

航空航天整体结构件新型校形技术研究现状

陈 浩 曲中兴 张立武

(西安航天动力机械厂, 西安 710025)



摘要: 航空航天整体结构件加工变形问题制约着其应用的广度和深度, 在加工中或者针对成品进行校形处理是提高整体结构件形状精度的有效手段。本文在分析整体结构件产生加工变形原因的基础上, 重点讨论了电磁校形、激光校形、超声波喷丸校形、蠕变时效校形、振动时效校形这几种新型校形技术及其研究现状。

关键词: 整体结构件; 加工变形; 校形

Research Status of New Correction Technology of Aerospace Monolithic Component

Chen Hao Qu Zhongxing Zhang Liwu

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

Abstract: The machining deformation of aerospace monolithic component restricts the extent of its application. Increasing correction process during manufacturing or for the finished products is an effective means to improve the shape precision of the monolithic component. In this paper, the reasons for the machining deformation of components are expounded, the new types of correction technology such as electromagnetic correction, laser correction, ultrasonic shot peening correction, creep aging correction, vibration aging correction and its research status are discussed.

Key words: monolithic component; machining deformation; correction

1 引言

航空航天飞行器整体结构件以其大幅减少工件数目, 降低装配难度, 提高制造质量, 提升飞行器综合性能等优势得到了越来越广泛的应用。然而, 整体结构件因尺寸大、形状复杂、变壁厚(最薄处 $<1\text{mm}$)等特点, 导致其制造加工工艺繁复, 难度大, 常常产生严重的加工变形。当变形量过大时, 工件超差甚至报废, 严重影响着航空航天产品质量及交付进度, 制约着整体结构件的应用, 给航空航天制造业提出了新的挑战^[1-2]。

按照变形特点划分, 变形一般可分为弯曲变形、扭曲变形、翘曲变形。航空航天整体结构件变形多为各种变形的复杂组合, 一般需要在加工后安排校形工序。目前, 传统的校形方法已无法满足航空航天整体

结构件的校形要求。鉴于此, 为推动航空航天整体结构件的设计、制造与应用步伐, 充分发挥整体结构件优势, 必须开展相关技术研究, 以此确保航空航天结构件制造精度。因此, 校形技术一直是航空航天制造业有关学者的研究重点。

2 结构件加工变形产生的原因

结构件的加工变形问题, 涉及坯料制备、切削加工和材料力学等多个学科领域, 是航空航天产品制造加工中的主要瓶颈之一。引起加工变形的因素很多, 主要包括坯料的性能、工件的尺寸形状及刚度、加工工艺方法以及采用的加工设备等。根据相关研究, 引起结构件加工变形的主要因素有以下几方面^[3-5]:

a. 坯料初始残余应力释放与重新分布

作者简介: 陈浩(1990-), 硕士, 材料科学与工程专业; 研究方向: 金属材料成型技术。

收稿日期: 2016-11-22

坯料的成形往往要经过锻、铸、轧和热处理等工艺,这些工艺或多或少的会引入一定的残余应力,且其分布不均匀。在切削过程中随着材料的层层去除,工件内部残余应力释放、重新分布,原有的内应力平衡破坏,为达到新的平衡状态工件就产生了宏观变形,根据研究若能将材料初始残余应力水平降到足够低的水平,工件的加工变形会显著降低。

b. 结构件材料的力学性能与结构特点

随着航空航天技术的发展进步,结构件呈现出大尺寸、复杂形状、几何结构不对称、薄壁曲面(最薄处<1mm)和整体结构的发展趋势,这样的结构自身刚度差,因此加工过程中容易产生较大变形。此外,有些材料弹性模量小(如铝合金仅为钢材的三分之一左右),屈服比大,在切削加工过程中极易产生“让刀”和回弹现象,影响最终制造精度。

c. 刀具对结构件的作用

切削加工时,刀具与结构件相互接触,产生切削力和切削热。切削力会引起工件的回弹变形,同时当切削力较大超过材料的弹性极限时,又会引起工件的挤压变形;此外由于切削热的作用,工件表层温度迅速升高,而内部温度却很低,造成温度不均匀分布,从而在切削表层产生应力,也加速了工件的变形。

