

管材成形

纯钛薄壁管端法兰扩口-镦粗复合成形工艺

郭世勇, 金骏豪, 张帆, 毛梦茹, 闫佳明, 关阳, 林鹏

(太原理工大学材料科学与工程学院, 山西太原 030024)

摘要:为解决管端法兰直接镦粗成形过程中易产生折叠缺陷的问题,以TA2纯钛管为原材料,提出了管端法兰扩口-镦粗复合成形新方法,并成功制备出纯钛薄壁管端法兰。采用实验和数值模拟方法研究了不同角度的扩口预变形对管端法兰镦粗过程中折叠缺陷形成位置及大小的影响规律,并对经20°和0°扩口变形的管端法兰在镦粗行程为50%时的径向流速分布进行了分析对比。结果表明:在数值模拟中,折叠区域的应变变量很大,其是由管壁挤压形成的折叠缺陷导致的;扩口预变形会使自由管端法兰镦粗时在内部产生弯矩,改变了纯钛的金属流动行为;折叠缺陷的深度随着扩口角度的增大而减小;相对于直接镦粗,先经20°扩口变形再镦粗成形的管端法兰,其折叠缺陷由内壁转移至上表面,且折叠缺陷的深度较小,后续机加工去除后不影响管端法兰的整体质量。

关键词:TA2纯钛;扩口-镦粗复合成形工艺;管端法兰;闭式镦粗;折叠转移

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.10.005

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 10-0030-05

Combined forming process of flaring-upsetting for pure titanium thin-walled tube end flange

Guo Shiyong, Jin Junhao, Zhang Fan, Mao Mengru, Yan Jiaming, Guan Yang, Lin Peng

(School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to solve the problem of folding defects that are prone to occur during the direct upsetting process of tube end flange, for TA2 pure titanium tube, a new method of flaring-upsetting combined forming for tube end flange was proposed, and the pure titanium thin-walled tube end flange was successfully prepared. Then, the influence laws of flaring pre-deformation at different angles on the formation position and size of folding defects during the upsetting process of tube end flange were studied by experiment and numerical simulation methods, and the radial velocity distribution under the upsetting stroke of 50% for the tube end flanges with flaring angles of 20° and 0° was analyzed and compared. The results show that the strain of folding region is large in numerical simulation, which is caused by the folding defect formed by the extrusion of tube walls. The flaring pre-deformation causes the internal bending moment to occur when the free tube end flange is upsetting, which changes the metal flow behavior of pure titanium. The depth of folding defect decreases with the increasing of flaring angle. Compared with the direct upsetting, the folding defects of tube end flange formed by flaring 20° first and then upsetting are transferred from the inner wall to the upper surface, and the depth of folding defects is relatively small, which does not affect the overall quality of tube end flange after the removal of machining.

Key words: TA2 pure titanium; flaring-upsetting combined forming process; tube end flanges; closed upsetting; folding transfer

钛管具有优异的耐腐蚀性、高强度和低密度,在高压和高盐度海水条件下具有良好的适应性能,在海洋管道和海洋工程领域应用广泛^[1-2]。管道之间常采用法兰连接方式,管端法兰可通过锻造或焊接制成。但焊接管端法兰常存在焊接裂纹、气孔等缺

陷,易引起管道泄漏,且制造工序繁多、生产效率低^[3-4]。因此,锻造为管端法兰成形的优选方法。

目前,管端直接镦粗为成形管端法兰的常用方法之一。Wang Z J等^[5]研究了管端法兰冷镦挤压过程中不同管尺寸和界面摩擦对材料流动的影响。Hu X L和Wang Z R^[6]开发了多步镦粗方法,可以在管道末端成形厚而宽的法兰。Mohamed F A等^[7]提出了一种采用球形工具在车床上成形管端法兰的方法。Alves L M等^[8]提出了一种使用浮动模具生产环形法兰的新工艺,该工艺允许堆积更多材料,且

收稿日期: 2023-11-27; 修订日期: 2024-03-02

作者简介: 郭世勇 (2000-), 男, 硕士研究生

E-mail: 15536982342@163.com

通信作者: 林鹏 (1982-), 男, 博士, 副教授

E-mail: linpeng@tyut.edu.cn

不会因上下模具一起移动而发生屈曲或开裂。Zhu S F 等^[9]提出了可控变形区镦粗成形方法（Upsetting with Controllable Deformation Zone, U-CDZ），借助浮动反冲头，防止屈曲发生，突破了传统直接镦粗方法中初始高径比的限制。但是，这些工艺对设备条件要求较高，且工序复杂、生产效率低。

