

细长薄壁发动机金属壳体精密制造技术

王北平, 韩冬, 王兆楠, 张岩, 肖立军

(西安航天动力机械有限公司, 陕西 西安 710025)

摘要: 阐述了实现细长薄壁发动机金属壳体精密制造形/性一体化控制的两种主要技术途径, 描述了形变热处理和形变时效强化技术方案加工金属壳体的技术路线及金属材料强化机理, 研究获得了 F154 钢、30Cr3 钢、30CrMnSiA 钢、T250 马氏体时效钢壳体旋压热处理工艺的关键参数。应用 570~610 °C 的坯料调质预强化回火温度和 75% 以上的旋压变形率, 可实现 F154 钢、30CrMnSi 钢、30Cr3 钢壳体形/性一体化控制目标, 形变强化对强度的贡献率约为 20%~30%; T250 钢按固溶温度为 (820±10) °C、时效温度为 (520±20) °C 进行热处理可获得抗拉强度大于等于 1700 MPa 的发动机金属壳体。

关键词: 金属壳体; 精密制造; 形/性一体化控制; 旋压; 形变热处理; 形变强化

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.030

中图分类号: TG156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 12-0200-06

Precision manufacturing technology on slender thin-walled engine metal shells

Wang Beiping, Han Dong, Wang Zhaonan, Zhang Yan, Xiao Lijun

(Xi'an Aerospace Power Machinery Co., Ltd., Xi'an 710025, China)

Abstract: Two main technical approaches to realize the integration control of shape and property in the precision manufacturing of slender thin-walled engine metal shells were expounded, the technical route of processing metal shells by deformation heat treatment and deformation aging strengthening technology schemes and the strengthening mechanism of metal materials were described, and the key parameters of spinning heat treatment process for F154 steel, 30Cr3 steel, 30CrMnSiA steel and T250 martensite aged steel shells were obtained. Then, the goal of intergrated shape/property control for F154 steel, 30CrMnSiA steel and 30Cr3 steel shells was realized by applying the billet quenching and tempering pre-strengthening tempering temperature of 570-610 °C and the spinning deformation rate of more than 75%, and the contribution rate of deformation strengthening to strength was about 20%-30%. Furthermore, the engine metal shell with the tensile strength greater than or equal to 1700 MPa was obtained by T250 steel after heat treatment at the solution temperature of (820±10) °C and the aging temperature of (520±20) °C.

Key words: metal shell; precision manufacturing; shape/property integrated control; spinning; thermomechanical treatment; deformation strengthening

筒形件强力旋压技术作为一种连续局部塑性加工工艺, 已成为现代生产薄壁细长高精度筒形件的最有效方法之一。金属旋压成形具有制品性能优、尺寸公差小、成本低、材料利用率高等优势, 被广泛应用于国防建设领域。固体火箭发动机金属壳体(简称固发金属壳体)结构按照加工成形方法可分为管材机加工、旋压焊接、板材卷焊、整体旋压 4 种结构类型, 据不完全统计, 80% 以上的战术导弹金属壳体均由旋压成形得到。

新一代导弹武器对固体发动机提出了高质量比、高比冲、快节奏、低成本的设计制造要求, 因此, 工艺作为联系设计与制造的核心纽带, 必须应用科学合理的技术方案去实现设计与客户的使用需求。小直径发动机金属壳体大多选用旋压成形工艺, 部分型号的燃烧室壳体为两端螺纹连接结构, 此类壳体的最大特点是细长薄壁, 长径比在 10~20 范围内, 壳体壁厚不大于 2.0 mm。此类发动机大都属于筒式发射方式, 对壳体形位的精度要求较高。因此, 细长薄壁金属壳体的制造关键技术即如何突破旋压、热处理、机加工关键工序中形状精度的控制问题。

本文就细长薄壁固发金属壳体制造提出了形变热处理、形变时效强化技术方案, 突破了该类产品

收稿日期: 2022-01-19; 修订日期: 2022-04-25

作者简介: 王北平 (1970-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: 15102926157@139.com

精度与变形控制的技术关键, 保障了军工产品顺利生产, 强大了国防建设工艺基础。该技术优于文献 [1] 的薄壁容器制造变形控制措施, 在国内同行业中具备技术优势, 也是航天科技四院在国内固发金属壳体制造领域的立院之本。

