

# Ti55531 钛合金筒形件的旋压成形

写 旭 张立武 杨延涛 曹学文

(西安航天动力机械厂,西安 710025)

**文 摘** 分析了成形参数对 Ti55531 钛合金筒形件旋压成形的影响规律。结果表明:采用 880℃+保温 30min/空冷的热处理可获得较好的强塑性匹配;当旋压温度为 750~800℃时,金属流动性好,筒形件外观质量好,且随着旋压道次增加,旋压温度可适当降低,但不应低于 650℃,旋压极限减薄率可达 80%左右;进给比在 0.45~0.78 mm/r 取值,在开始道次中采用大点的进给比,使工件较好贴模,在最后道次中采用相对小的进给比便于工件脱模;道次减薄率在 30%~45%时较为合适,有利于旋压成形。

**关键词** 钛合金,筒形件,旋压成形

中图分类号: TG3

DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2016.06.010

## Spinning of Ti55531 Titanium Alloy Cylinder

XIE Xu ZHANG Liwu YANG Yantao CAO Xuewen

(Xi'an Aerospace Power Machinery Factory, Xi'an 710025)

**Abstract** The influence law of forming parameters on the spinning of Ti55531 titanium alloy cylinder was analyzed. The results showed that using solid solution heat treatment system (880℃+insulation 30min/air cooling) Ti55531 titanium alloy can achieve better matching between the strength and plasticity. When the spinning temperature is 750 to 800℃, the metal fluidity is good, the apparent quality of spinning cylinder is good. And with the increase of spinning passes, spinning temperature can be reduced appropriately, but the final spinning temperature is not lower than 650℃, spinning limit thinning rate achieves about 80%. The selecting of feed ratio is between 0.45 to 0.78 mm/r, the using of large feed ratio in the beginning pass can make the workpiece better fit the mould. The relative small feed ratio make the workpiece strip mould easily in the final pass, the pass thinning rate between 30% to 45% is more appropriate, which benefit spinning.

**Key words** Titanium alloy, Cylinder, Spinning

### 0 引言

钛合金与其他结构材料相比,具有比强度高、耐热性好,同时具有使用温度范围宽(-269~600℃)、抗蚀性、无磁性、低阻尼和高低温性能好等特性,受到航空航天业的极大重视<sup>[1]</sup>。随着航空航天事业的迅速发展,新型高强高韧钛合金也得到了迅速地开发和应用。Ti55531 钛合金是俄罗斯的 VSMPO 公司与法国 AIRBUS 公司联合开发的一种新型高强高韧近  $\beta$  型钛合金<sup>[2]</sup>,该合金具有良好的淬透性和较宽的加工工艺范围,特别适合制造须承受巨大应力的部件,现已应用在 A380 客机上。钛合金旋压成形技术已成为加工多种钛合金回转型薄壁壳体零件的首选方法。

目前,国内外关于 Ti55531 钛合金的研究主要集中在热处理制度与组织-性能匹配、热变形机制及微观结构方面<sup>[3]</sup>;随着固溶温度的升高及时效时间的增加(2~8 h),合金强度升高塑性降低<sup>[4]</sup>;高温变形时, $\beta$  相的动态回复和  $\alpha$  晶粒的旋转主要发生在( $\alpha$ + $\beta$ )两相区,同时该合金的进一步变形可使  $\beta$  相发生连续动态再结晶<sup>[5]</sup>;在大变形、高温和低应变速率条件下,几何动态再结晶发生在  $\beta$  相晶界,该合金中出现的 $\beta$  相的不稳定流动与绝热条件下加热导致的局部流动密切相关<sup>[6]</sup>。但有关该合金旋压成形工艺的研究还未见报道。因此,本文将热模拟压缩试验和旋压成形工艺试验相结合,研究一定变形条件下 Ti55531 钛合

收稿日期:2015-12-21;修回日期:2016-06-27

作者简介:写旭,1990 年出生,硕士,主要从事金属材料塑性成形及数值模拟研究。E-mail:994243252@qq.com

金筒形件旋压成形的可行性,为该合金筒形件旋压成形工艺制定提供依据。

## 1 试验

### 1.1 材料及仪器设备

Ti55531 钛合金棒材,上海宝钢,相变点是 850℃,原始状态为固溶时效态,其化学成分为:Ti-5.5Al-5.25Mo-5.25V-2.65Cr-1Zr。CMT5305 电子万能试验机,深圳新三思材料检测有限公司;Gleeble 3500 热模拟试验机,美国 DSI 公司;HO-018 数控强力旋压机,上海机床厂;UT305A 红外测温仪,优利德集团有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 常温力学性能匹配试验

