

TA34 钛合金波纹管成形研究

应 扬, 郭荻子, 杜 宇, 李 婷, 邹 磊, 解子人

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘 要: 采用恒应变速率拉伸方法研究了普通退火态(M态)和等温退火态(HT态)TA34钛合金管坯的冷成形性能, 结果表明: M态TA34钛合金管坯的强度更高, 最大应变硬化率更低, 冷成形性能更好, 更适用于波纹管的成形。采用有限元模拟的方法对DN85波纹管的成形参数进行仿真计算, 得到最佳鼓波压力、成形压力和最大波深系数等成形参数。根据仿真模拟结果进行DN85波纹管成形工艺的探索, HT态管坯在波深系数1.162时即出现开裂, M态管坯在波深系数1.165、1.169、1.178时均未出现表面质量缺陷。以M态TA34钛合金管坯为坯料, 选择合适的波纹管成形工艺参数可以制备出质量优良的TA34钛合金波纹管。

关键词: 波纹管; 应变硬化指数; 成形模拟; 波深系数

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)06-001-06

Research on Forming Technology of TA34 Titanium Alloy Bellows

Ying Yang, Guo Dizi, Du Yu, Li Ting, Zou Lei, Xie Ziren

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The cold forming property of TA34 titanium alloy tube blank in ordinary annealed state (M state) and isothermal annealed state (HT state) was studied by constant strain rate tensile test. The results show that the M state TA34 titanium alloy tube blank has higher strength, lower maximum strain hardening rate, better cold forming properties than the HT state, and is more suitable used for forming bellows. The finite element simulation method was used to simulate the forming parameters of DN85 bellows, and the parameters such as drum wave pressure, forming pressure and wave depth coefficient of DN85 bellows were obtained. According to the simulation results, the process of forming DN85 bellows was explored. The HT state TA34 titanium alloy tube blank will crack when the wave depth coefficient is 1.162. No surface quality defect is found for the M state TA34 titanium alloy tube blank when the wave depth coefficients are 1.165, 1.169 and 1.178. By using the M state TA34 titanium alloy tube blank as the raw material and selecting the appropriate bellows forming process parameters, the TA34 titanium alloy bellows with good quality can be formed.

Key words: bellows; strain hardening index; forming simulation; wave depth coefficient

波纹管是一种带有一定数量侧面波纹的圆柱形薄壁管件, 可用作装置管道的柔性连接, 主要作用是补偿装置管道系统轴向位移和弯曲位移, 提高系统结构稳定性, 同时还可减少管道振动和噪声^[1], 被广泛应用于航天、石油化工、机械、核能、热工、船舶等领域^[2-6]。

金属波纹管根据其使用工况不同而采用不同的

材质, 目前最常用的材质为不锈钢, 其他材质有碳钢、合金钢、铜合金、铝合金等^[7-8]。在航天领域, 金属波纹管多用于制作各类航天探测器管路系统中的关键传感器, 其应用工况十分严苛, 极端温度可低至20 K。波纹管组件不仅要承受系统压力和低温冲击振动, 还要随着阀门的开关进行轴向压缩和拉伸, 是管路系统中最关键却最薄弱的部件。不锈钢材质的波纹管组件在低温工况下疲劳性能不足, 使用寿命缩短, 存在引发机械系统故障的风险, 亟需寻找合适的替代材料。

收稿日期: 2022-09-19

基金项目: 陕西省科技重大专项(2020ZDZX04-01-02)

通信作者: 应扬(1991—), 男, 工程师。

与不锈钢相比,钛合金在低温下具有更高的屈服强度,可以达到钢的3倍以上,而密度仅是钢的一半左右。此外,钛合金还具有热导率低、膨胀系数小、无磁性等一系列优点,因此非常适合作为新型低温材料应用于航天领域。TA34钛合金是西北有色金属研究院在“九五”期间自主研制的一种近 α 型中强低温钛合金,在普通退火态(M态)或等温退火态(HT态)下具有优异的焊接性能和冷、热成形性能,其使用温度可低至20 K,且低温下仍能保持良好的强塑性匹配,是生产新一代航天发动机用波纹管的理想材料。

