

工艺参数对高强不锈钢薄壁管推弯成形影响研究

李旻纯

江西科技师范大学材料与能源学院 江西南昌 330038

摘要:现代飞机管路系统中存在大量的薄壁金属导管,为了达到减轻机身重量、结构紧凑、以及保持飞机整体性能的目的,每个管路系统中应用了大量的小弯曲半径导管。小弯曲半径管的推弯成形是一种重要的塑性成形技术,这种成形技术与其它工艺相比较而言,推弯成形更具有成形模具结构简单、操作简便、成形质量好等优点。但是由于弯曲变形过程中几何变形的特殊性和复杂性,成形缺陷例如:成形弯头内侧起皱、外侧减薄及截面畸变等问题依旧难以克服。润滑方式、填充介质等因素对弯管最终的成形质量具有重要影响。因此,研究这些因素的影响对管材推弯成形的质量提高有十分必要。

关键词:高强不锈钢薄壁管;推弯成形;工艺参数;有限元模拟;冷推弯

引言

目前业界对冷推弯成形工艺已经有了较为系统性的研究。例如 Baudin^[1]等利用有限元软件模拟了以聚氨酯橡胶棒作为填充材料的推弯成形,得到了选用 Blatz-Ko 材料模型时易造成芯棒和凹模之间发生穿透现象这一结论,并提出了选用 Mooney-Rivlin 材料模能有效的解决这一问题,最终通过改变橡胶结构,成功模拟了成形过程。郭训忠^[2]等对 TA1-Al 双金属弯头管件进行推弯模拟,由模拟结果得出该双金属复合管推弯成形的界面结合强度临界值,对推制速度、摩擦因素等对截面最大剪切应力及复合弯头壁厚分布的影响也进行了模拟研究,最终通过试验验证了模拟结果的可靠性。陈清根^[3]等通过理论分析、建立有限元模型进行数值模拟以及结合冷推弯实验探究了薄壁 LF2M 铝管进行弯曲半径为 1D 的冷胀推弯的成形规律;张旭^[4]等通过采用有限元数值模拟分析结合实际实验的研究方法研究了钛管,并且利用虚拟正交试验对钛管冷推弯曲成形的工艺参数进行了优化,最终确定了钛管冷推弯曲成形较优工艺参数组合,使得最终成形质量得到了提高。吴孔炜^[5]等通过采用有限元模拟分析与推弯成形实验相结合的办法,对 5A02 铝合金管进行弯曲半径为 1D 的冷胀推弯实验,研究了弹性填充介质的结构对铝管推弯成形的影响。周伟^[6]等采用 ANSYS 软件进行了模拟分析得到了成形过程中环形管的内外侧应力、应变分布规律以及弯管的壁厚变化。李林涛^[7]则采用 MSC/AutoForge 软件分析了推弯过程中不同的牛角形芯棒参数以及推弯温度与速度作用下纯钛管的弯曲变形行

为,在此基础上进行优化获得了推弯过程中牛角形芯棒参数和合理的推弯温度与速度。

目前针对于薄壁弯头的整体成形研究主要集中在相对弯曲半径为 1.5 倍及以上^[8]。本文针对不锈钢管材冷推弯成形过程结合有限元软件,采用分别改变摩擦系数、模具间隙和推制速度的实验方式,研究不同工艺参数对冷推弯的成形质量的影响。

1. 冷推弯有限元模型建立

冷推弯成形基本是利用液压机推动管材,将管材推入至模具型腔内,通常情况下模具型腔中还有芯棒,管坯在模具型腔和芯棒的共同限制下弯曲成一定的角度,弯曲角度中最常见的角度是 90°,其次是 45°以及 30°等。冷推弯相较于其他弯曲形式而言更具有以下特点:设备简单,冷推弯成形只需借助液压机就能实现弯曲,而且下压的速度可调,可以形成小半径弯曲成形件,因此工艺更加简单,成本更低,成形效率也更高。

冷推弯常见的成形装置如图 1 所示:在工艺开始之前,先将管材进行下料优化得到管材 3,之后调试芯棒 5 使其位于图 a 所示的位置,然后将其固定,接着将下料管材 3 放入模具 4 内,并将上模具 1 和下模具 4 紧闭,使用推杆 2 推动管材 2 沿着上下模具与芯棒之间的空隙进行弯曲变形,弯曲结束后将上下模具打开,最后将芯棒 5 从弯头 6 中取出来。为了方便最后一步中芯棒的取出,在实验开始前,通常会对下料管材的内外表面、模具的型腔以及芯棒进行润滑处理。弯曲成形结束后也如图 b 所示。