d. 结构件的装夹

装夹是影响结构件加工变形的又一个重要因素,尤其是整体结构、大尺寸、弱刚性薄壁设计的航空航天结构件,装夹变形问题尤为突出,严重影响着结构件的加工精度。

除上述主要影响因素外,刀具材料、切削液、加工路径等对加工变形也有一定影响。

3 新型铝合金结构件校形技术

根据制造业的现状,在现有的加工工艺水平下,仅仅通过加工工艺优化很难确保结构件的形状精度,往往需要安排专门的校形工序。校形是提高构件成形精度的有效方法,传统的校形方法主要有机械校形法、加热校形法、冷作校形法等,但因其存在一定的局限性,应用范围较窄^[6]。随着校形理论与校形技术的发展,人们探索出了越来越多的新型校形技术,如电磁校形技术、激光校形技术、超声波喷丸校形技术、蠕变时效校形技术、振动时效校形技术等,相关研究还在不断深入。

3.1 电磁校形技术

电磁校形技术,又称磁脉冲校形技术,是在电磁成形技术(Electromagnetic Forming, EMF)的基础上发展起来的,利用电磁成形原理,先将放电线圈放置于工件内,再将它们放置于校形模具内,如图1所示。接通电源,线圈在高电压的作用下产生强磁场,同时工件在感应电流的作用下也将产生强磁场,工件在两磁场叠加形成强磁场力与工件感应电流共同作用,快速向外膨胀与校形模具贴合,完成校形^[7]。

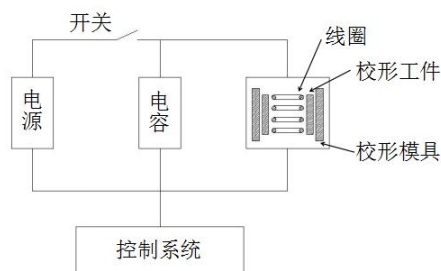


图1 电磁校形原理示意图

电磁校形技术是适用于导电性良好材料的一种非接触的校形,工艺稳定性较好,零件贴模性好,弹性回复小,校形精度高,同时可以很好地改善材料内的应力分布状态。

电磁校形精度主要取决于两方面因素:校形模具和线圈^[8]。校形零件最终要与校形模具相贴,其形状精度至关重要;若线圈外形轮廓依据零件尺寸形状设定,线圈紧贴着零件平行放置,两者之间的距离都是相同的,则预校形的零件各个部位都能受到相对均匀的电磁力,这对提高校形精度极为有利^[9]。除此之外放电电压、放电次数对校形精度也有影响。

近些年,人们对材料在电磁作用下的行为研究取得了一些进展,围绕板料、圆筒件开展了很多研究。于云程^[10]等人根据纯铝和LF21管件端口电磁校形实验研究,分析得出,放电电压是影响校形效果的关键,增大放电电压可提高校形效果;增加放电次数可解决放电能量低时变形小、贴模性差的问题;因力学性能不同,材料校形效果各异。张文忠^[11]等人研究了铍青铜波形弹簧磁脉冲校形工艺,结果表明,磁脉冲对铍青铜波形弹簧有明显的校形效果,提高了零件尺寸精度;校形后可提高波形弹簧的性能;校形后没有给铍青铜的组织结构带来不利影响。之后刘宾^[12]等人、张开^[13]等人、胡建华^[14]等人开展的研究也得出了相同的结论,验证该工艺的可行性。

目前,人们还没有完全理解电磁成形以及其如何影响材料的成形性,还没有足够充足的知识指导该技

术在工业中的应用^[15]。

3.2 激光校形技术

激光校形技术是近些年出现的一种新型柔性校形工艺方法,通过激光器产生一定强度的激光束,并以特定路径扫描工件上的待校形区域,该区域在激光的热效应作用下,温度迅速提升,增加该区域材料的塑性变形能力并降低其屈服强度,促进弹性内能做功,校正工件的加工变形,提高变形工件的形状精度^[16]。

关于激光校形技术的研究,到目前为止仍不多见。最早德国学者 Geiger M 等在汽车零部件、船舶的船板及焊接件上进行了应用试验。Takashi Ueda^[17-18]等人采用试验及数值模拟对 3 种典型突起进行了研究,简单分析了激光校平的机理,得出了激光校平时激光功率和扫描路径对校平结果的影响规律,校平时凸表面的激光辐照与凹表面的激光辐照相比更有效,且随着激光扫描次数的增加,可改善板料校形效果。我国学者