基于此，Guan Y 等^[10]提出了一种管端法兰扩口-镦粗整体成形新工艺，该工艺简单易行，可通过转移折叠缺陷位置形成更大的管端法兰。本文采用该技术制备纯钛管端法兰，并通过实验与数值模拟方法研究其成形过程中的材料流动规律与折叠缺陷转移机制，以期对纯钛管端法兰的实际生产提供技术参考。

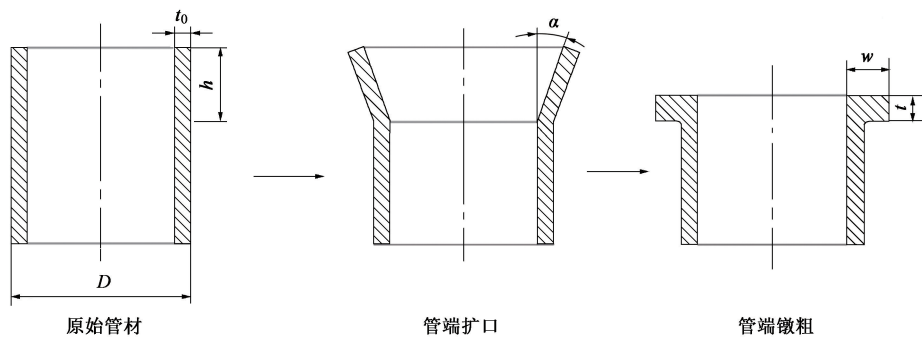


图 1 扩口-镦粗复合成形工艺的原理图

Fig. 1 Principle diagram of flaring-upsetting combined forming process

表 1 扩口-镦粗复合成形工艺的几何参数设置

Table 1 Geometric parameters setting for flaring-upsetting combined forming process						
参数	D/mm	t_0/mm	h/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	t/mm	w/mm
数值	$\Phi 22$	2	9	0、10、15、20	3.1	5

1 实验方法

1.1 实验材料与装置

实验材料为经过酸洗退火后的商业 TA2 纯钛薄壁管，外径为 $\Phi 22\text{ mm}$ ，壁厚为 2 mm 。

图 1 为管端法兰扩口-镦粗复合成形工艺原理图。其工艺过程为：首先对管端进行一定角度的扩口，然后再对扩口后的管端进行闭式镦粗，最终制得具有一定厚度和宽度的法兰。法兰成形过程中具体几何参数设置如表 1 所示，包括原始管材外径 D 、初始壁厚 t_0 、自由高度 h 、扩口角度 α 以及镦粗后法兰厚度 t 和法兰宽度 w 。其中，高厚比 h/t_0 均大于 $2.3^{[11]}$ 。

实验装置及模具如图 2 所示，包括：不同角度的扩口冲头，中间位置的圆环和套盘，以及放于下端的凹模。其中，用于管端镦粗的上模带有芯棒，以防止管壁在镦粗过程中内凹。为防止镦粗时法兰根部产生应力集中，对凹模内壁顶端进行倒角，倒角半径为 0.5 mm 。