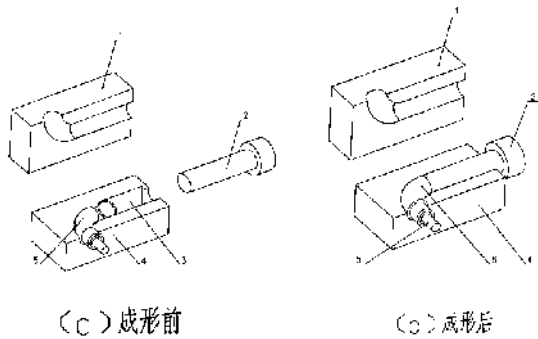


图1 冷推弯原理图

2. 弯曲成形过程有限元模型的建立

建立几何模型，就是根据实际成形过程中模具及管材的尺寸在 ABAQUS 生成模具及管材的几何模型。几何模型的建立为几何模型的装配、材料模型和接触模型的建立及有限元网格划分等提供了载体。

本文所建立的几何模型由以下几部分组成：模具、芯棒、管材和推杆组成。因为在成形过程中，管材是主要变形体，所以在建模过程中把管材定义为三维可变形体。在实际成形过程中，成形模具都会有少量的弹性变形，但相对于管坯的塑性变形量来说，成形模具产生的弹性变形极小，可以忽略不计。而且，由于实际对弯管成形起作用的是模具与管材的接触表面，因此在冷推弯有限元模型的建立过程中，为了提高数值模拟的计算效率和简化模型，实际成形模具的基本定义为表面刚体。

在几何建模过程中，管坯和各模具的建立是在各自独立的坐标系中完成的，因此各几何模型彼此是相互独立的。为了对实际成形过程进行数值模拟仿真，在建立了管坯和各模具的几何模型后，还需要对各几何模型进行装配建模，以在全局坐标系中确定管坯和各模具间的初始相对位置关系。各成形模具和管坯的几何模型及其装配关系如图 2 所示。



图2 冷推弯有限元模型

3. 弯头成形质量指标

弯头成形质量的衡量指标包括最大壁厚减薄率、截面椭圆度、破裂及起皱等，在不同工艺参数下，分析壁厚分布情况及截面椭圆度对研究冷推弯成形影响因素具有实际参考意义。测量时将 90° 弯头均分为 10 等分即每隔 10° 位置进行一次测量，图 3 为壁厚测量位置示意图。

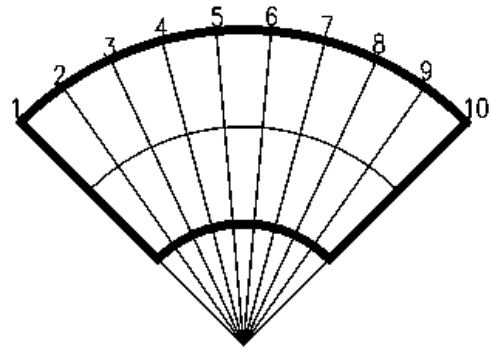


图3 测量角度示意图

采用 ABAQUS 有限元模拟软件对不锈钢的冷推弯成形进行有限元模拟，通过工艺参数的改变，研究成形弯头内外侧壁厚分布及截面椭圆情况，具体模拟工艺方案如表。

表1 模拟工艺方案

固定参数	弯曲模间隙 $t=0.08\text{mm}$	芯棒间隙 $t=0.08\text{mm}$	推制速度 $=10\text{mm/s}$
	摩擦系数 $f=0.08$	摩擦系数 $f=0.08$	
改变参数	摩擦系数 f	弯曲模间隙 $t=\text{mm}$	推制速度 mm/s
	0.04、0.08、0.12、0.16、0.12	0.06、0.08、0.10、0.12、0.16	5、10、15、20

4. 摩擦系数对成形质量影响

将推制速度与模等具间隙工艺参数固定，改变管材与模具之间的摩擦系数 f 研究摩擦系数对弯管成形质量的影响。摩擦系数分别取值：0.04、0.08、0.12、0.18 以及 0.2 进行成形模拟。