1 细长薄壁类壳体的主要结构特点

细长、薄壁、高精度, 是细长薄壁类发动机金属壳体的主要结构特点。一般情况下, 此类壳体的壁厚尺寸多在 0.7~2.0 mm、直径在 $\Phi 70\sim\Phi 200$ mm 范围内, 长径比 ≥ 10 , 壳体两端采用螺纹结构连接

发动机的其他部件。形状精度方面, 要求制造工艺严格控制直线度、圆度和圆跳动, 某些产品的精度要求已经高于国内相关标准要求, 譬如 QJ 3199—2004^[2]。细长、薄壁的设计结构特点, 决定了变形控制成为该类产品精密制造工艺的改善方向。

1.1 F154 钢壳体

图 1 为某火箭弹金属壳体的结构示意图 (以下简称产品 1), 壳体材料为 28Cr3SiNiMoWVA 超高强度钢 (以下简称 F154 钢), 其抗拉强度 $R_m \geq 1450$ MPa, 伸长率 $A \geq 10\%$; 壳体筒段的壁厚为 0.7 mm、长度为 920 mm、圆度为 0.2 mm、直线度为 0.3 mm, 直线度高于 QJ 3199—2004^[2] 中的一级精度要求。

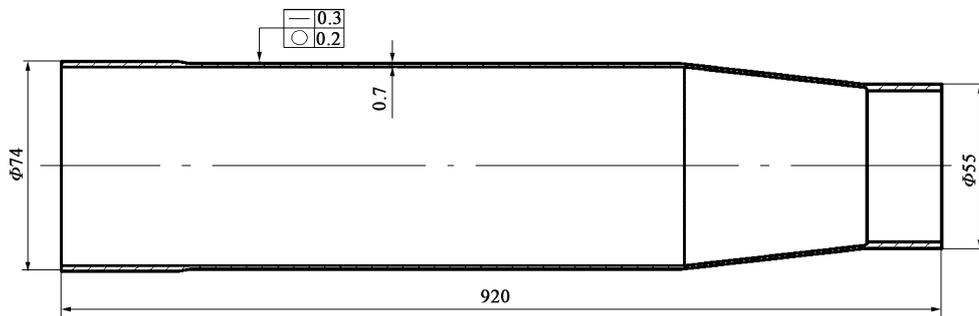


图 1 产品 1 的金属壳体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of metal shell structure for product 1

F154 钢是一种旋压、热处理工艺性能优良的钢种, 适宜于制造薄壁固发金属壳体。该钢为国内于 20 世纪 70 年代仿原苏联 28~43Cr3SiNiMoWVA 系列超高强度钢而研制的一个钢种。该钢具有优良的断裂韧性和抗应力腐蚀敏感性, 旋压工艺性好, 可调质后旋压, 是理想的小型战术发动

机壳体用钢。

1.2 30CrMnSiA 钢壳体

图 2 为高精度火箭弹壳体结构 (以下简称产品 2), 壳体材料为 30CrMnSiA 钢, 要求抗拉强度 $R_m \geq 1075$ MPa, 直线度 ≤ 0.2 mm (QJ 3199—2004^[2] 中一级类直线度为 0.35 mm)。

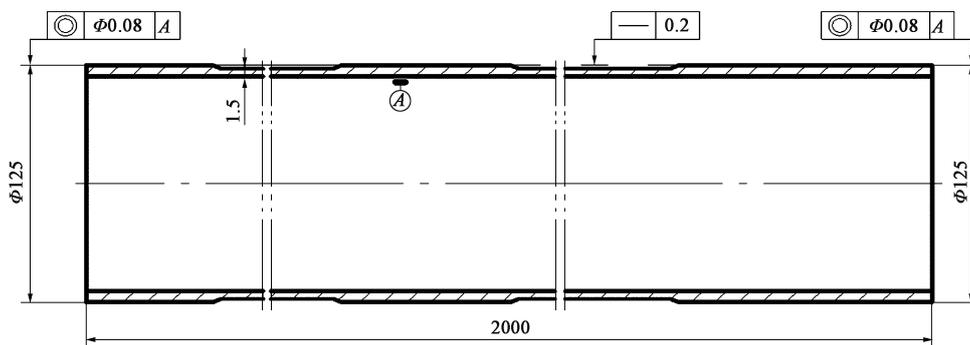


图 2 产品 2 的金属壳体结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of metal shell structure for product 2

