图 4 为锯齿槽的旋压装配图和旋压件的壁厚分布,图 4b 中数字表示相应位置的壁厚,如 1.565 表示此处的



(a)



(b)

图2 不同旋压温度下FSW管坯的失效形式

(a) 室温冷旋 (b) 350 °C热旋

Fig.2 Failure types of FSW tube blanks different at spinning temperatures

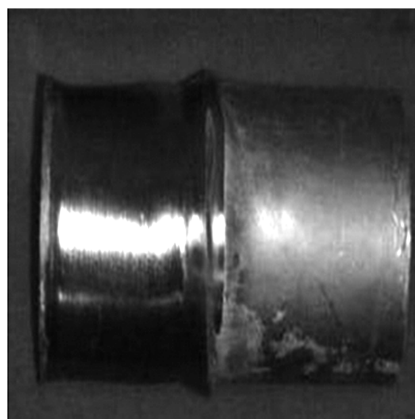
(a) Cold spinning at room temperature (b) Hot spinning at 350 °C

壁厚为 1.565 mm。采用具有锯齿形状的仿形旋轮，可以极大地简化原本复杂的锯齿槽波浪形旋轮路径，并且还可以很好地控制内旋压的形状和壁厚。根据工件的微观结构与宏观力学性能的密切关系，通过旋压在高温合金管上形成锯齿形凹槽，研究了锯齿形凹槽的变形行为和微观结构特征，对旋压后的显微硬度和微观组织进行了分析。

1.2.2 旋压对微观组织的影响

通过对焊接接头以及接头外区微观组织的观测，经过内旋压后的焊接接头的晶粒明显细化，改善了因焊接后母材和焊缝物性差异大而引起的应力集中。

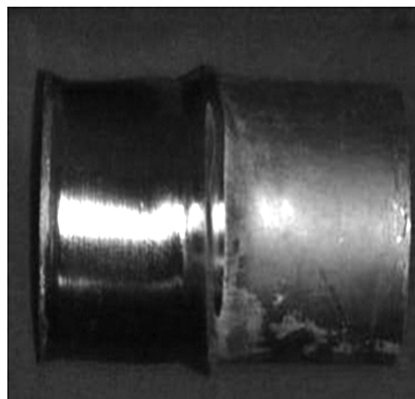
对于同种合金焊接接头的筒形件来说，通过旋压这一工序将焊接接头处焊缝与母材的差异化减小，有效地增强了筒形件接头的力学性能。无论是利用旋压直接成形还是为后续的加工工艺制坯，均能令成形难度大大降低。



(a)



(b)



(c)

图3 200 °C热旋时不同减薄率下的FSW管坯

(a) 减薄率为35% (b) 减薄率为30% (c) 减薄率为25%

Fig.3 FSW tube blanks after hot spinning at 200 °C with different thinning rates

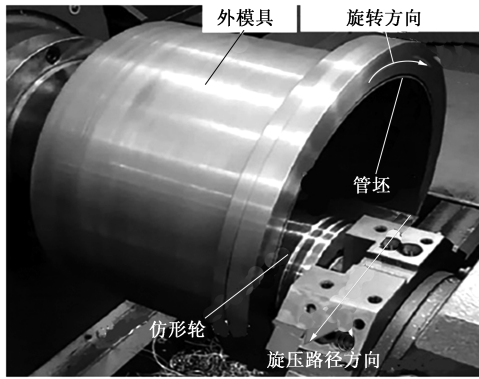
(a) Thinning rate of 35% (b) Thinning rate of 30%

(c) Thinning rate of 25%

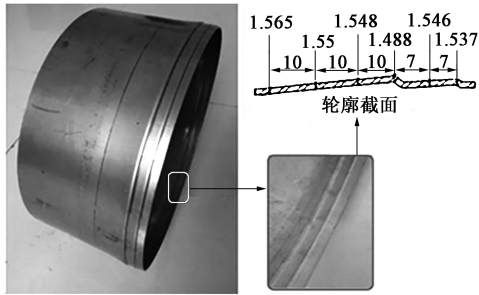
2 板料接头旋压成形

2.1 拼焊板旋压成形

封头等大型薄壁构件的成形需要采用拼焊板作



(a)



(b)

