

钛合金薄壁舱段热普旋过程 凸缘失稳现象研究*

Research on Flange Instability During Heat Conventional Spinning of Titanium Alloy Thin-Wall Cabin

航天特种材料及工艺技术研究所 吕昕宇 雷 鹏 许 沂



吕昕宇

博士,主要从事高温钛合金热成形技术研究。

钛合金因具有轻质、高强、耐腐蚀等诸多优点而备受青睐,被越来越多地应用在航空航天飞行器中。旋压能实现导弹舱体类零件的无缝成形,使其强度、尺寸精度、抗疲劳性能大大提高,钛合金热旋压成形是实现无缝舱段类零件的重要手段。然而钛合金为典型的难成形材料,其屈服

比高、回弹严重、工艺窗口窄,需在高温下旋压成形。对于大尺寸钛合金零件,其热普旋成形尺寸精度较难控制,凸缘失稳是钛合金热普旋成形过程中较为常见的问题之一,直接影响着钛合金热旋零件的成败,本文结合钛合金热普旋试验中存在的凸缘失稳问题进行深入分析,对钛合金热普旋工艺具有一定的指导意义。

试验

试验采用双旋轮数控旋压机 DENN TDR C 120-2 FC。采用氧气+丙烷气体的烤枪加热。初始毛坯为半锥角 300° 的 TC4 钛合金强旋零件,零

件小端直径 395mm、厚度 2mm,普旋芯模半锥角分别为 22°、5°。加热过程中采用玻璃润滑剂进行表面保护,玻璃润滑剂在高温时与金属基体强有力地结合,从而保证在高温旋压过程中防止氢、氧、氮等气体污染。图 1 为钛合金热普旋成形过程。

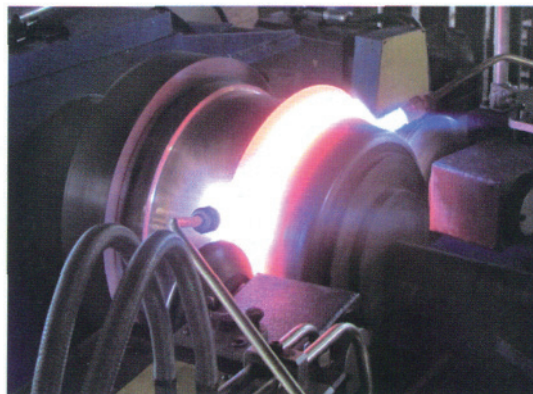


图1 钛合金热普旋成形过程

* 总装先进制造技术项目(513180903)资助。

结果与分析

1 凸缘失稳现象

在 TC4 钛合金热普旋成形过程中,除了温度、间隙、进给、转速等关键工艺参数外,普旋道次与轨迹也是影响钛合金热普旋成形至关重要的因素,轨迹类型、形状及道次直接决定热普旋零件的成败。试验对比了不同普旋轨迹类型对 TC4 钛合金热

普旋成形的影响。相同尺寸的初始旋坯,工艺参数不变,分别采用了直线型轨迹与抛物线型轨迹对其进行热普旋,如图 2 所示。结果表明,采用直线型轨迹出现了凸缘起皱、凸缘开裂、筒壁拉裂、筒壁内裂等各种缺陷,如图 3、图 4 所示,难以实现 TC4 钛合金零件的热普旋成形。而采用抛物线型优化轨迹则热普旋成功,未出现凸缘失稳等现象,如图 5 所示。