金属波纹管的性能与其波型密切相关。波纹管的波型主要有U型、V型、C型、 Ω 型和S型等,其中U型波纹管是使用最多的一类波纹管^[9]。金属波纹管的使用性能、工艺性能、可靠性和成本受结构设计影响较大,且成形过程复杂,需同时承受拉

伸和挤压作用,变形量大,仅依靠理论及经验难以对成形过程做出准确预测。采用数值模拟方法能够有效实现波纹管的结构设计,获得适宜的波形参数。因此,借助数值模拟方法对DN85波纹管进行了试制和成形工艺研究,以期为后续制备其他不同规格的TA34钛合金波纹管产品积累经验。

1 TA34钛合金冷成形性能研究

波纹管的成形方式为室温下的液压胀形,故要求成形波纹管的管材坯料具有良好的冷成形性能。采用INSTRON 5985万能材料试验机测量M态和HT态TA34钛合金管坯在恒应变速率0.001、0.002、0.003 s⁻¹下的拉伸性能,结果见表1。从表1可以看出,应变速率对M态和HT态TA34钛合金管坯力学性能的影响不大;与HT态管坯相比,M态管坯强度更高,但断后延伸率相对较低。

表1 M态和HT态TA34钛合金管坯在不同应变速率下的力学性能

Table 1 Mechanical properties of M state and HT state TA34 titanium alloy tube blank at different strain rates

	$\dot{\varepsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$		$\dot{\varepsilon} = 0.002 \text{ s}^{-1}$		$\dot{\varepsilon} = 0.003 \text{ s}^{-1}$	
	M state	HT state	M state	HT state	M state	HT state
Tensile strength, R_m/MPa	735	624	721	621	717	619
Yield strength, $R_{p0.2}/\text{MPa}$	631	473	626	472	624	477
Elongation, $A/\%$	21.5	26.0	22.5	26.0	21.0	25.0
Strain hardening index, n	0.11	0.14	0.10	0.13	0.10	0.14
Maximum strain hardening rate, θ_{\max}/GPa	4.75	6.98	4.77	7.31	4.04	6.70

图1为不同状态TA34钛合金管坯在恒应变速率(0.001 s⁻¹)下的应变曲线。其中,图1a为应变硬化指数拟合曲线,可以看出M态和HT态管坯的应变硬化指数相差不大,2种状态管坯的均匀塑性变形

能力接近。图1b为应变硬化曲线,可以看出2种状态TA34钛合金管坯的应变硬化曲线趋势相同,皆为先升高后降低。应变硬化曲线可分为2段,初始阶段应变硬化率随应变的增加迅速达到最高,然后逐

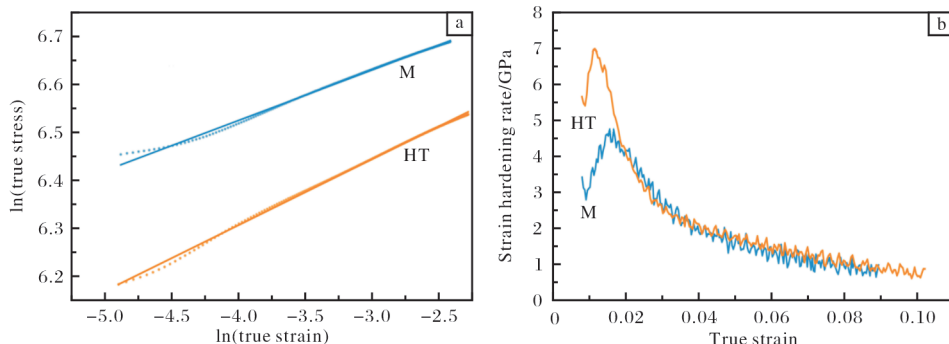


图1 恒应变速率(0.001 s⁻¹)下TA34钛合金管坯的应变曲线

Fig. 1 Strain curves of TA34 titanium alloy tube blank at constant strain rate (0.001 s⁻¹): (a) strain hardening exponent curves; (b) strain hardening curves