图 4 锯齿槽旋压成形

(a) 锯齿形沟槽旋压机装配图 (b) 旋压件及其壁厚分布

Fig. 4 Spinning of serrated groove

(a) Assembly diagram of spinning machine for serrated groove

(b) Spun part and distribution of its wall thickness

为板坯来进行后续加工,可以保证成形质量,减少额外的加工工序,因此,詹梅团队^[17-18]针对其成形过程进行了相关研究。

2.1.1 模拟过程

詹梅团队^[17-18]利用有限元模拟软件,综合拼焊板成形过程以及目标构件外形等方面,建立了旋压成形有限元模型(图5)。针对2219铝合金拼焊板成形旋轮轨迹等建模难点进行逐步解决。将整个旋

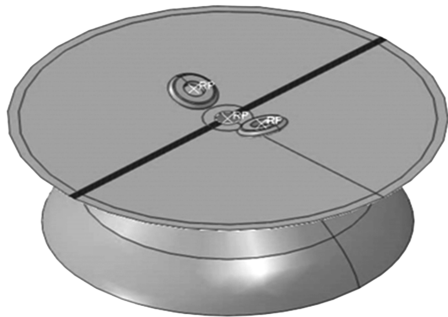


图 5 拼焊板旋压成形薄壁异形曲面构件有限元模型

Fig. 5 Finite element model of spinning thin-walled special-shaped curved components for tailor welded plate

压过程模拟完成得到的试件与实际加工的试件进行相互对比,从而确定了实验模型的准确性与可靠性。

2.1.2 旋压成形过程

在进行薄壁异形曲面构件的实际旋压加工过程中,由于拼焊板在收口贴模的过程中产生的变形量很大,因此,需要注意凸缘起皱等缺陷问题。詹梅团队^[17-18]利用强旋与普旋相结合的方式避免易起皱的一次贴模成形,成形轨迹如图6所示,其中①~⑤代表多道次的旋压轨迹, o 为坐标原点, x 、 y 轴分别表示旋压件的半径和锥高, x_0 为第1道次旋压后的工件半径, α_0 、 α_1 分别为工件的锥段和椭球段两部分与旋轮的切角。同时,优化了旋压设计方案,完成了该薄壁异形曲面构件的加工,并与有限元模拟相结合,为拼焊板后续的成形研究打下了基础,提供了理论依据,使其向更深层次的研究发展。

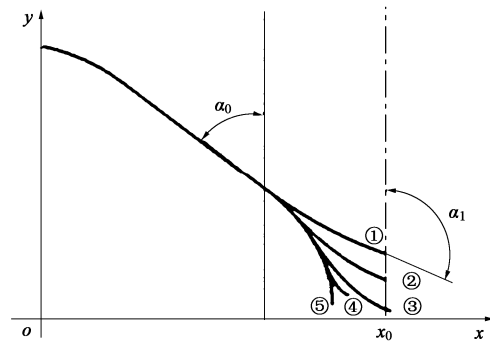


图 6 拼焊板旋压成形薄壁异形曲面构件渐进贴模成形轨迹

Fig. 6 Progressive forming trajectories of closing up to punch in spinning of thin-walled special-shaped curved components for tailor welded plate

2.2 大型封头的旋压成形

ЮИ К^[19]研究了采用焊接板料进行大型封头的旋压过程中产生的不均匀变形,利用网格法分析了板坯焊缝在封头旋压过程中对板坯表面不均匀性的影响,结果表明,减小焊缝与轧制方向的角度可以使不均匀变形减小。石岩等^[20]规划了如图7所示的大直径复合钢板封头的旋压成形工艺,其中, D_{cp} 为封头中性层直径, R_{cp} 为球拱段中性层曲率半径, r_{cp} 为过渡区中性层曲率半径, h_{cp} 为中性层曲面高度, h 为直边高度, α 为球拱段半角, β 为过渡区夹角。同时,通过以上参数确定了焊接和旋压等工艺参数,并优化了冷旋压工艺,研究了影响复合钢板封头成形质量的主要因素。以上研究主要侧重于成形过程中的宏观分析,缺少微观组织的观测和分析。