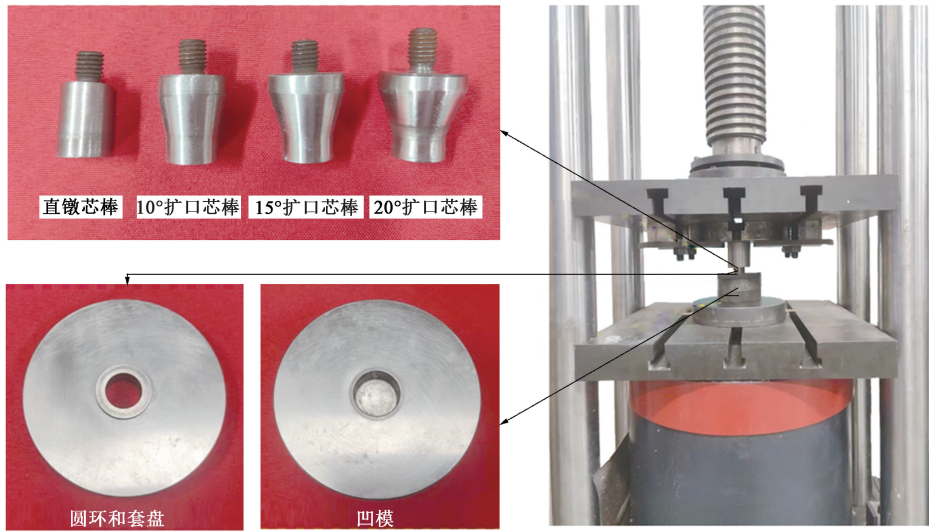


图 2 实验装置和模具

Fig. 2 Experimental device and die

1.2 实验方案

首先对管端进行扩口, 扩口角度分别为 0° (直镦)、 10° 、 15° 和 20° 。然后对扩口后的管端进行镦粗。所有实验均在室温下进行, 无润滑, 扩口冲头与镦粗上模的下压速度均为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。之后将镦粗后的法兰沿径向切开, 并使用测量显微镜观察其截面特征。

1.3 有限元模拟

使用有限元软件 DEFORM-3D V11.0 模拟纯钛管的扩口-镦粗复合成形过程。各工序的有限元模型如图 3 所示。为减少计算时间, 选取模型的 $1/60$ 作为模拟对象。所有模具均设定为刚性体, 无润滑。所有上模的下压速度均设定为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。将扩口冲头的摩擦因数设置为 0.1。对于镦粗工序, 镦粗上模及其芯轴部分和凹模的摩擦因数设置为 $0.3^{[12]}$ 。

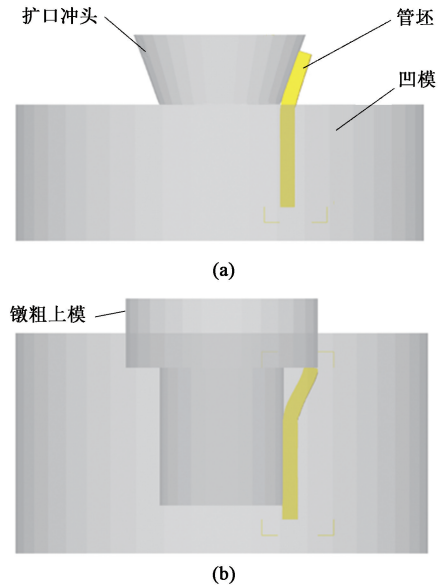


图 3 各工序的有限元模型

(a) 管端扩口 (b) 管端镦粗

Fig. 3 Finite element models for each process

(a) Flaring of tube end (b) Upsetting of tube end

2 结果分析与讨论

2.1 镦粗变形过程

选择高厚比 h/t_0 为 4.5 的纯钛管, 先经不同角度的扩口, 再镦粗成固定宽度为 w 的管端法兰。图 4 为纯钛管经过 0° 扩口 (直接镦粗) 和 20° 扩口后镦粗变形的模拟结果。在直接镦粗工艺中, 应变主要集中在靠近法兰上下侧的外部转角处和中部形成

的折叠缺陷的条状区域上。当镦粗行程为 50% 时, 管端自由区上下侧受摩擦和芯轴侧壁约束不易向外流动, 故形成了近似三角形的难变形区。管端自由区的中部受摩擦影响小, 失稳后向外侧流动, 从而形成凹陷。同时, 摩擦也导致靠近法兰上下侧的外部转角处发生较大的变形。随着压下量的增加, 凹陷逐渐