在原始棒材上沿轴向切取  $\Phi 110 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$  的圆柱形试样 15 根,然后每 3 根试样为一组进行不同条件下的固溶处理,工艺参数见表 1。将固溶处理后的试样加工成拉伸试样,进行拉伸试验获得抗拉强度和延伸率,取每组的平均值作为最终试验数据。

表 1 固溶处理制度

Tab.1 System of solid solution treatment

编号	固溶处理制度
1#	800℃+保温 30min,空冷
2#	840℃+保温 30min,空冷
3#	860℃+保温 30min,空冷
4#	880℃+保温 30min,空冷
5#	920℃+保温 30min,空冷

#### 1.2.2 高温变形参数

根据 1.2.1 的结果将 Ti55531 钛合金试样进行固溶处理,然后加工成  $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  的压缩试样。为减小压缩时压头与试样上、下端面之间的摩擦而获得单向应力,试样与试验机夹头之间采用镍基高温润滑剂润滑。热模拟试验温度选取  $\beta$  单相区的 900℃,  $T_\beta$  温度 850℃ 和  $\alpha+\beta$  两相区的 800、750、700、650 及 600℃,总计 7 个温度点。应变速率根据旋压工艺参数确定,旋压有效应变速率计算公式<sup>[7]</sup>如下:

$$\varepsilon_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{v_0 \sin \alpha_p}{t_0 (1 - \varphi_t)} \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left( \frac{t_{\theta f}}{t_f} \right)^2 \sin^2 \alpha_p} \quad (1)$$

式中,  $v_0$  为进给速率,  $\alpha_p$  为旋轮成形角,  $\varphi_t$  为厚度减薄率,  $t_0$  为旋压前的壁厚,  $t_{\theta f}$  为  $r=r_f$  弧上不同  $\theta$  ( $\alpha_p > \theta > 0$ ) 层距内表面的值,  $t_f$  为旋压后工件的壁厚。由公式 (1) 所得应变速率的级次大体为  $10^{-2} \sim 10 \text{ s}^{-1}$ , 根据旋压工艺参数,  $v_0$  最大为 85 mm/min,  $\alpha_p$  为 22.5°, 设计的坯料厚度为 10 mm, 最终壁厚为 2 mm, 道次厚度变化为 10 mm → 6 mm → 3.5 mm → 2 mm, 相应的厚度减薄率  $\varphi_t = 40\%、41.7\%、42.9\%$ , 由式 (1) 可知  $0 < t_{\theta f} < t_f$ , 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 6 期

应变速率随  $t_{\theta f}$  的取值变化不大, 本试验取  $t_{\theta f} = 0.5 t_f$ , 由此计算得到的变形速率分别为 0.171、0.303、0.541  $\text{s}^{-1}$ , 得出旋压的最大变形速率不超过 1  $\text{s}^{-1}$ , 由此热模拟的应变速率选择 0.01、0.1、1  $\text{s}^{-1}$  三个值, 设计变形量为 55%。试样采用真空感应加热, 达到设定温度后保温 5 min 再进行压缩变形, 变形过程中利用试验设备提供的分析功能, 直接获得真应力-真应变关系曲线。

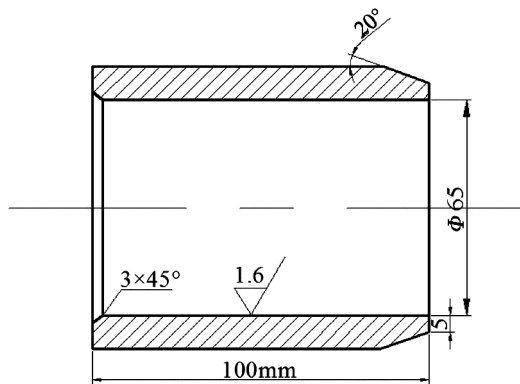
#### 1.2.3 可旋性工艺试验

金属可旋性, 通常指该金属材料经受旋压变形而不产生破裂的最大能力。材料的可旋性定义可表达为材料在破裂前所能承受的极限壁厚减薄率  $\varphi_{t_{\max}}$ , 即:

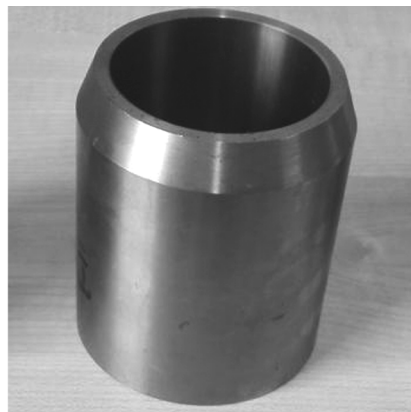
$$\varphi_{t_{\max}} = \frac{t_0 - t_{f_{\min}}}{t_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $\varphi_{t_{\max}}$  为极限壁厚减薄率,  $t_0$  为坯料的原始壁厚,  $t_{f_{\min}}$  为旋压件的最小壁厚。

可旋性试验坯料为固溶处理筒形坯料, 坯料内径由旋压芯模直径、坯料与芯模之间的间隙决定, 一般间隙取 0.1 ~ 0.3 mm, 以利于装料和成形时的材料流动<sup>[8]</sup>。本文所用的芯模直径为 64.7 mm, 长度为 40 mm, 通过计算最终确定坯料的内径为  $\Phi 65 \text{ mm}$ , 长度 100 mm, 毛坯内外表面粗糙度要求达到  $Ra 1.6 \sim 3.2 \mu\text{m}$ , 壁厚规格为 10 mm, 具体如图 1 所示。



(a) 尺寸图



(b) 实物图

图 1 Ti55531 钛合金旋压毛坯

Fig.1 Spinning blank of Ti55531 titanium alloy

可旋性试验采用三旋轮错距反旋方式,错距量  $L_{AB}=6\text{ mm}$ ,  $L_{BC}=8\text{ mm}$ ,芯模转速为  $112\text{ r/min}$ ,不进行道次退火,最终将壁厚旋到  $2\text{ mm}$ 。为了保证坯料受热均匀,旋压前坯料和芯模各自预热到一定的温度后再进行旋压,变形过程中采用红外测温仪对温度进行测量并采用氧乙炔火焰枪不断给坯料补热。

## 2 结果与分析

### 2.1 固溶温度对力学性能的影响

以温度( $T$ )为横坐标,抗拉强度( $\sigma_b$ )和延伸率( $\delta$ )为纵坐标,做出温度与抗拉强度和延伸率的关系曲线如图2所示。可以看出:随着固溶温度的升高,Ti55531钛合金的抗拉强度不断减小,而延伸率则先持续增大后减小。在  $800\sim 860^\circ\text{C}$ ,随着温度的升高,合金的抗拉强度和延伸率的变化幅度不是很大,当固溶温度由  $860^\circ\text{C}$ 变为  $880^\circ\text{C}$ 时,合金的抗拉强度下降幅度最大,达到  $57\text{ MPa}$ ,同时延伸率也达到最大,即最大延伸率为  $17.03\%$ ,在  $880\sim 920^\circ\text{C}$ ,随着温度的增加,合金的抗拉强度和延伸率都降低,但幅度都不大。在  $880^\circ\text{C}$ 时,Ti55531钛合金的强度和塑形匹配良好,因此固溶处理参数选择  $880^\circ\text{C} + \text{保温 } 30\text{min}/\text{空冷}$ 。

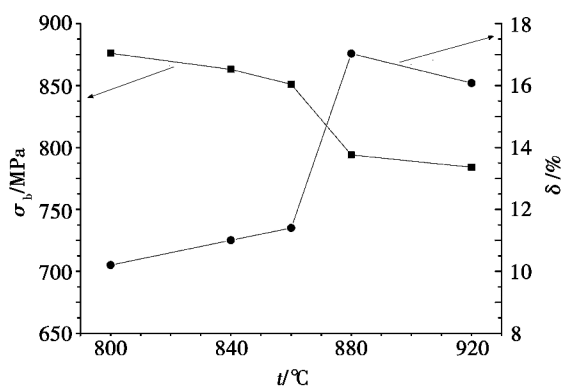


图2 固溶温度对Ti55531钛合金力学性能的影响  
Fig.2 Effect of solution temperature on the mechanical properties of the Ti55531 titanium alloy