国内对 30CrMnSiA 钢圆筒旋压成形研究较多。某产品的长度为 2300 mm、直径为 $\Phi 206$ mm、壁厚为 3 mm, 在研制前期使用管料机加工成形工艺方

法, 材料利用率仅为 11%, 后经研究改为旋压方案, 材料利用率提高 1 倍以上, 生产效率也得到提升^[3], 研究内容显示了旋压工艺的优越性; 30CrMnSiA 钢采

用正火+回火处理后旋制出长度为 3800 mm、长径比为 12 的圆筒^[4]；任长洁等^[5]旋压出长度为 1600 mm、壁厚为 1.2 mm、环带壁厚为 2.5 mm 的变壁厚 30CrMnSiA 钢圆筒，壁厚梯度为 1.3 mm；李增辉等^[6]对球化热处理后的 30CrMnSiA 钢进行了连续旋压成形（旋压道次间不退火），可直接旋压出长度为 4200 mm、直径为 $\Phi 265$ mm、壁厚为 2.8 mm、直线度为 1.0 mm 的高精度变壁厚圆筒。

这些研究成果正是基于 30CrMnSiA 钢优良的旋压工艺性能而加工出军工产品，30CrMnSiA 钢已成为军工领域较为成熟的工艺材料。

1.3 30Cr3 钢壳体

图 3 为高精度导弹燃烧室壳体结构（以下简称产品 3），壳体材料为 30Cr3SiNiMoVA 超高强度钢（以下简称 30Cr3 钢），抗拉强度 $R_m \geq 1550$ MPa、伸长率 $A \geq 9\%$ 、圆度为 0.25 mm、直线度为 0.5 mm。

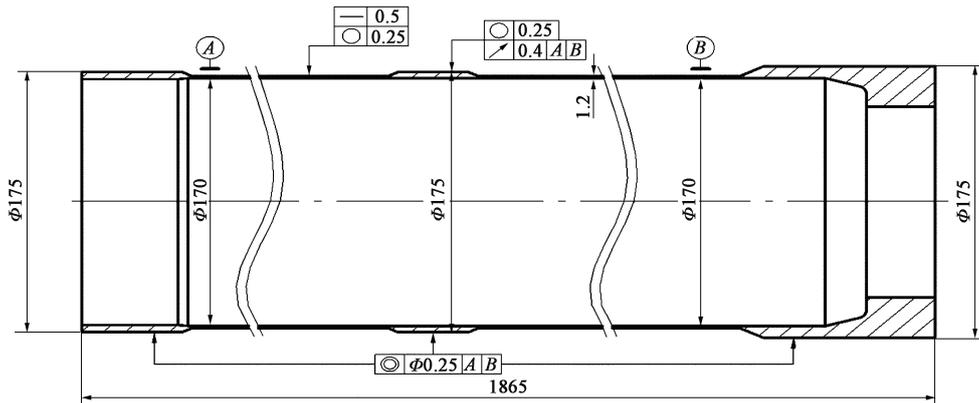


图 3 产品 3 的金属壳体结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of metal shell structure for product 3

30Cr3 钢是在 F154 钢的基础上，提高了碳、钼的含量，去掉了钨元素，工艺性能与 F154 钢相当，亦可实现调质态旋压加工。文献 [7] 在研制薄壁 30Cr3 钢壳体时选择了形变热处理技术途径，获得了高精度产品；文献 [8] 研究发现，30Cr3 钢的微观组织在通过形变热处理工艺后的变形较小，而且得到了稳定的组织，使得工件的性能更加趋于稳定。这些研究为研制小直径固发金属壳体提供了加工技术路线借鉴。

1.4 T250 钢壳体

图 4 为高精度导弹燃烧室壳体结构（以下简称产品 4），其中， $D_1 \sim D_5$ 为结构的直径，材料为 T250 超高强度马氏体时效钢，抗拉强度 $R_m \geq 1700$ MPa、伸长率 $A \geq 6\%$ ，薄壁筒段的圆度为 0.25 mm、直线度为 0.75 mm，圆度为 QJ 3199—2004^[2]中的一级标准要求。