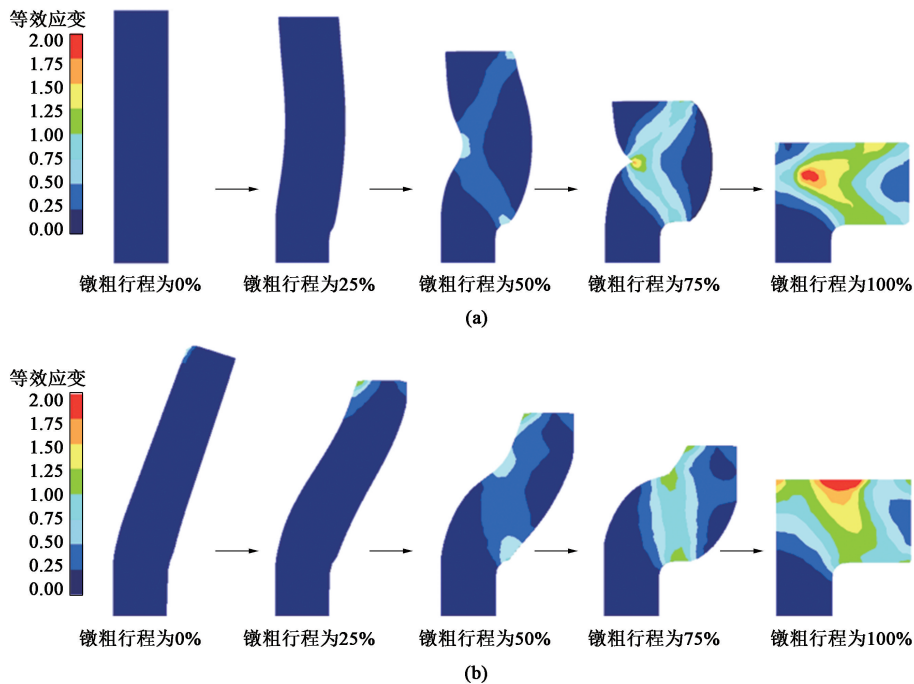


图 4 高厚比为 4.5 时管端法兰经不同角度扩口后镦粗变形的模拟结果

(a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 20^\circ$

Fig. 4 Simulation results of upsetting deformation for tube end flange with height to thickness ratio of 4.5 after flaring with different angles

闭合形成折叠。在法兰中心处，形成一个对应于折叠末端的大变形区。

在扩口-镦粗复合成形工艺中，管端扩口后发生变形，呈现喇叭状。在镦粗初期，管端尖角处由于与上模直接接触，从而发生轻微变形。同时，管端失稳形成凹陷，且凹陷位置处于管端中上部。当镦粗行程为 50% 时，由于模具的作用，管坯在顶部和靠近根部处产生了较大的应变。当镦粗行程为 75% 时，变形集中区域与直接镦粗工艺下的情况相似，呈带状分布。当压下量继续增加后，凹陷闭合，大变形区相对于直接镦粗向顺时针方向偏转，折叠缺陷随之出现在大变形带，而内侧的失稳折叠转移到上表面，后续机加工消除掉后不影响法兰的整体质量。

2.2 折叠转移行为

图 5 显示了管端法兰纵向剖面的宏观形貌及其

有限元模拟结果。当 $\alpha = 0^\circ$ 时，可以看出应变量较大的区域集中于折叠生成区域和顶部外侧区域。其中，顶部外侧区域的应变量较大主要是由坯料和镦粗圆环之间的摩擦导致；而折叠区域的应变量很大是因为管壁挤压在一起形成折叠缺陷，从而导致较大的金属流动。随着扩口角度 α 的增大，折叠位置逐渐由内壁向上移动至表面，可通过后续机加工去除，不影响法兰的整体质量。且从宏观上看，当 $\alpha = 20^\circ$ 时，折叠缺陷较浅，对法兰质量影响最小。

为了更清晰有效地表达折叠转移规律，图 6 显示了高厚比为 4.5 时管端法兰经不同角度扩口后在镦粗行程为 50% 时的径向流速分布，其中 F 为下压载荷， M 为弯矩。在此行程下，扩口角度为 20° 时管坯外侧存在微凹。