图 4 所示为管材与模具之间的摩擦系数对高强不锈钢管冷推弯的壁厚变化和截面畸变的影响。从图 4 (a) 和 (b) 中可以看出管材与模具的摩擦系数对壁厚变化有较为明显的影响，随着摩擦系数的增加，管材外侧壁厚减薄逐步减少，这主要是由于摩擦力的存在会使弯头外侧产生一个附加压应力，该压应力的存在抵消了部分拉应力，从而降低了壁厚的减薄，因此随着摩擦系数的增大，成形弯头外侧拉应力会逐步减小。而管材内侧的壁厚变化则不同，如图 4 (b) 所

示管材内侧壁厚分布受摩擦系数影响不大，端部壁厚随摩擦系数增大而增大，而其尾部壁厚随摩擦系数增大而减小。这主要是因为随着摩擦系数的增大，这是因为弯头成形过程中应力较大的区域同样主要集中在弯曲内侧及弯头端部与尾部等三个区域，并且随着摩擦系数的增大，应力集中区域也不断扩大，但最大应力值变化不大，最小应力值略有减小。

综和以上分析可知，随着摩擦系数的增大，应力集中区域也不断扩大，内侧壁厚最大值变化不大，外侧壁厚的减薄有明显的抑制作用。截面畸变的变化也较为明显，如图(c)随着摩擦系数的增加，最大截面畸变有明显的降低。这说明摩擦系数的增加能一定程度的控制横截面畸变的产生。

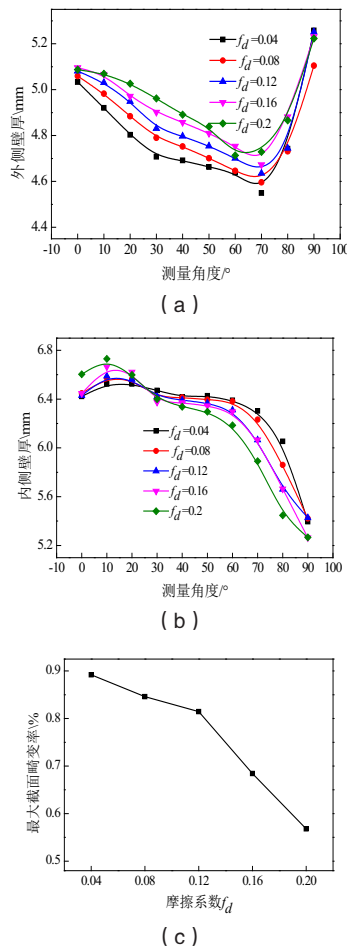


图4 摩擦系数对成形质量的影响

5. 模具间隙对成形质量影响

将推制速度与摩擦系数等工艺参数固定，改变管材与弯曲模间隙 Cd 研究冷推弯成形弯管质量的影响。间隙值选取 $t=0.06\text{mm}$ 、 0.08mm 、 0.10mm 、 0.12mm 、 0.16mm 对成形

过程进行模拟。如图 5 为管材与弯曲模间隙 Cd 对冷推弯成形弯管质量的影响。如图 5 (a) 和 (b) 所示管材与弯曲模间隙对壁厚变化有较为显著的影响。随着管材与弯曲模间隙的增加，管材外侧壁厚减薄有逐步增加的趋势。这是因为弯曲模有限制外侧壁厚减少的作用，而随着间隙的增大，弯曲过程中外侧壁厚受到的限制作用也在不断减少，从而使得壁厚减薄逐步增加。而内侧的壁厚变化则较不明显，当间隙值为 0.06mm 时，管材下推时弯曲模与管材的间隙过小，导致下压的推制力增大，从而使得管材内侧产生较大的应力集中，因此内侧壁厚到达最大值，当间隙值超过 0.06mm 后，而随着间隙的增大内侧壁厚的增厚几乎没有发生变化。

综上所述，凹模间隙对内外侧壁厚影响不大。而最大截面畸变率先是随着间隙值的增大而减少，到达最小值后又随着间隙值的增加而增大。因此可知，间隙值的选取应该位于 0.08mm 到 0.10mm 之间。