谢晓芳等^[21]研究了拼接冷旋成形后的不锈钢封头上的焊缝裂纹的产生原因,图8为焊接时的坡口

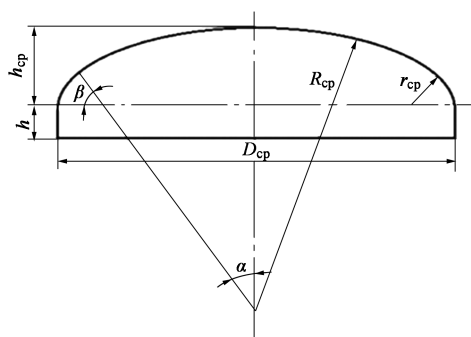


图7 封头尺寸示意图

Fig. 7 Schematic diagram of shell sizes

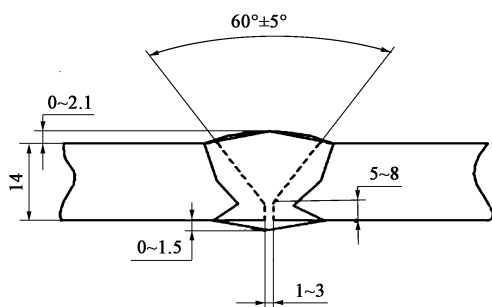


图8 焊接坡口形式

Fig. 8 Welding groove form

形式。通过对图9所示的冷旋压后的焊缝微观组织的观测可知,塑性变形过大而产生的马氏体组织会加剧焊缝裂纹的产生。

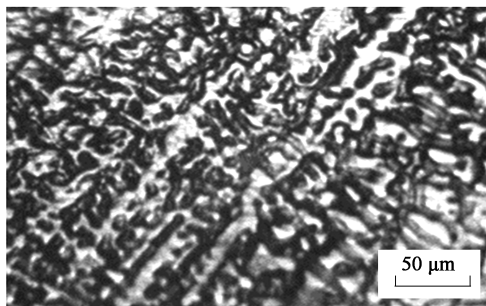


图9 焊缝金相图

Fig. 9 Metallographic diagram of weld

赵晖^[22]研究了旋压成形时铁素体不锈钢焊管的失效形式,对焊管断口形貌和金相组织进行观测、失效分析并对加工工艺进行了优化,以降低焊缝开裂。以上学者的研究补充了对微观组织的观测,将微观与宏观结合,可以更充分地对接头成形过程进行分析,但未对接头的受力形式进行定性推导。

ЮИ К^[19]经过研究认为,焊缝与轧制方向角度对接头成形均匀性起到了很大的作用,减小该角度可以使成形更加均匀,提高成形几率。石岩等^[20]则采取改变成形轮参数等方式,以优化旋压工艺,从而提

高成形质量。谢晓芳等^[21]针对加工过程中会产生冷旋裂纹这一问题(图10),采取了提高焊缝的力学性能以及控制旋压变形量等有效方法,以达到优化成形效果的目的。赵晖^[22]发现管件在进行旋压成形时,容易出现如图11所示的垂直于焊缝方向的裂纹。因为SUH409L铁素体不锈钢组织不会产生细化,晶粒会随着温度的升高而长大,在退火时温度或时间不当,母材的晶粒会变得不均匀,使得晶界结合严重脆弱。在旋压过程中使焊缝与母材组织的差异加剧,造成应力集中,焊缝和母材处产生撕裂。进行工艺优化,例如增加退火等阶段可以使接头组织更加均匀,也可以控制晶粒尺寸,降低开裂率,从而得到成形良好的工件。

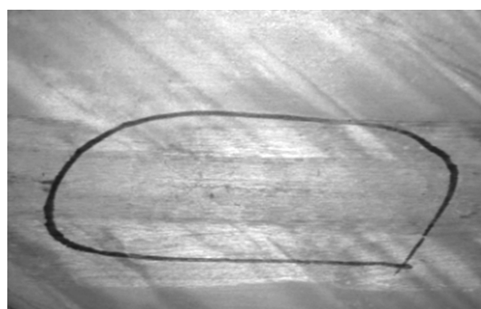


图10 拼接处的裂纹

Fig. 10 Crack at position of splice

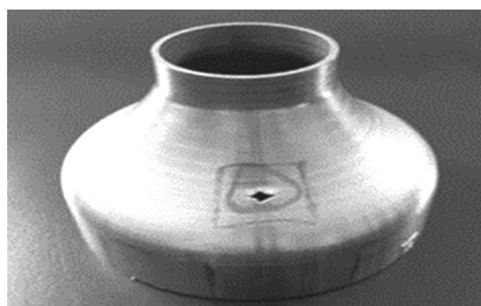


图11 旋压成形时焊缝产生的裂纹

Fig. 11 Cracks formed in welds during spinning

由以上研究发现,对微观组织进行观测和分析,可以在研究塑性成形的不均匀性方面起到重要的作用,同时分析旋压变形力的作用方向和对微观组织的作用机理,能更好地解释裂纹的产生机理,从而采取正确的方法来改善成形效果,提高成形性能。