宋文荣^[19-20]等人应用激光校形技术对继电器的簧片气隙进行校正试验,结果表明该方法是可行的,且不影响簧片的机械寿命性能,在合适的激光功率与时间参数下可实现满足生产的校形。夏寒剑^[21]采用有限元模拟和正交试验相结合的方法,以 1Cr18Ni9 奥氏体不锈钢板料的简单弯曲为研究对象,进行激光校形试验,得到各因素对校形效果的影响规律,并获得了最优方案。王秀凤^[22]等人针对铝合金薄壁件进行的激光校形试验也验证该技术的可行性,且校形效果与工件材料和厚度有关。

王秀凤^[23]等人认为,激光校形的原理不同于激光成形,主要原理是采用最优的激光校形工艺参数,精确释放待校形工件上变形区域的弹性势能,降低内应力大小与改善其分布状态,从而提高零件校形部位的形状精度。根据相关研究,影响激光校形精度的主要因素如图 2 所示。

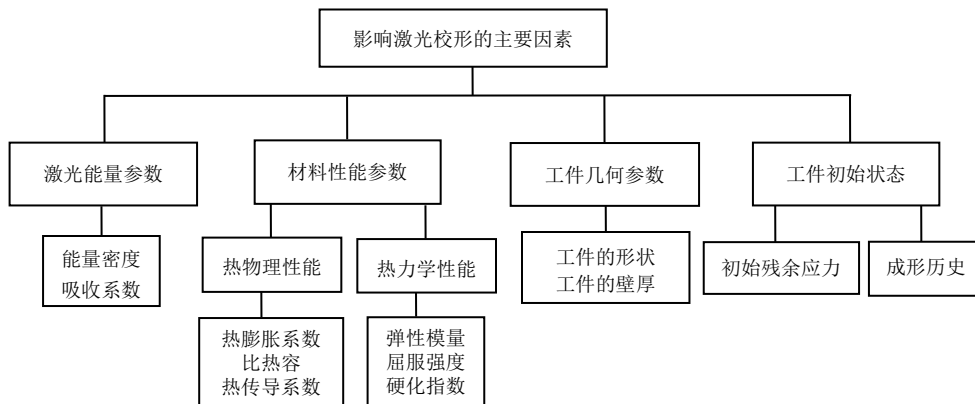


图2 影响激光校形精度的主要因素

该方法属于非接触加工且不需要模具,柔性大,不受加工环境、工件尺寸的限制,适用于解决航空航天复杂整体结构件加工变形;生产周期短,激光束的扫描花费时间不多,校形精度高,有广阔的应用前景,值得深入研究。为实现更好的工程化,还需深入研究激光校形机理,明确各因素对激光校形精度的影响规律。

3.3 超声波喷丸校形技术

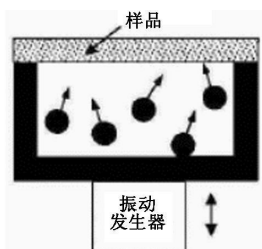


图3 超声喷丸的基本原理

超声波喷丸校形技术是利用超声波产生的高频冲击波,通过弹丸或撞针等介质作用于金属材料表面变形区域,校正成形误差的技术^[24],基本原理如图3所示。该技术是在传统喷丸校形和超声波应用研究的基础上形成的。由于超声波喷丸的过程非常复杂,同时相关的理论也不完整,所以目前对超声波喷丸的机理分析还未得到非常完整的解释,关于超声波喷丸的研究更多地集中在金属材料的表面强化处理方面,目前关于超声波喷丸成形及校形方面的研究较少。

法国 SONATS 公司从 1996 年开始,对超声波喷丸技术进行了大量研究,已开发出一套超声喷丸技术(STRESSONIC)及其相应的超声波喷丸自动化设备,并将其应用于机翼蒙皮局部校形,校形效果明显(如图 4 所示)^[25]。Polytechnique^[26]等人采用超声波喷丸校形技术对涡轮发动机空心轴进行校形研究,结果表