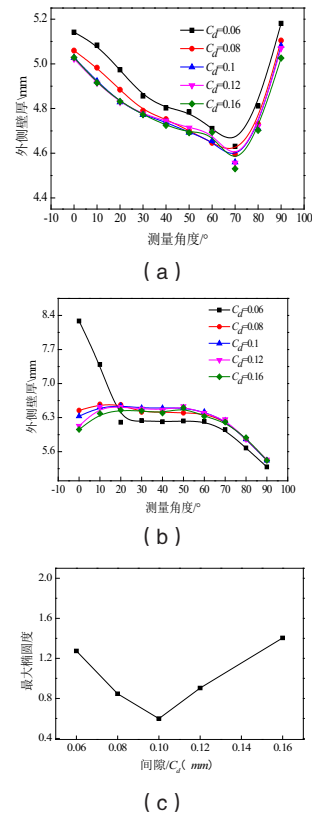


图5 间隙对成形质量的影响

6. 推制速度对成形质量影响

保持其他工艺参数不变的条件下，只改变推制速度 V 研究推制速度对弯头成形质量的影响。速度取值 $V=5\text{mm/s}$ 、

10mm/s、15mm/s 和 20mm/s。

如图所示为弯曲速度 V 对冷推弯成形弯管质量的影响。如图 6 (a) 和 (b) 所示弯曲速度对内外侧壁厚变化影响不显著。如图 6 (a) 所示壁厚减薄值随着弯曲速度的增大有一个逐步增大的趋势，而在弯曲速度为 5mm/s 时壁厚减薄值到达最小值。而内侧壁厚增厚则是整体变化不大，但在 5mm/s 壁厚增厚到达最小值。

综上所述。弯曲速度对壁厚变化的影响不大。如图 6 (c) 也可以看出弯曲速度对截面畸变的影响也并不显著。这主要是因为成形属于冷推弯属于冷成形过程，弯曲速度的改变对材料的应力应变关系和弯曲过程中的应力应变状态及其分布的影响并不会太大。

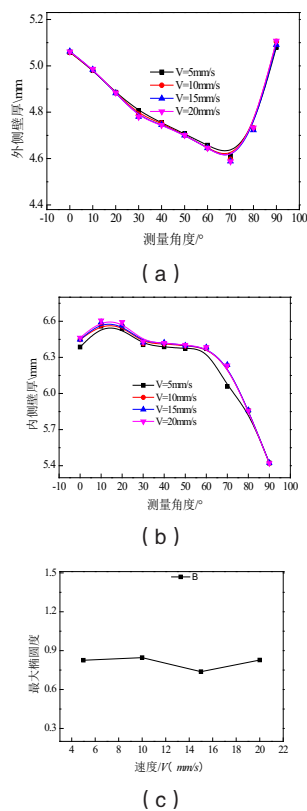


图 6 推制速度对成形质量的影响

7. 结论

(1) 摩擦系数对弯头成形有较为明显的影响，摩擦系

数的增加能控制横截面畸变的产生，同时降低外侧壁厚的减薄，但是过大摩擦会降低凹模寿命、划伤成形弯头表面，甚至会阻碍材料流动而降低弯曲段长度最终引起弯头成形不足。实际试验时，在控制壁厚减薄情况下，尽可能选择润滑效果较好的润滑剂对管材及凹模进行润滑处理。

(2) 间隙的存在是生产中无法避免的现象，间隙不仅影响成形弯头的截面椭圆情况，更易造成材料的失稳起皱。因此，在实际实验时，在保证管材能顺利进入凹模型腔且内侧壁厚不过度增厚甚至起皱情况下，应尽可能采用较小间隙值。

(3) 推制速度对整体弯头成形影响较为不明显，速度过大会导致材料流动，因此在实际实验中，应选用较小的推制速度。

参考文献

- [1] Baudin S, Ray P, Donald B, et al. Development of a novel method of tube bending using finite elements simulation [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2004, 153-154 (none): 128-133.
- [2] 郭训忠, 陶杰, 唐巧生, 等. TA1-Al 双金属复合管冷推弯模拟及试验 [J]. 中国有色金属学报. 2012, 22(04): 1053-1062.
- [3] 陈清根. 薄壁管材小弯曲半径弯头内胀冷推弯成形研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
- [4] 张旭. 钛管冷推弯成形数值模拟及工艺参数优化研究 [J]. 江南大学, 2015.
- [5] 吴孔炜, 徐雪峰, 付春林. LF2M 铝合金薄壁管 1D 弯曲半径推弯成形研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27(6): 7. DOI: CNKI: SUN: SXGC. 0. 2020-06-008.
- [6] 周伟, 周廉, 于振涛. TA2 钛环形管热推成形的三维有限元数值模拟 [J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(10): 1585-1587.
- [7] 李林涛, 曾卫东, 张学敏等. 中频感应加热纯钛弯管成形过程中的有限元模拟 [J]. 锻压技术, 2006(6): 131-134.
- [8] 陈仕清. 特薄壁金属管件填料推弯成形新工艺研究 [J]. 大连理工大学, 2010.