渐下降。HT 态管坯的最大应变硬化率为 6.98 GPa, 显著高于 M 态管坯(最大应变硬化率为 4.75 GPa)。这说明 HT 态 TA34 钛合金对应变的敏感程度更高, 材料变形初期的应变硬化现象也比 M 态显著, 在冷变形过程中更容易开裂。

图 2 是 M 态和 HT 态 TA34 钛合金管坯的显微组织。从图 2 可以看到, 2 种管坯均为等轴组织, 其中 M 态管坯晶粒较细, 粒径 $2 \sim 4 \mu\text{m}$, HT 态管坯晶粒较粗, 粒径 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 。根据 Hall-Petch 关系可以推断, M 态管坯的强度应高于 HT 态管坯, 这与合金的力学性能测试结果相符合。

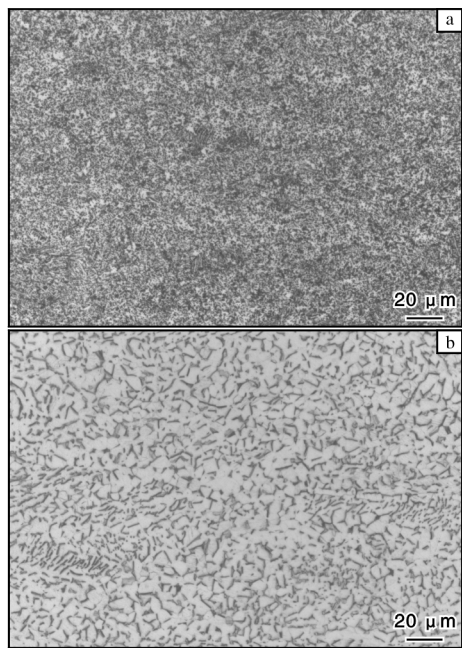


图 2 TA34 钛合金管坯的显微组织

Fig. 2 Microstructures of TA34 titanium alloy tube blank:

(a) M state; (b) HT state

以上分析结果表明, 相比于 HT 态, M 态 TA34 钛合金管坯的冷成形能力更强, 更适用于波纹管的成形。

2 波纹管成形仿真计算

选用 $\phi 89 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 的 TA34 钛合金无缝管作为坯料, 机加获得 $\phi 85.2 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 、 $\phi 84.3 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的极薄壁管坯。运用 ANSYS 有限元仿真软件对 TA34 钛合金波纹管的成形过程进行数值模拟分析, 确定波纹管成形过程的最佳工艺参数, 然后根据数值模拟结果选择合适工艺参数精确成形双层合金波纹管, 探究 TA34 钛合金

波纹管结构设计的合理性和成形的可行性。

液压成形波纹管的工艺参数较多, 其中比较重要的参数有鼓波压力、成形压力、隔片厚度等。因仿真计算涉及的管坯为几何轴对称图形, 为了减少计算量, 采用径向部分几何模型进行建模。TA34 钛合金相关材料参数分别为泊松比($\mu = 0.32$)、弹性模量($E = 113 \text{ GPa}$)、屈服强度($R_{p0.2} = 420 \text{ MPa}$)。仿真模拟的波纹管为双层结构, 管坯层间采用不分离接触, 管坯与模片之间采用摩擦接触, 摩擦系数为 0.1。

相比不锈钢、高温合金等金属波纹管常用材质, 钛合金在室温下的变形难度大且延伸率较低、加工硬化率高, 因此波纹管成形采用先鼓波、后胀形的两步变形方式。压力载荷是控制成形质量以及影响波纹管波形参数的重要因素, 不恰当的压力加载可能导致成形时管材表面出现褶皱甚至发生爆破, 因此应首先确定适用于波纹管的鼓波压力, 得到最佳加载压力。

金属波纹管坯鼓波时内压力呈递增趋势^[10], 参考其他金属材料的成形经验, 当合金进入变形区后, 鼓波压力不再增加, 故本次仿真模拟在鼓波压力增加 10% 至 18 MPa 后不再增加。图 3 为鼓波压力 18 MPa 时 TA34 钛合金管坯的应力云图, 其中右端管坯及密封环为固定约束, 管坯内层为受压面, 左端为波纹管成形时的运动端。结果表明, 在鼓波压力 18 MPa 时, TA34 钛合金管坯最大应力为 499.2 MPa, 分布在波峰附近。