明,采用该技术能够实现空心轴校形。此外 KSA 公司、美国 Integrity Testing Laboratory 公司进行了很多数控超声波喷丸设备的研究。我国在超声喷丸技术领域的起步比较晚,但近些年也取得了较大的发展,其中,南京航空航天大学超声波喷丸技术课题组开展了大量超声波喷丸理论和应用方面的研究,针对铝合金板料进行了很多校形试验,取得了一定成果。如,陈星^[27]研究了 2024 铝合金板料超声波喷丸校形,结果

表明该技术对板料的单曲率曲面变形的校形具有很好的可行性。同时得出了电流强度、喷丸时间和撞针直径等工艺参数对校形效果的影响规律。郭超亚^[28]针对 2024 铝合金板进行了数控超声波喷丸校形研究,效果十分显著,并得出随进给速度、喷丸轨迹间距、喷丸电流的增大校形量先增后减,喷丸区域宽度增加校形量增加,而初始变形量对可校形量影响很小的结论。

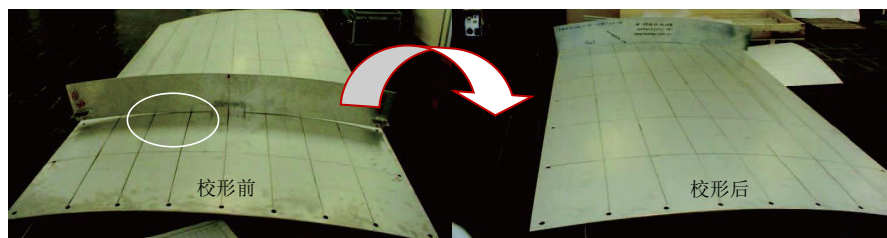


图4 SONATS公司超声波喷丸校形机翼蒙皮前后对比照

超声波喷丸校形技术是一种高效的绿色校形技术,其设备轻巧、易实现自动化,可提高校形零件的综合机械性能和疲劳寿命,适用性强且耗能低,在航空航天领域具有广阔的应用前景。跟国外发达国家相比,国内在工艺技术和相关设备研究方面均处在初期,距离工程化应用还有很长一段距离。

3.4 蠕变时效校形技术

蠕变时效校形技术是将人工时效与构件机械校形相结合,主要利用在弹性应力作用下材料于较高温度下(人工时效温度左右)的蠕变变形及应力松弛行为,降低构件内应力,同时达到校正构件变形的目的^[29]。

采用该方法进行校形后,可有效减小构件内部的应力,使内应力分布均匀,提高构件尺寸稳定性,降低后续的加工、存放及使用过程中再次发生变形的风险;同时该校形方法还具有生产投资少,不需要专门设备,可采用零件热处理设备;可重复性较高,对工件形状限制较少,校形所需载荷低;校形精确度高,可改善零件材料的性能等优点。

蠕变时效校形技术是在蠕变时效成形技术(Creep aging Forming, CAF)及热校形技术的基础上开始的研究,一般包括3个阶段^[30~31]。

a. 施加载荷阶段。常温条件下,以一定的方式向金属工件施加载荷使其产生弹性变形,并将其固定在特制的模具上。

b. 时效阶段。将带校形工装的零件放入加热炉内,加热到特定温度保温一定时间,材料在此过程中会产生蠕变及应力松弛。

c. 卸载阶段。在保温结束待零件和工装冷却至室温后,去掉工装的约束,工件产生回弹,获得所需外形。

根据国内外研究,确定合适的蠕变时效校形工艺参数(时效时间、时效温度、预应力)是一个多次尝试缩小范围的过程,需根据材料的蠕变、应力松弛性能参数和时效参数,利用有限元模拟技术及相关试验确定较为优化的工艺参数^[31~33]。回弹问题一直是蠕变时效校形的关键,校形结束后往往存在一定回弹量,影响校形效果。因此,在应用蠕变时效校形工艺时,只有准确预测回弹量,将回弹量补偿到模具表面上,才可获得所需的零件形状^[34~35]。但该问题一直没有得到很好的解决。

近年来我国围绕蠕变时效技术上开展了很多研究,如中南大学湛利华团队^[36~38],在材料的蠕变时效行为、工艺参数对材料蠕变时效成形性影响规律以及回弹补偿方面均做了很多工作,取得了很大成果。沈阳航空航天大学韩志仁^[39~40]等人发明了一种专门的蠕变时效校形装置,装置简单,校形效果良好,适用于批量生产。但由于开始研究的较晚,很多方面研究不够深刻,距工程化应用还需进一步研究。