T250 钢被广泛应用于航空、航天、原子能等尖端领域^[9]，该钢的旋压冷作硬化相对较小，旋压道

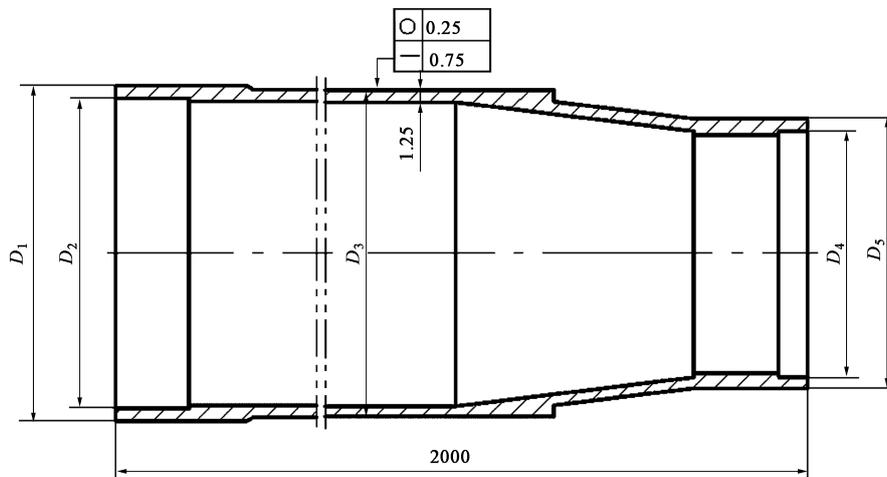


图 4 产品 4 的金属壳体示意图

Fig. 4 Schematic diagram of metal shell structure for product 4

次间可以不进行固溶热处理^[10],它已成为一种制备发动机金属壳体的理想材料。中国航天三江集团江北厂旋压出直径为 $\Phi 1200$ mm、壁厚为 3.9 mm、直线度为 1 mm 的 T250 钢等径圆筒。

以上 4 种产品的最大共同特点是变壁厚、形状精度高。选择何种技术路线,能够实现产品形/性一体化控制目标,至关重要。

2 实现金属壳体性能指标的技术途径及强化机理

用于制造火箭发动机壳体的主要金属材料有:高合金超高强度马氏体时效钢 T250、C250,低合金超高强度钢 D406A、D6AC、30Cr3、F154,合金结构钢 30CrMnSi。通过研究不同结构类型的发动机金属壳体的研制工艺,总结出以上钢种实现壳体力学性能指标的技术途径。

(1) 途径 1:相变强化。D406A、D6AC、30Cr3、F154、30CrMnSi 钢制金属壳体均可通过调质热处理实现产品要求的力学性能指标。此项技术途径在绝大多数的固发金属壳体中得到应用,工艺成熟,但其致命弱点是薄壁壳体经整体调质热处理后会产生较大的变形,影响产品形状的精度的控制。

(2) 途径 2:形变热处理强化(即调质预强化+形变强化的综合工艺方式)。D6AC、30Cr3、F154、30CrMnSi 这 4 个钢种由于塑韧性优良,因此,可在调质态下进行旋压加工,这种基于坯料调质预强化后的旋压加工技术在此简称为形变热处理。形变热处理技术在生产中的应用较少,其最大的优点为热处理变形小、产品精度易于控制,但它的工艺难点为如何解决热处理工艺参数与旋压工艺参数之间的协调耦合关系。形变强化即加工硬化,是指金属在变形过程中当外力超过屈服强度后,如果要使塑性变形继续进行,就必须不断增加外力,从而表现为真实应力-真实应变曲线中的应力不断上升。形变强化机理的本质就是金属材料经冷塑性加工后位错运动的阻力增加。

(3) 途径 3:形变时效强化(即时效强化+形变强化)。T250、C250 这类以超低碳马氏体为基体并通过热处理产生金属间化合物来沉淀硬化的超高强度钢,是依靠金属间化合物的弥散析出实现金属基体强化的。此类钢种的优点为:热处理工艺简捷、变形小,工艺性能优良,热处理后具