### 2.2 旋压温度对可旋性的影响

Ti55531钛合金在进行旋压成形时,温度要选择适当,温度过低,金属的塑性差,容易出现裂纹;温度过高,则成形后的金相组织粗大,力学性能降低。从图3可以看出随着温度的升高,变形抗力减小,在  $600\sim 700^\circ\text{C}$ ,随着温度升高变形抗力下降很快,温度效应比较显著,  $700\sim 850^\circ\text{C}$ 次之,  $850^\circ\text{C}$ 到  $900^\circ\text{C}$ 下降的程度则更小。但在  $650\sim 700^\circ\text{C}$ 之间,应变速率为  $1/\text{s}$ 时,随着温度的降低,变形抗力略有增大,这是由于大变形速率下变形金属的硬化速率超过回复和再结晶产生的软化速率,结果使变形抗力升高。由图3可以看出,在  $650\sim 800^\circ\text{C}$ ,变形抗力有利于旋压成形。

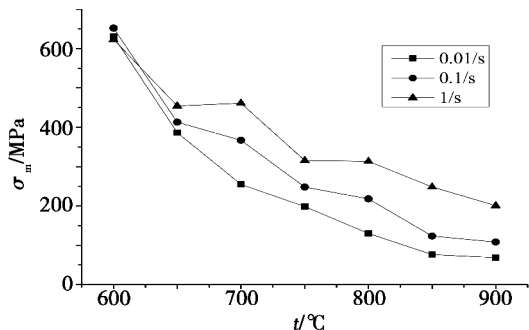


图3 最大变形抗力与温度的关系

Fig.3 Curve of maximum deformation resistance and temperature

在进行Ti55531钛合金可旋性试验时,当旋压温度为  $600\sim 650^\circ\text{C}$ 时,由于变形温度较低,一方面合金变形抗力大和内层金属流动性差,另一方面合金塑性差,导致筒体出现内裂纹,旋压减薄率仅为  $20\%$ (图4)。当旋压温度为  $750\sim 800^\circ\text{C}$ 时,金属流动性好,未出现裂纹、鼓包和堆积等缺陷,筒形件外观质量好,且随着旋压道次增加、壁厚变薄,旋压温度可适当降低,但幅度不可过大,不应低于  $650^\circ\text{C}$ ,旋压极限减薄率可达  $80\%$ 左右。当旋压温度为  $850\sim 900^\circ\text{C}$ 时,筒形件产生了起皮和堆积问题,且发生了严重的扭曲现象,这是由于旋压温度过高,合金变形抗力过小,未变形区无法保持稳定状态,造成变形区金属失稳,进一步产生堆积和折叠起皮。



图4 出现裂纹的工件

Fig.4 Cylindrical workpieces of Ti55531 titanium alloy by spinning

### 2.3 进给比对可旋性的影响

旋压进给比是芯模每转一圈时旋轮沿芯模母线移动的距离。流动旋压时,进给比对工件直径的胀缩和工件质量有着显著的影响。进给比过大或过小都可能造成机床的震动或爬行,其值过大,生产效率提高,有利于旋压件贴模,但增大表面粗糙度;过小则有利于降低表面粗糙度。由图5可以看出,除  $600^\circ\text{C}$ 以外,在同一温度下,随着应变速率的增加,Ti55531钛合金变形抗力增大,但是增加的幅度不大,可以认为,Ti55531钛合金不是应变速率敏感材料。

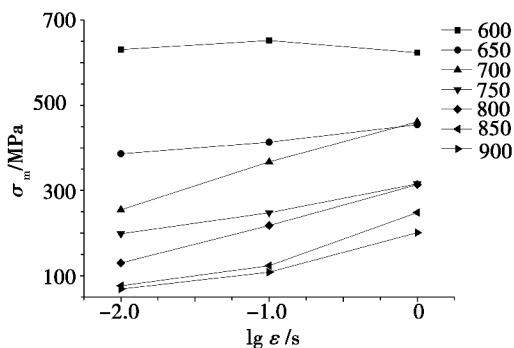


图5 最大变形抗力与应变速率关系

Fig.5 Curve of maximum deformation resistance and strain rate

当进给比取 1.2 mm/r 时,起旋端出现了开裂问题和螺旋线扭纹,工件表面粗糙度较大,同时贴模比较严重,给工件的卸载带来很大困难,见图 6。当进给比取 0.2 mm/r 时,筒形件出现扭曲和堆积,表面质量严重下降。当进给比在 0.45~0.78 mm/r 时,筒形件变形稳定,表面质量良好,因此在开坯旋压时采用偏大的进给比,使工件较好贴模,终旋道次中采用相对小的进给比使工件便于脱模。