3 异种合金焊接接头旋压成形

异种合金拼焊板是通过各种典型的焊接方法对钢材和轻质合金等材料进行加工,铝/镁和铝/钛等

异种合金焊接接头在目前的工业生产中占有很大比重,具有降低重量以及节约成本等优点,可以解决单一材料带来的成本以及加工技术方面的制约,充分发挥异种材料各自的性能优势,扩大材料的应用。许有肖等^[23]针对铝/镁异种合金的焊接特点和研究现状进行了阐述,指出异种合金焊接接头的焊接难点。钱芳等^[24]将异种镁合金拼焊板制成冲压件,探究了影响拼焊板冲压性能的因素。

因为镁合金与铝合金的应用具有广泛性和交叉性,因此,可能会出现同一个零件处于不同环境条件下或者同一零件不同部位具有不同承载要求的情况,这时就可以应用到铝/镁拼焊成形的壳体零件。这种零件既具有镁合金的强度大和耐腐蚀的优点,又迎合了轻量化的发展趋势,在局部有特殊要求又要满足轻量化的环境下具有很大优势。

目前,针对异种合金的冲压工艺还不是特别完善,需要在单一材料冲压的条件下对模具以及加工条件进行很大调整。随着航空航天技术的发展,对带有回转体特征的薄壁零件复合功能或属性的要求,以及经济、结构、功能互补性的需求会越来越多。例如,铝-镁焊接接头成形的薄壁件可用于局部需要耐腐蚀而整体有轻量化要求的工作环境;钢-钛焊接接头成形的薄壁件可用于仅局部允许磁导通的外罩等。旋压技术可针对不同材料的金属流动特征施加针对性的变形,因此,在此提出设想:将异种合金预先进行焊接连接制坯,再进行旋压成型的方法(对此还鲜有报道)。

由于异种合金焊接接头旋压坯料为两种不同种类的合金经过焊接后制成,不同种金属以及焊缝的流动性不一致,这就要求旋压变形路径与各部分流动性匹配。此外,旋压拉应力会使坯料薄弱处发生开裂,因此,对接头的强度和塑性均有较高要求。由于异种合金焊接接头旋压成形的难度明显增大,因此,制备可旋压性能强的异种合金坯料,成形出外形、尺寸精度符合要求的异种合金拼焊构件,并分析其显微组织和力学性能演化是未来旋压研究的重点方向。

4 结语

本文综述了筒形件以及板料焊接接头旋压成型技术的工艺过程,以及工艺参数对微观组织的影响等方面的研究进展,设想并提出了异种合金先焊接后旋压的加工方法。这对拓展塑性成型技术所需预

制备坯料来源,发展难变形材料的精确旋压成型技术,全面提高零件的高质量、低成本、短周期制造技术水平和能力具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王成和,刘克璋. 旋压技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 1986.
Wang C H, Liu K Z. Spinning Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1986.
- [2] Sun L Y, Xia Q X, Cheng X Q, et al. Influence of roller on tooth height of internal spline formed by spin-forming [J]. Key Engineering Materials, 2012, 522: 268-271.
- [3] 郝琳璐,赵春江,白磊,等. AZ91D 镁合金薄壁管高速滚珠旋压贴模特性数值模拟 [J]. 重型机械, 2014, (3): 14-17.
Hao L L, Zhao C J, Bai L, et al. A high-speed ball spinning film features numerical simulation of AZ91D magnesium alloy Thin-walled tube forming [J]. Heavy Machinery, 2014, (3): 14-17.
- [4] Wei L, Guan L, Lyu Q Y, et al. Research on multipass hot spinning process technology of AZ80 magnesium alloy shell [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, (5): 1-16.
- [5] Wang F H, Su P, Qin L X, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-3Al-Zn magnesium alloy sheet by hot shear spinning [J]. Acta Metallurgica Sinica: English Letters, 2020, 33 (9): 1226-1234.
- [6] Li L L, Cai Z Y, Xu H Q, et al. Research on AZ31 sheet one-pass hot spinning based on orthogonal experiment design [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75 (5-8): 897-907.
- [7] 詹梅,褚强,石丰,等. TA15 钛合金板材不贴模加热旋压成形规律研究 [J]. 精密成形工程, 2014, (5): 31-36.
Zhan M, Chu Q, Shi F, et al. Forming law of flexible hot spinning of TA15 titanium alloy [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, (5): 31-36.
- [8] Han D, Zhan M, Yang H. Deformation mechanism of TA15 shells in hot shear spinning under various load conditions [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42 (2): 243-248.
- [9] 赵小凯,徐文臣,陈宇,等. TA15 钛合金筒-锥复合曲母线构件旋压成形工艺研究 [J]. 材料科学与工艺, 2016, (4): 10-17.
Zhao X K, Xu W C, Chen Y, et al. Study on the spinning process of cylinder-conical composite curved generatrix workpiece of TA15 titanium alloy [J]. Materials Science and Technology, 2016, (4): 10-17.
- [10] Zhao X K, Xu W C, Chen Y, et al. Fabrication of curved generatrix workpiece of TA15 titanium alloy by variable thickness tube spinning and flaring process [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88 (5-8): 1983-1992.
- [11] 束学道,朱颖. 工艺参数对 5CrNiMo18 变截面锥形薄壁回转件强力旋压成形壁厚均匀性影响 [J]. 宁波大学学报:理工版, 2018, (1): 8-12.