由于液压成形会引起波纹管外径逐渐变大, 若成形压力继续保持鼓波压力, 则波峰受到的应力会持续增大并达到合金强度极限而引发破裂, 因此参考高温合金波纹管成形设计经验, 选取鼓波压力降低 15%, 即 15 MPa 作为成形压力进行 TA34 钛合金波纹管成形。

波深系数 k (波纹管外径与内径之比) 是决定金属波纹管几何形状的一个重要参数, 影响着波纹管的性能和波纹管的成形工艺。波纹管的成形难度随着 k 值的增加而增大。当 k 小于 1.5 时, 一般只需一次成形就能实现金属波纹管的成形。本研究选取内径为 84.5 mm, 外径分别为 99.8、101.1、101.9 mm 的波纹管进行强度计算, 即求解波深系数 k 分别为 1.181、1.196、1.210 时 DN85 波纹管的最大应变和最大应力。

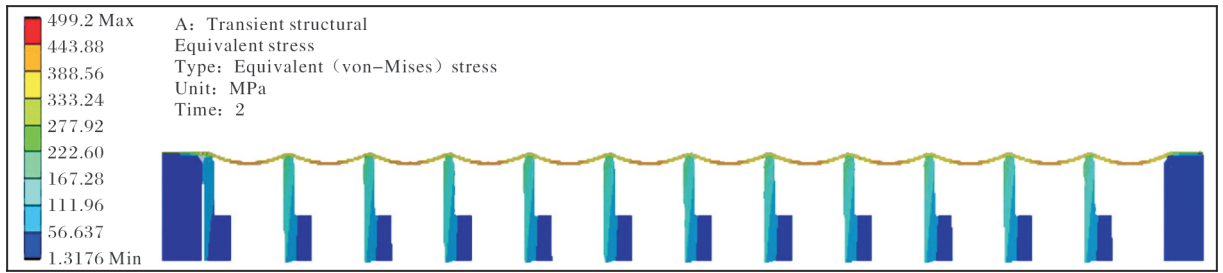


图3 鼓波压力 18 MPa 时 TA34 钛合金管坯的应力云图

Fig. 3 Stress cloud diagram of TA34 titanium alloy tube blank under drum wave pressure of 18 MPa

图 4 和图 5 分别是不同波深系数下 TA34 钛合金管坯成形 DN85 波纹管的应力云图和应变云图。由图 4 和图 5 可知, DN85 波纹管的最大应力及最大应变均在波峰处; 当 $k = 1.181$ 时, 波纹管外径波峰处的最大应力为 636.4 MPa, 单元最大应变为 0.180; 当 $k = 1.196$ 时, 波纹管外径波峰处的最大应力为 666.1 MPa, 单元最大应变为 0.200; 当 $k = 1.210$ 时, 波纹管外径波峰处的最大应力为 726.8 MPa, 单元最大应变为 0.238。

用于 DN85 波纹管成形试验的 TA34 钛合金管坯

实测性能: $R_m = 735$ MPa, $R_{p0.2} = 631$ MPa, $A = 21.5\%$ 。上述计算结果表明, 当 $k = 1.196$ 时材料最大应变已达到 0.200, 接近 TA34 钛合金的塑性极限。基于结构可靠性考虑, TA34 钛合金波纹管波深系数 k 值选取 1.181 更为合适。通过有限元仿真模拟, 采用 TA34 钛合金管坯成形 DN85 波纹管时, 鼓波压力应选择 (18 ± 2) MPa, 成形压力应选择 (15 ± 1.5) MPa。同时为了保证波纹管制品的安全性, DN85 波纹管的外径应不大于 99.8 mm, 即 TA34 钛合金管坯成形 DN85 波纹管的最大波深系数为 1.181。