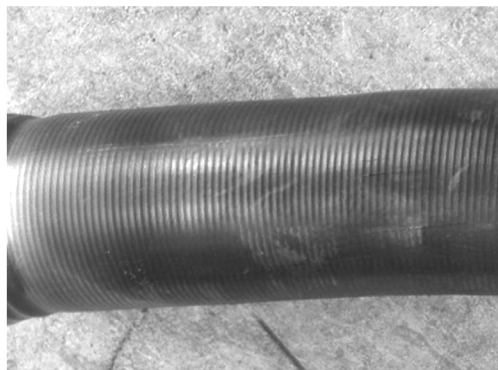


图6 大进给条件下成形的 Ti55531 钛合金筒体

Fig.6 The Ti55531 titanium cylinder under large feed ratio

## 2.4 道次减薄率的分析

道次减薄率对工件的成形质量和精度有重要影响。道次减薄率过大造成金属畸变和回弹增大,精度降低;过小则使金属变形不均匀,出现翘曲、皱纹等缺陷。当道次减薄率为 50% (即由 10 mm 压到 5 mm) 时,旋压件表面出现了严重的起皮现象,如图 7 所示,造成这一现象的原因是压下量过大,旋压变形热急剧增大,使得合金变形抗力降低,变形失稳,旋轮前金属材料出现堆积,堆积的材料被旋轮压入产生折叠造成起皮。当道次减薄率为 20% (即由 10 mm 压到 8 mm) 时,旋压件内表面产生开裂现象,这是由于变形区金属未压透,内外层金属流动不一致,内层金属受到严重拉应力而出现开裂。当开坯旋压减薄率为 30%~40%,后续旋压道次减薄率在 40%~45% 时,金属流动稳定,同时筒体壁厚较均匀,尺寸精度高,经测量不同部位最终壁厚的平均尺寸误差小于 2%。因

此,道次减薄率在 30%~45%,有利于 Ti55531 钛合金筒形件旋压成形。

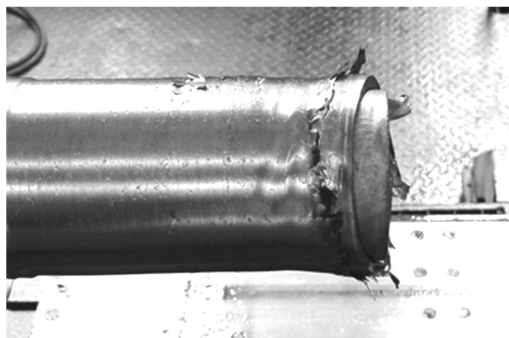


图7 筒形件外表起皮

Fig.7 Peeling on surface of cylindrical workpiece

## 3 结论

(1) 对于 Ti55531 钛合金采用 880℃ + 保温 30min/空冷的固溶热处理制度,可获得较好的强塑性匹配;

(2) 合金具有良好的热旋性,当旋压温度为 750~800℃ 时,金属流动性好,筒形件表观质量好,且随着旋压道次增加,旋压温度可适当降低,但不应低于 650℃,旋压极限减薄率可达 80% 左右;

(3) 合金不是应变速率敏感材料,选取进给比在 0.45~0.78 mm/r、道次减薄率在 30%~45% 时,可旋出表观质量好、尺寸精度高的筒形件。

## 参考文献

- [1] 王以华,林健,张海英,等.钛合金的应用前景及其锻压技术[J].金属加工·成形技术与装备专题,2009(21):12-15.
- [2] 付艳艳,宋月清,惠松晓,等.热处理对 VST55531 钛合金的组织和拉伸性能的影响[C].第十二届中国有色金属学会材料科学与合金加工学术研讨会文集,2007:244-248.
- [3] 高玉社,李少强,张钢,等.热处理工艺对 Ti55531 钛合金组织及性能的影响[J].西安工业大学学报,2011,31(4):365-369.
- [4] 黄剑锋,雍岐龙,孙新军,等.热处理工艺对 Ti55531 钛合金显微组织与拉伸性能的影响[J].机械工程材料,2014,38(8):20-23.
- [5] WARCHOMICKA F, POLETTI C, STOCKINGER M. Study of the hot deformation behaviour in Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr[J]. Materials Science and Engineering A, 528(2011):8277-8285.
- [6] MARTINA DIKOVITS, CECILIA POLETTI, FERNANDO WARCHOMICKA. Deformation Mechanisms in the Near-β Titanium Alloy Ti-55531[J]. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, VOLUME 45A, MARCH, 2014:1586-1596.
- [7] 陈适先,贾文铎,曹庚顺,等.强力旋压工艺与设备[D].北京,国防工业出版社,1986:56,68.
- [8] 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].金属铸锻焊技术,2011,40(23),112-114.