- Shu X D, Zhu Y. Influence of process parameters on the wall thickness precision by power spinning of thin-walled conical part of 5CrNiMo18 with discontinuous wall thickness [J]. Journal of Ningbo University: Natural Science & Engineering Edition, 2018, (1): 8-12.
- [12] Jia Z, Li L, Han Z R, et al. Experimental study on wrinkle suppressing in multi-pass drawing spinning of 304 stainless steel cylinder [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100 (1-4): 111-116.
- [13] Ebrahimi S M, Akbari Mousavi S A A, Bayazidi M S, et al. Numerical study of the flow forming process of AISI 630 stainless steel [J]. Advanced Materials Research, 2011, 264-265: 24-29.
- [14] 胡志力. 2024 铝合金搅拌摩擦焊管材塑性变形行为研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Hu Z L. Research on the Plastic Deformation Behavior of Friction Stir Welded 2024 Aluminum Alloy Tube [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [15] Yuan S J, Hu Z L, Wang X S. Formability and microstructural stability of friction stir welded Al alloy tube during subsequent spinning and post weld heat treatment [J]. Materials Science & Engineering A, 2012, (15): 586-591.
- [16] Jia Z, Wang M, Han Z R, et al. Microstructure characteristics of serrated groove formed by inner spinning on the high temperature alloy tube [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, (5): 1401-1405.
- [17] 詹梅, 邢路, 高鹏飞, 等. 轻量化拼焊板构件塑性成形研究进展 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (5): 1-12.
- Zhan M, Xing L, Gao P F, et al. Advances in plastic forming of light-weight components with tailor welded plate [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11 (5): 1-12.
- [18] 雷新鹏. 2219 铝合金拼焊板旋压成形异型曲面规律与工艺设计研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- Lei X P. Research on Deformation Rules and Processing Design for the Spinning of Profiled Surface Component with Welded-blank [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.
- [19] ЮИ К. 旋压加工焊接板料封头时的变形 [J]. 模具技术, 1989, (6): 66-67.
- ЮИ К. Deformation of spinning head of welding plate [J]. Die and Mould Technology, 1989, (6): 66-67.
- [20] 石岩, 高书明, 王保兴. 大直径复合钢板封头的冷旋压成形 [J]. 中国化工装备, 2019, (6): 3-8.
- Shi Y, Gao S M, Wang B X. Cold spinning formation of large-diameter head of clad steel plates [J]. China Chemical Industry Equipment, 2019, (6): 3-8.
- [21] 谢晓芳, 张腾, 谢安. 冷旋压不锈钢封头拼接焊缝开裂的原因及防止措施 [J]. 化工装备技术, 2012, 33 (5): 9-11.
- Xie X F, Zhang T, Xie A. Cracking reasons and protecting measures for butt welding of cold spinning stainless steel head [J]. Chemical Equipment Technology, 2012, 33 (5): 9-11.
- [22] 赵晖. SUH409L 铁素体不锈钢焊管焊缝开裂分析与预防措施 [J]. 山西冶金, 2019, (6): 104-105.
- Zhao H. Cracking analysis and preventive measures of SUH409L ferritic stainless steel welded pipe [J]. Shanxi Metallurgy, 2019, (6): 104-105.
- [23] 许有肖, 李亚江, 王娟, 等. Mg/Al 异种金属焊接研究现状 [J]. 现代焊接, 2011, (6): 1-5.
- Xu Y X, Li Y J, Wang J, et al. Research status of Mg/Al dissimilar metal welding [J]. Modern Welding Technology, 2011, (6): 1-5.
- [24] 钱芳, 部占军, 蒯吉顺, 等. 拼焊板成形性能的研究现状 [J]. 内蒙古民族大学学报: 自然科学版, 2012, 27 (4): 423-425.
- Qian F, Bu Z J, Lin J S, et al. Research status on the forming performances of tailor-welded boards [J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities, 2012, 27 (4): 423-425.