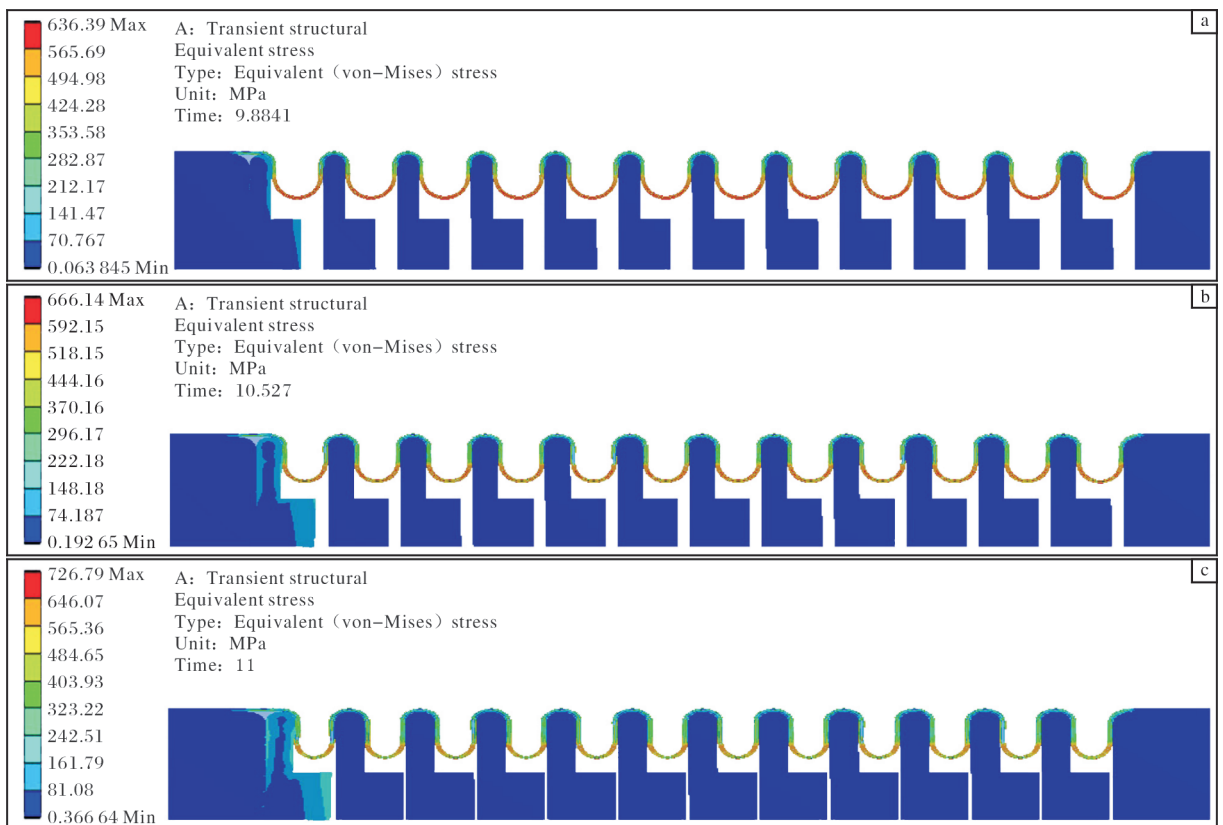


图4 不同波深系数下 TA34 钛合金管坯成形 DN85 波纹管的应力云图

Fig. 4 Stress contours of DN85 bellows forming by TA34 titanium alloy tube blank under different wave depth coefficients: (a) $k = 1.181$; (b) $k = 1.196$; (c) $k = 1.210$