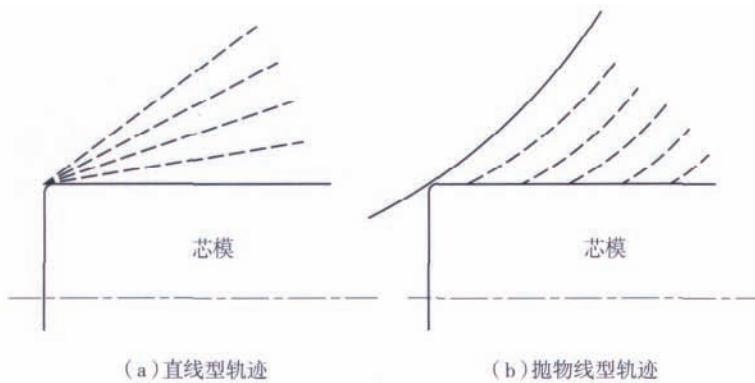


图2 直线型轨迹与抛物线型轨迹示意图



图3 已变形锥体被拉裂现象



图4 凸缘起皱现象



图5 成功热普旋零件

2 凸缘失稳分析

分析不同普旋轨迹 TC4 钛合金的变形方式可以发现,钛合金沿直线型轨迹变形时,被旋压锥体沿母线方向从直径小端到大端材料的线速度逐渐增加,单位时间内与旋轮接触的坯料逐渐增多,即单位时间内参与变

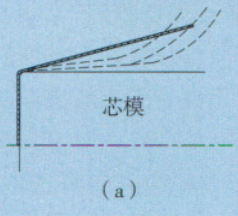
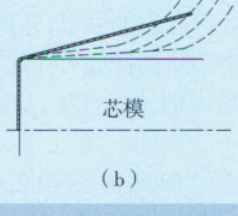
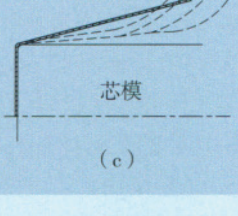
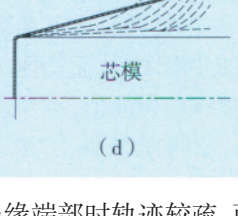
形的合金逐渐增多,因此在每一道次热普旋中均造成材料的不均匀变形、大端收径处材料堆积最多,TC4 钛合金为应变速率敏感性材料,小变形速率、均匀变形是保证其顺利变形的前提条件,而多道次直线型轨迹长期积累会导致大端金属的不均匀变形无处释放,极易引起凸缘起皱。此外,被旋压零件在凸缘大小端之间的变形量不同也会引起附加变形,造成已变形的坯料受到附加拉应力作用,从而出现旋轮后面的拉裂现象,如图 2 所示。

采用抛物线型轨迹,如图 2 (b) 所示,旋轮沿抛物线型轨迹运动,轨迹的设定使得坯料在单个道次中沿轨迹方向在不同零件半径处参与变形的金属数量几乎相等,这样,单位时间内与旋轮接触的坯料体积相同,单位时间内受旋轮作用而产生变形的材料相同,从而使得钛合金沿整个道次方向变形均匀,并且在整个多道次成形中附加变形小,从而使得凸缘大端沿各个道次均匀变形,不会造成材料的堆积,使得 TC4 钛合金普旋得以顺利进行。

3 普旋轨迹优化

旋压道次与轨迹及排布决定 TC4 钛合金热普旋零件的成形精度。道次多、旋压时间长,整个热旋系统的膨胀会较难控制,道次少,变形量大易引起不均匀变形导致零件失稳,因此优化 TC4 钛合金热普旋的道次与轨迹尤为重要。试验中对凸缘附近金属的变形轨迹与相应的变形效果进行了对比分析,结果如表 1 所示。(a)中采用较少的道次进行收径、凸缘变形量大,TC4 钛合金热普旋凸缘起皱;(b)中增加了道次,但凸缘处收径变形量仍然过大而导致凸缘起皱;(c)中采用“先密后疏”的轨迹,未旋至凸缘边部时轨迹较多,而旋轮旋至凸缘端部时又采用较少轨迹变形,凸缘显著失稳;(d)中采用“先疏后密”的轨迹进行变形,当旋轮未旋