3.5 振动时效校形技术

构件的变形往往和应力集中有着很大的关系,基于应力松弛的热时效校形方法已应用于航空航天工业^[41]。与热时效相比振动时效(Vibratory Stress Relief, VSR)降低构件残余应力的效果更佳,同时振动时效技术还具有环境友好、高效节能,生产周期短,且对

零件没有形状与尺寸限制的优点^[42]，因此越来越受到人们的重视。

围绕振动时效技术有关学者开展很多研究，振动时效技术已由最早的亚共振时效发展到高频振动时效、频谱谐波振动时效。振动时效主要应用于降低结构件材料内部残余应力，在国内外航空航天制造业已普遍应用。关于振动时效校形的研究较少，振动时效校形技术，是将变形零件约束在特制的校形夹具中，通过强力激振器的作用使零件产生振动，当振动产生的应力与材料原有残余应力相叠加，应力幅值大于材料的屈服强度时，材料屈服产生塑性变形，从而材料残余应力均匀化且应力峰值减小，实现一定程度的校形的工艺方法^[43]。

瞿峰、李兵^[44]将振动时效技术应用于壳体产品端面圆度校形，取得了不错的校形效果，根据研究成果，发明了一套专用的振动时效校形装置。首都航天机械公司将振动时效技术应用于 $\phi 5000\text{mm}$ 锻造铝合金大型环框生产，经振动时效后，产品的圆度及平面度均得到了较大的提高，如半精加工后经振动时效圆度由 0.2mm 提高至 0.8mm ，平面度由 0.04mm 提高至 0.25mm ，可完全满足后续加工、装配的要求^[45]。

姜亦涛、孙杰^[46]等人对产生弯曲变形的铝合金梁和隔框，在校形夹具的约束下进行振动时效试验，结果表明振动时效在消除工件残余应力的同时，可对变形工件得到一定程度的校形，同时二次振动时效对工件校形效果影响不大。

综合上述研究，振动时效可对构件产生一定的校形效果，可作为一种辅助校形技术，在整体结构件分步校形过程中或最终校形后引入振动时效技术有很大价值。

4 结束语

随着科学技术的飞速发展，很多新型技术被应用在结构件校形中，校形技术呈现出多元化的特点，虽然很多研究还处于初期，还有很多技术难题需要攻破，距离工程化应用还有相当长的一段路程。但因其先进性及制造业的迫切需要，这些技术终将日益完善，在航空航天制造业中大量应用，为提升航空航天制造业水平发挥重要的作用。