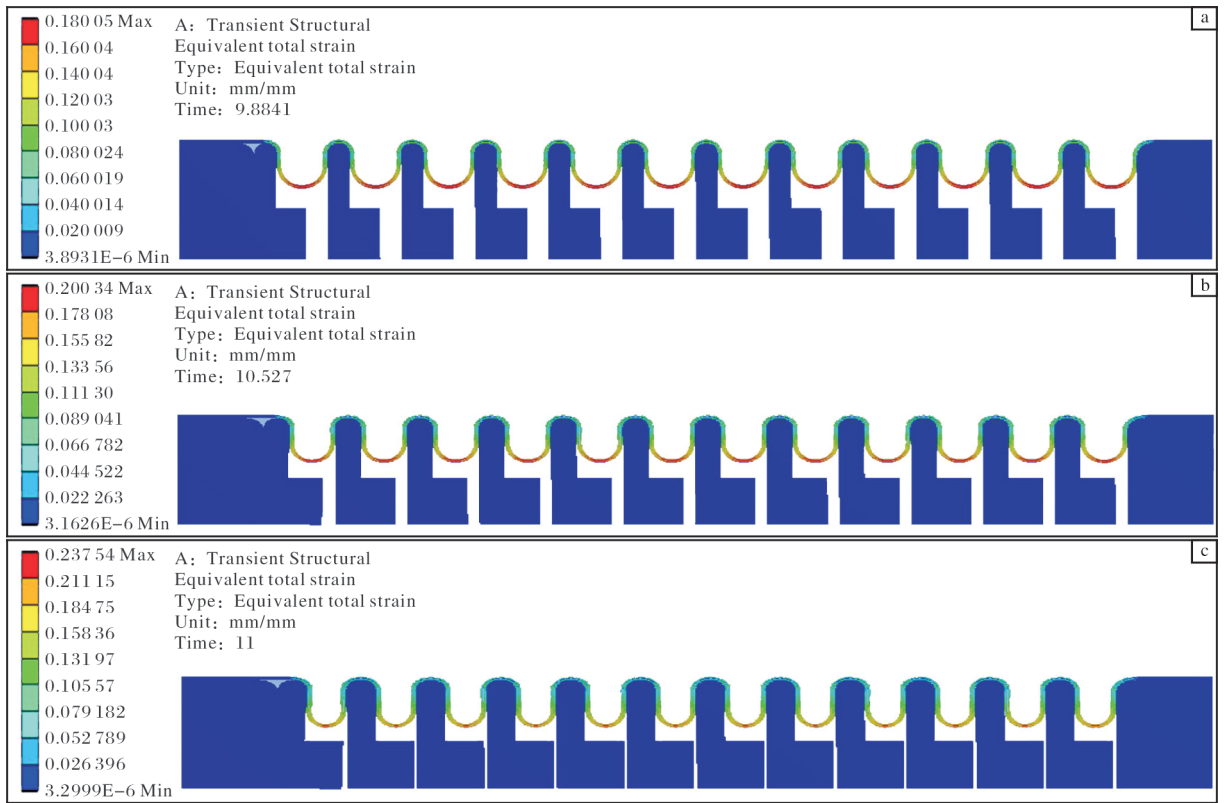


图5 不同波深系数下 TA34 钛合金管坯成形 DN85 波纹管的应变云图

Fig. 5 Strain contours of DN85 bellows forming by TA34 titanium alloy tube blank under different wave depth coefficients; (a) $k=1.181$; (b) $k=1.196$; (c) $k=1.210$

3 DN85 波纹管成形工艺探索

根据前期波纹管成形模拟结果, 分别采用 HT 态和 M 态 TA34 钛合金管坯进行 DN85 波纹管成形探索试验。试验用模片规格为内径 85.5 mm、厚度 6.9 mm, 鼓波压力 18 MPa, 成形压力 14 ~ 16 MPa, 初始隔条厚度 8.5 mm 并逐步增加, 同时依次增大波纹管的波深系数, 进行多组试验, 摸索 DN85 波纹管成形最佳工艺参数。

表 2 为 TA34 钛合金管坯成形 DN85 波纹管的试验结果。从表 2 可以看出, HT 态 TA34 钛合金管坯成形波纹管的最大波深系数仅 1.142, 当波深系数达到 1.162 及以上时均成形失败, 表现为波峰裂纹、内褶皱及微孔等, 如图 6 所示。M 态 TA34 钛合金管坯在波深系数为 1.165、1.169、1.178 时表面均未产生质量缺陷, 与仿真计算结果基本吻合。M 态管坯的成形能力高于 HT 态, 这与 TA34 钛合金冷成形性能的研究结果一致。