表1 轨迹与凸缘变形状态

轨迹形状	凸缘状态
 <p>(a)</p>	起皱
 <p>(b)</p>	起皱
 <p>(c)</p>	起皱
 <p>(d)</p>	变形较好

至凸缘端部时轨迹较疏,而当旋轮旋至凸缘端部后开始采用较多的轨迹进行变形,结果是整个凸缘均匀稳定变形,无起皱。

分析试验中从不同轨迹导致凸缘变形状态不同的现象可以发现,优化普旋道次与普旋轨迹的根本依据是稳定金属的受力状态,保证金属协调变形。凸缘处金属的变形是凸缘附近的金属相对于旋轮是由凸到凹

的变形过程,如图6所示,金属在凸的过程中可以变形略大些,但是在由凸变到凹的过程以及随后的几个道次中,必须减小凸缘处金属的变形量,因为凸缘在凸的状态时金属是一个“收敛”的变形过程,“弓形”的凸缘起到稳固变形的作用,而在凹的状态金属是一个“发散”的变形过程,比较容易失稳,尤其是旋轮不断与凸缘大端的金属作用时,极易导致凸缘起皱,只有减小金属的变形量方能维持持续的协调变形。热普旋成功的TC4钛合金零件如图7、图8所示。

结束语

TC4钛合金的热旋压成形异于常规材料,热普旋成形较难控制,研究了不同类型抛物线轨迹与凸缘收径过程中不同轨迹形状对凸缘变形的影响,总结了普旋轨迹对钛合金热普旋收径影响的3点规律。

- (1) TC4钛合金热普旋变形应按小进给、均匀变形进行控制;
- (2) 抛物线型轨迹较直线型轨迹变形均匀,在TC4热普旋成形时采用抛物线型轨迹;
- (3) TC4合金热普旋成形过程中,凸缘附近的抛物线型轨迹亦采用“先疏后密”的排布规律。

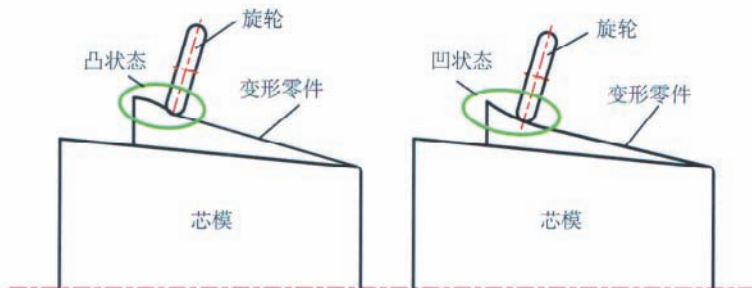


图6 大端凸缘金属与旋轮的相对关系



图7 半锥角22°的钛合金普旋零件



图8 半锥角5°的薄壁曲母线钛合金普旋零件 (切掉筒底与凸缘)

参考文献

- [1] Wong C C, Dean T A, Lin J. A review of spinning, shear forming and flow forming process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, 43: 1419-1435
- [2] Kang D C, Gao X C, Meng X F, et al. Study on the deformation mode of conventional spinning of plates. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999 (91): 226-230.
- [3] 王成和,刘克璋. 旋压技术. 北京:机械工业出版社,1986.
- [4] 胡宗式. TC4钛合金管材的强力旋压. *钛工业进展*,1999(1):20-22.
- [5] 曾向东. 钛合金筒形件的旋压. *金属成形工艺*,2003,21(6):113-115.
- [6] 李梁,孙健科,孟祥军. 钛合金的应用现状及发展前景. *钛工业进展*,2004,21(5):19-24.
- [7] 杨健. 钛合金在飞机上的应用. *航空制造技术*,2006,11:41-43.
- [8] 张喜燕,赵永庆,白晨光. 钛合金及应用. 北京:化学工业出版社,2005.
- [9] 吕昕宇,侯红亮,张士宏,等. TC4合金流动旋压三维弹塑性有限元模拟. *锻压技术*,2005,30(6):38-41. (责编 小城)