备优良的塑韧性,是制备固发金属壳体的关键材料。时效热处理可使此类材料强度增加 1000 MPa 以上,该途径也是马氏体时效钢实现基体强化的重要途径。材料时效前可进行旋压冷变形,加工硬化带来的强度增量约为 100 MPa,对金属制件强度的贡献量比较小。

3 细长薄壁金属壳体工艺设计

在进行金属壳体工艺设计时,需综合考虑原材料工艺特性、产品结构以及精度要求。产品 1、产品 2、产品 3 在形状精度方面均不低于 QJ 3199—2004^[2]中的一级精度要求,属于精密级的发动机壳体。鉴于这 3 种结构形式的壳体所用的金属材料均具有良好的旋压工艺性能,适宜进行形变热处理加工,因此,工艺设计选择“调质预强化+形变强化(简称形变热处理)”的技术途径,以解决薄壁金属壳体产品形状精度的控制技术难题。此方案的基本工艺流程为:预制坯→调质预强化→毛坯精加工→旋压形变→低温时效处理→金属壳体精加工→常规水压试验→交检入库。

形变热处理在工程应用中存在 3 个技术难点:(1)坯料预强化的具体强度指标;(2)选择合适的旋压减薄率,既能实现产品成形,又能保证形变强化后产品的最终强度要求;(3)旋压后的时效制度选择,既能释放旋压残余应力,又不至于影响金属壳体的强度变化。

基于塑性形变强化机理以及相变强化机理,在对 F154 钢、30CrMnSi 钢、30Cr3 钢壳体进行形变热处理加工时,设计了不同调质回火温度、不同旋压减薄率的试验方案,旋压单道次的材料减薄率不能大于极限减薄率^[11],道次减薄率过大会造成工件塑性流动失稳而起皮,道次减薄率过小会引起工件壁厚变形不充分而产生裂纹^[12]。旋压后的金属壳体需通过低温时效热处理,释放形变,强化宏观应力,实现产品的高精度控制效果。研究表明,回火温度、旋压减薄率、时效温度参数是薄壁金属壳体形变热处理工艺中的关键、核心要素,必须严格控制。

产品 4 所用材料为 T250 马氏体时效钢,选用了上述途径 3 的加工技术方案。该类材料的金属壳体的加工通用流程为:原材料固溶处理→毛坯精加工→旋压成形→固溶热处理(必要时进行)→旋压→时效处理→壳体精加工→常规水压试验→交检

入库。

4 4 种典型产品的研制情况

4.1 3 种形变热处理产品

在产品 1、产品 2、产品 3 的研制初期，对相变强化和形变热处理两种技术方案加工出的试验产品精度进行了对比分析，两种技术方案下产品的形位精度差别较大：相变强化方案加工的壳体圆跳动在 1.30 mm 以上，而形变热处理方案所加工的壳体圆跳动在 0.35 mm 以内，充分表明形变热处理方案

加工产品的精度优于相变强化方案加工的产品。对于变壁厚细长旋压金属壳体而言，中间环带部位的圆跳动指标是衡量旋压工序质量的一项关键指标，它是产品直线度与圆度的综合体现。在产品工艺实施过程中，圆跳动是关键控制指标，如有超标，壳体将难以满足后续车加工工艺余量要求。表 1 是 3 种形变热处理产品的工艺关键参数及形状精度数据。

上述 3 种产品历经研制和量产，工艺方案与相关工艺参数经过了数次优化修正，实现了产品形/性一体化工艺控制目标。

表 1 3 种形变热处理产品的工艺关键参数和形状精度

Table 1 Key process parameters and geometric accuracy of three thermomechanical treatment products

产品	材料牌号	坯料厚度/ mm	坯料回火温度/ ℃	壳体时效温度/ ℃	旋压减薄率/ %	直线度/mm	圆度/mm
1	28Cr3SiNiMoWVA	5	600	380	78	0.12~0.33	0.18~0.25
2	30CrMnSiA	9	610	360	77	0.20~0.34	0.11~0.20
3	30Cr3SiNiMoVA	6	580	420	80	0.36~0.52	0.16~0.28