在直接镦粗过程中，管端截面内部存在径向流

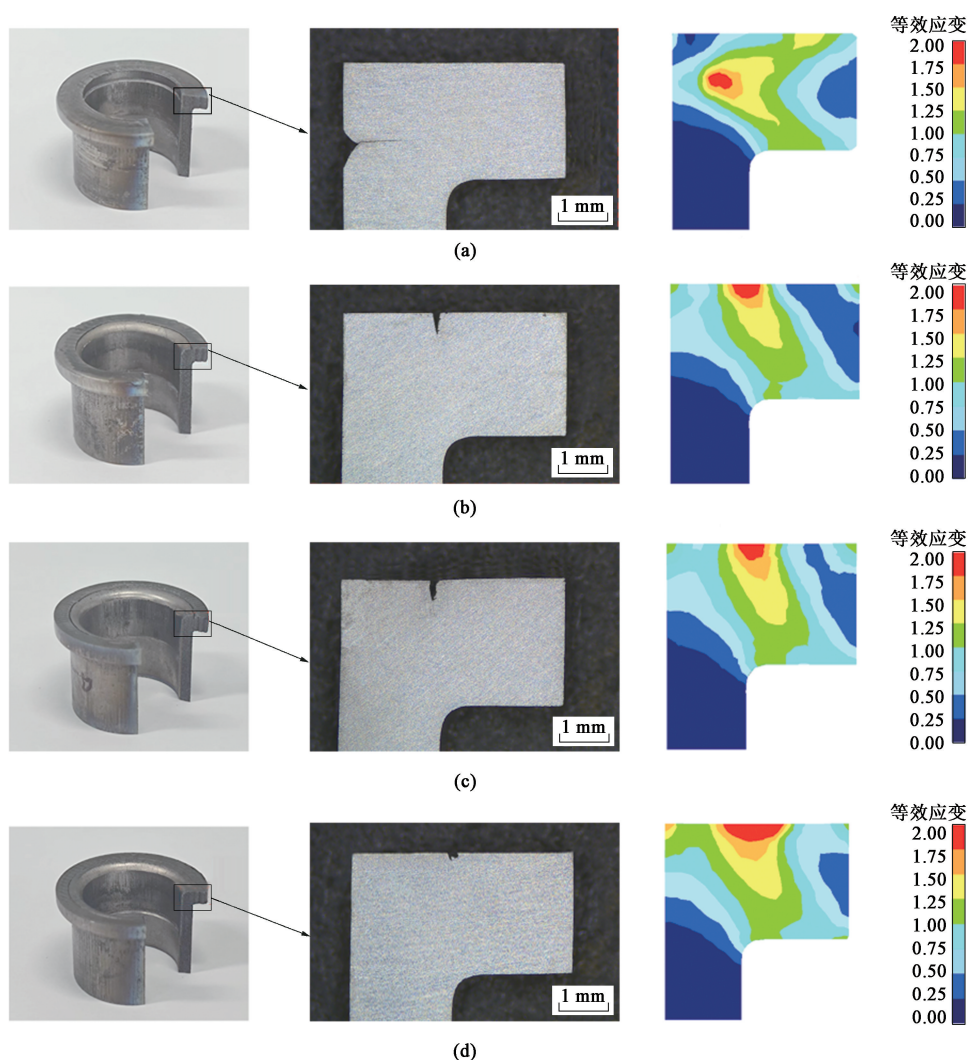


图 5 不同角度扩口后管端法兰的纵向截面形貌和有限元模拟结果

(a) $\alpha = 0^\circ$ (b) $\alpha = 10^\circ$ (c) $\alpha = 15^\circ$ (d) $\alpha = 20^\circ$

Fig. 5 Morphologies and finite element simulation results for longitudinal section of tube end flange after flaring with different angles

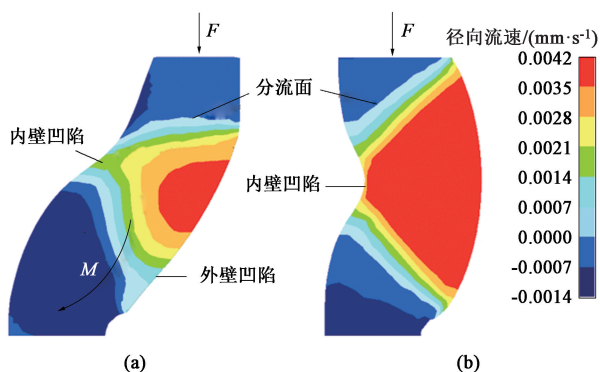


图 6 管端法兰经 20° (a) 和 0° (b) 扩口变形后在镦粗行程为 50% 时的径向流速分布

Fig. 6 Radial velocity distributions of tube end flange after flaring at 20° (a) and 0° (b) under upsetting stroke of 50%