表 2 TA34 钛合金管坯成形 DN85 波纹管试验结果

Table 2 Test results of DN85 bellows forming by TA34 titanium alloy tube blank

No.	State	Division bar thickness/mm	Internal diameter/mm	External diameter/mm	Wave depth coefficient, k	Forming result
1 [#]	HT	8.5	84.5	96.5	1.142	Intact
2 [#]	HT	10.7	84.5	98.2	1.162	Crest crack
3 [#]	HT	11.4	84.5	98.3	1.163	Inner fold
4 [#]	HT	11.4	—	—	—	Micropore
5 [#]	M	11.4	84.5	98.5	1.165	Intact
6 [#]	M	11.6	84.5	98.8	1.169	Intact
7 [#]	M	12.5	84.5	99.5	1.178	Intact



图6 DN85 波纹管的典型缺陷

Fig. 6 Typical defects of DN85 bellows: (a) crest crack; (b) inner fold; (c) micropore

结合 HT 态和 M 态 TA34 钛合金管坯的成形试验结果, 最终采用表 2 中 7# 样品成形参数对长度 310 mm 的 HT 态和 M 态 TA34 钛合金管坯进行成形性验证。采用 HT 态管坯成形 DN85 波纹管, 在外层某波峰处出现裂纹缺陷, 而采用 M 态管坯成形的波纹管表面质量良好(图 7), 实现了 $\phi 99.5/\phi 84.5$ mm DN85 波纹管的成功试制。

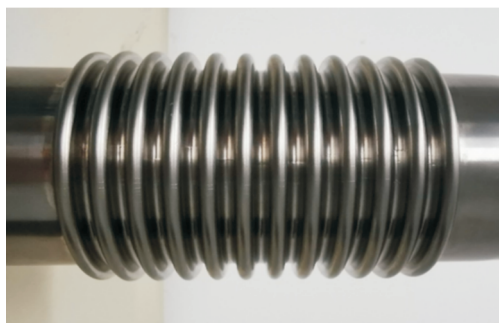


图7 TA34 钛合金管坯成形的 DN85 波纹管

Fig. 7 DN85 bellows forming by TA34 titanium alloy tube blank

4 结 论

(1) M 态和 HT 态 TA34 钛合金管坯的应变硬化指数相差不大, M 态的强度更高, 最大应变硬化率更低。

(2) 采用 TA34 钛合金管坯进行 DN85 波纹管成形时, 鼓波压力应选择 (18 ± 2) MPa, 成形压力应选择 (15 ± 1.5) MPa。HT 态 TA34 钛合金管坯成形 DN85 波纹管的最大波深系数仅为 1.142, M 态管坯的波深系数可以达到 1.178。

(3) M 态 TA34 钛合金管坯拥有较好的可成形

性, 可以通过液压胀形制备出表面质量良好的 $\phi 99.5/\phi 84.5$ mm DN85 波纹管。

参考文献 References

- [1] Subramanian G, Raghunandan C. On improving the fatigue life of U-form bellows[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 41(1): 105 - 114.
- [2] 詹梅, 石丰, 邓强, 等. 铝合金波纹管无芯模缩径旋压成形机理与规律[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(2): 108 - 115.
- [3] 沈国鉴, 李敏, 薛新. 金属波纹管流固耦合动态特性分析与试验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(5): 36 - 42.
- [4] 秦建, 钟玉平, 张爱琴, 等. 钛质波纹管设计制造及应用[J]. 中国特种设备安全, 2018, 34(9): 26 - 30.
- [5] Ma H P. Functionality and durability prediction of the thin shell edge welded metal bellows[D]. Rhode Island: University of Rhode Island, 1997.
- [6] 徐开先. 波纹管类组件的制造及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [7] 王旭, 牛玉华, 潘兹兵, 等. 常用金属波纹管材料对比及推荐选用[C]//膨胀节技术进展: 第十六届全国膨胀节学术会议论文集. 大连: 中国科学技术大学出版社, 2021: 269 - 275.
- [8] Wang G F, Zhao T, Yang M, et al. Current assisted superplastic forming of titanium alloy bellows[J]. Materials Science Forum, 2016, 838 - 839: 135 - 142
- [9] 高庆东. 航天用波纹管失稳、轴向刚度及结构优化设计研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- [10] Zhang K F, Wang G, Wang G F, et al. The superplastic forming technology of Ti-6Al-4V titanium alloy bellows[J]. Materials Science Forum, 2004, 447 - 448: 247 - 252.