选择坯料调质回火制度是形变热处理工艺中的第 1 关键环节，以保证坯料基材预先达到一定强度后再经旋压形变强化达到预期的力学性能。如果调质坯料的性能偏低，形变后的产品基材的力学性能就会偏低，达不到设计要求；如果调质坯料的性能偏高，必将带来旋压形变开裂风险。

旋压减薄率是形变热处理工艺中的第 2 关键因素。华南理工大学夏琴香老师等^[13]研究了错距旋压技术方案中减薄率、进给比、轴向错距量对圆筒形状精度的影响关系，强力旋压道次减薄率是影响旋压圆筒成形质量的重要因素，它直接影响旋压件的精度。为了实现薄壁细长壳体的高精度制造，旋压工艺设计非常关键，包括正旋或反旋方式、旋压减薄率、毛坯结构设计、旋压道次规划、工艺参数选择（进给比、旋轮结构）等因素，均需慎重分析计算后确定。

壳体旋压后的时效热处理制度是形变热处理工艺中的第 3 关键因素。如果选择的制度不合适，旋压形变的残余应力得不到有效释放，工件必将产生一定的变形。合理的时效制度可以改善材料的韧性指标——伸长率，但会牺牲微量的形变强度。

4.2 产品 4 的 T250 钢壳体

鉴于产品 4 的金属壳体尾部有锥段，毛坯结构

直接设计为直筒段加锥段结构。加工此毛坯的一种方法是采用厚壁管材直接机加工成形；另一种方法是采用薄壁管材进行一端挤压收口后再车加工成形。为了节约原材料成本，工厂与协作单位开展了 T250 钢材料的锻造挤压技术研究，成功实现了薄壁管材热挤压收口工艺过程，就该型号单件产品而言，原材料消耗直接降低 50% 以上。

虽然 T250 钢的加工硬化指数低、旋压工艺性能好，但其高强高韧性的性能会给旋压工件的精度控制造成一定困难。该型号从研制初期至批量生产前，出现过产品质量和工艺不稳定的问题，研制初期的产品合格率不足 30%，单件产品的尺寸超差项在检验项目中占比 40% 以上。

为了稳定产品质量和工艺，在产品工艺定形前，工厂在旋压、热处理、机加工 3 个专业方面进行了技术攻关，解决了以下技术关键，成功实现了产品质量的稳定化控制：

(1) 掌握了 T250 钢壳体高精度制造的“贴模收径”旋压成形技术；

(2) 掌握了 T250 钢薄壁壳体固溶（温度为 $(820 \pm 10)^\circ\text{C}$ ）、时效（温度为 $(520 \pm 20)^\circ\text{C}$ ）热处理关键参数以及变形规律，制定了变形控制工艺措施；

(3) 依据车加工的变形规律，设计、制作了金属壳体精加工专用的工装和变形控制材料。

5 结论

(1) 发动机金属壳体的加工技术途径, 需由壳体材料种类、产品形状精度指标综合确定, 高精度细长薄壁金属壳体多选择形变热处理技术方案。

(2) 选择 (570~610)℃ 的坯料预强化调质回火温度和 75% 以上的旋压变形率, 可实现 F154 钢、30CrMnSi 钢、30Cr3 钢壳体形/性一体化控制目标, 形变强化对强度的贡献率约为 20%~30%。

(3) T250 马氏体时效钢按固溶温度为 (820±10)℃、时效温度为 (520±20)℃ 的制度处理后获得抗拉强度不低于 1700 MPa 的发动机金属壳体。

参考文献:

- [1] 白增宏. 细长薄壁容器变形控制研究 [J]. 内蒙古科技与经济, 2011, 239 (13): 108-109.
Bai Z H. Research on deformation control of slender thin-wall vessel [J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2011, 239 (13): 108-109.
- [2] QJ 3199—2004, 固体火箭发动机燃烧室壳体通用规范 [S].
QJ 3199—2004, General specification for chamber case of solid rocket motor [S].
- [3] 王连义, 赵国伟, 高勃石, 等. 30CrMnSiA 钢薄壁变截面壳体旋压成形 [J]. 精密成形工程, 2013, 5 (3): 86-88.
Wang L Y, Zhao G W, Gao B S, et al. Spinning process of 30CrMnSiA steel shell with thin-walled variable cross-section [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5 (3): 86-88.
- [4] 黄敬, 李辉, 李锐, 等. 小直径大长径比薄壁圆筒旋压工艺研究 [J]. 航天制造技术, 2013, (3): 30-33, 37.
Huang J, Li H, Li R, et al. Technological study on small diameter big length diameter ratio thin-wall cylinder spinning [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013, (3): 30-33, 37.
- [5] 任长洁, 杨延涛, 张立武. 突变壁厚筒形件精密旋压工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (23): 112-114.
Ren C J, Yang Y T, Zhang L W. Research on precise spinning process for abrupt wall-thickness cylinder [J]. Hot Working Technology, 2011, 40 (23): 112-114.
- [6] 李增辉, 温树斌, 韩冬, 等. 大长径比薄壁圆筒旋压精度控制工艺研究 [J]. 特种成形, 2009, 44 (5): 102-105.
Li Z H, Wen S B, Han D, et al. Research on spinning precision control [J]. Special Forming, 2009, 44 (5): 102-105.
- [7] 王树松. 30Cr3 钢形变热处理工艺研究 [J]. 新技术新工艺, 2006, (3): 64-66.
Wang S C. 30Cr3 steel rocket engine shell ausforming [J]. New Technology & New Process, 2006, (3): 64-66.
- [8] 张小娟, 王树松, 余宁, 等. 形变热处理对 30Cr3SiNiMoVA 钢组织的影响 [J]. 材料热处理学报, 2015, 36 (10): 163-169.

- Zhang X J, Wang S C, Yu N, et al. Effect of thermomechanical treatment on microstructure of 30Cr3SiNiMoVA steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36 (10): 163-169.
- [9] 席莎, 赵西成, 杨西荣, 等. 超高强度马氏体时效钢的研究与应用 [J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37 (3): 131-134.
Xi S, Zhao X C, Yang X R, et al. Research and application of ultra-high strength maraging steels [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37 (3): 131-134.
- [10] 肖志兵, 李晓谦, 陈国琼, 等. T250 钢大直径薄壁圆筒旋压工艺试验研究 [J]. 航天制造技术, 2006, (4): 17-20, 24.
Xiao Z B, Li X Q, Chen G Q, et al. Experimental study on spinning process of T250 steel with large diameter and thin wall cylinder [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2006, (4): 17-20, 24.
- [11] 赵琳瑜, 韩冬, 张立武, 等. 典型零件旋压成形技术应用发展 [J]. 航天制造技术, 2007, (2): 5-10.
Zhao L Y, Han D, Zhang L W, et al. Application and development of spinning forming technology for typical parts [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2007, (2): 5-10.
- [12] 赵云蒙, 李彦利. 旋压技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
Zhao Y H, Li Y L. Spinning Technology and Application [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [13] 夏琴香, 张鹏, 程秀全, 等. 筒形件错距旋压成形工艺参数的正交试验研究 [J]. 锻压技术, 2012, 37 (6): 42-46.
Xia Q X, Zhang P, Cheng X Q, et al. Orthogonal experimental study on forming process parameters of tube stagger spinning [J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37 (6): 42-46.

警惕不法网站, 保障投稿安全

近期, 本刊接到多名作者投诉, 网络上出现冒充《锻压技术》杂志官方网站的伪网站, 如 www.dyjszz.cn, 这些网站盗用本杂志官网内容及相关行业信息, 误导和欺骗广大投稿作者, 骗取文章版面费、套取作者文章及个人信息, 侵犯了广大作者的切身权益。

特此声明, 本刊唯一官方网站为 www.fstjournal.net, 投稿方式为网站注册登录投稿, 不接受邮箱投稿。请作者投稿时务必认准杂志官方网站, 谨防受骗。

本刊郑重警告伪网站相关人员尽快停止违法行为, 否则将严肃对待, 并将运用一切法律手段维护本刊的权利。

请广大读者协助本刊监督网络上的不法行为, 一经发现, 请联系本刊, 本刊将及时处理, 共同努力营造良好的期刊网络氛围。

《锻压技术》杂志联系方式: fst@263.net; 010-62920652。

《锻压技术》编辑部