速为 $0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的分流面，其内侧的金属向内流动、外侧的金属向外流动。在直接镦粗工艺中，由于直壁区的约束和端面摩擦的影响，管端上下两部分存在三角形的难变形区，此处金属受到限制不易向外流动。而在管端自由区的中部，金属受到的摩擦影响小，并且由于内部的应力梯度使金属倾向于向外流动。这种不均匀的金属流动造成了折叠缺陷的产生。

在扩口-镦粗复合成形工艺中，镦粗阶段的分流面相比于直接镦粗的分流面发生了扭曲。在管端上部，管坯与凹模贴合，分流面位置向外移动，迫使金属向内流动使管壁增厚并在内轮廓形成鼓形。扩口变形使管端发生倾斜，管端自由区上下侧受到的变形载荷的作用线并不一致，会在管坯内部形成弯矩 M ，导致径向流速分布发生偏转，使中部和下部金属分别向外和向内流动。管端中部处在内凹附近的金属主要向外侧流动，将凹模填充满。在管端下部靠近直壁区的金属主要向内侧流动，在外壁凹陷处，弯矩对金属向外流动的阻碍作用强于应力梯度使金属向外流动的作用，使此处金属向外流动的速度小于其周围金属向外流动的速度，但由于凹模存在圆角，不易产生金属堆积，最终外侧微凹在镦粗后期消失。

3 结语

采用实验和数值模拟方法，对纯钛管扩口-镦粗复合成形工艺进行了研究，分析了扩口预变形对折叠缺陷形成位置和大小影响。与直接镦粗相比，扩口预变形使自由管端在镦粗时内部产生弯矩，改变了金属的流动行为，导致镦粗后折叠缺陷由法兰内

壁转移至上表面，且折叠缺陷的深度随着扩口角度的增大而减小。位于管端法兰上表面的折叠缺陷可通过后续机加工消除，不影响管端法兰的整体质量。

参考文献:

- [1] Pang J J, Blackwood D J. Corrosion of titanium alloys in high temperature near anaerobic seawater [J]. Corrosion Science, 2016, 105: 17-24.
- [2] 张海丽. TA2 工业纯钛在海水管系中的应用研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
Zhang H L. Study on Application of TA2 Industrial Pure Titanium on Seawater Piping System [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [3] 张国福, 宋天民, 尹成江, 等. 机械振动焊接对焊缝及热影响区金相组织的影响 [J]. 焊接学报, 2001, 22 (3): 85-87.
Zhang G F, Song T M, Yin C J, et al. The effect of mechanical vibration welding on the microstructure of weld and HAZ [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22 (3): 85-87.
- [4] 朱大喜, 程晋宜, 田雷, 等. 海洋工程工业纯钛管材焊接工艺及施工控制 [J]. 焊接技术, 2022, 51 (5): 130-133.
Zhu D X, Cheng J Y, Tian L, et al. Welding technology and construction control of commercially pure titanium piping for offshore engineering [J]. Welding Technology, 2022, 51 (5): 130-133.
- [5] Wang Z J, Lu J, Wang Z R. Numerical and experimental research of the cold upsetting-extruding of tube flanges [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 110 (1): 28-35.
- [6] Hu X L, Wang Z R. Numerical simulation and experimental study on the multi-step upsetting of a thick and wide flange on the end of a pipe [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151 (1-3): 321-327.
- [7] Mohamed F A, El-Abden S Z, Abdel-Rahman M. A rotary flange forming process on the lathe using a ball-shaped tool [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 170 (3): 501-508.
- [8] Alves L M, Afonso R M, Silva C M A, et al. Boss forming of annular flanges in thin-walled tubes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 182-189.
- [9] Zhu S F, Zhuang X C, Xu D K, et al. Flange forming at an arbitrary tube location through upsetting with a controllable deformation zone [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 273: 116230.
- [10] Guan Y, Li C, Guo S Y, et al. A novel combined process of flaring-upsetting for forming end flanges on thin-walled tubes [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 84: 927-936.
- [11] 王鑫, 王强, 张治民, 等. 薄壁筒形件累积镦挤成形法兰研究 [J]. 轻合金加工技术, 2020, 48 (6): 42-46.
Wang X, Wang Q, Zhang Z M, et al. Research on cumulative upset extrusion flange of thin-walled tube [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2020, 48 (6): 42-46.
- [12] Tan X C. Evaluation of friction in upsetting [J]. Production Engineering, 2011, 5 (2): 141-149.