参考文献

1 石广丰, 王景梅, 宋林森, 等. 薄壁零件的制造工艺研究现状[J]. 长春理

工大学学报(自然科学版), 2012, 35(1): 68~72

- 2 孙杰. 航空整体结构件数控加工变形校正理论和方法研究[D]. 浙江大学, 2003
- 3 康小明, 孙杰, 苏财茂, 等. 飞机整体结构件加工变形的产生和对策[J]. 中国机械工程, 2004, 15(13): 1140~1143
- 4 孙杰, 柯映林. 残余应力对航空整体结构件加工变形的影响分析[J]. 机械工程学报, 2005, 41(2): 117~122
- 5 毕运波, 柯映林, 董辉跃. 航空铝合金薄壁件加工变形有限元仿真与分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(3): 397~402
- 6 姜亦涛. 航空整体结构件加工变形安全校正关键技术研究[D]. 山东大学, 2009
- 7 Psyk V, Risch D, Kinsey B L, et al. Electromagnetic forming—A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(5): 787~829
- 8 于海平, 邓将华. 铝合金筒形件磁脉冲校形研究[J]. 第三届十省区市机械工程学会科技论坛暨黑龙江省机械工程学会 2007 年年会, 2008
- 9 陈石, 胡建华, 孙樊, 等. 铝合金曲面零件电磁校形试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010(19): 36~38
- 10 于云程, 李春峰, 江洪伟, 等. 管件端口电磁校形的实验研究[J]. 锻压技术, 2005, 30(4): 9~12
- 11 张文忠, 董占国, 陈浩, 等. 镀青铜波线弹簧磁脉冲精密校形工艺研究[J]. 航天制造技术, 2006(6): 22~25
- 12 刘宾, 郑茂盛, 吕江波, 等. 20G 钢管的电磁校形[J]. 理化检验: 物理分册, 2009(10): 602~604
- 13 张开, 陈士民, 孟正华, 等. 铝板弯曲电磁校形实验研究[J]. 锻压技术, 2009, 34(2): 61~64
- 14 胡建华, 宁博文, 蔡衡, 等. 铝合金曲面板料回弹的电磁成形校正试验[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(4): 104~108
- 15 Imbert J, Worswick M. Reduction of a pre-formed radius in aluminium sheet using electromagnetic and conventional forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(9): 1963~1972
- 16 王秀凤. 板料激光校形技术[J]. 锻压技术, 2012, 37(6): 23~25
- 17 Ueda T, Sentoku E, Wakimura Y, et al. Flattening of sheet metal by laser forming[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2009, 47(11): 1097~1102
- 18 Ueda T, Wakimura Y, Furumoto T, et al. Experimental investigation on laser flattening of sheet metal[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(49): 137~144
- 19 宋文荣, 郭满金, 郭凡林. 继电器簧片气隙的激光校正试验研究[J]. 微细加工技术, 2005(4): 42~47
- 20 宋文荣, 何惠阳, 郭凡林. 应用激光技术进行继电器簧片气隙的校正[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 463~467
- 21 夏寒剑. 不锈钢薄板激光加热矫形技术的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2007
- 22 王秀凤, 郭晓丽, 彭青, 等. 铝合金薄壁件的激光校形试验[J]. 激光与

- 光电子学进展, 2013, 50(2): 156~160
- 23 王秀凤, 郭晓丽, 彭青, 等. 铝合金薄壁件的激光校形试验[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 156~160
- 24 张伟, 曹亮, 高国强, 等. 国内外航空喷丸技术与装备发展[J]. 航空制造技术, 2013(17): 32~35
- 25 曾元松, 黄遐, 李志强. 先进喷丸成形技术及其应用与发展[J]. 塑性工程学报, 2006, 13(3): 23~29
- 26 刘峰, 鲁世红, 张伟. 超声波喷丸技术的研究进展[J]. 航空制造技术, 2016(14): 24~28
- 27 陈星. 超声波喷丸校形的应用研究[D]. 南京航空航天大学, 2013
- 28 郭超亚. 数控超声波喷丸校形工艺研究与预测模型建立[D]. 南京航空航天大学, 2014
- 29 侯奕冰. 2A14 铝合金蠕变校形工艺数值模拟及实验研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2014
- 30 王祝堂. 蠕变时效成形技术的应用[J]. 轻合金加工技术, 2010(4): 62~63
- 31 Ribeiro F C, Marinho E P, Inforzat D J, et al. Creep age forming: a short review of fundaments and applications[J]. Journal of Achievements in Materials & Manufacturing Engineering, 2010, 43(1): 353~361
- 32 谭斯格. 工艺参数对 2524 铝合金构件蠕变时效成形性影响规律研究[D]. 中南大学, 2012
- 33 韩志仁, 秦政棋, 祁贵根. 蠕变时效成形的关键技术及应用[J]. 航空制造技术, 2008(18): 90~93
- 34 Ho K C, Lin J, Dean T A. Modelling of springback in creep forming thick * * * * * (上接第 10 页)
- aluminum sheets[J]. International Journal of Plasticity, 2004, 20(4-5): 733~751
- 35 曾元松, 黄遐, 黄硕. 蠕变时效成形技术研究现状与发展趋势[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(3): 1~8
- 36 湛利华, 杨有良. 大型构件蠕变时效成形技术研究[J]. 航空制造技术, 2016(13): 16~23
- 37 湛利华, 李杰, 黄明辉, 等. 2524 铝合金的蠕变时效行为[J]. 中国有色金属学报, 2013(2): 320~326
- 38 许晓龙. 蠕变时效统一一本构建模与成形模面回弹补偿[D]. 中南大学, 2014
- 39 韩志仁, 裴玉华. 蠕变时效校形方法及装置: CN, CN1935404[P]. 2007
- 40 韩志仁, 裴玉华. 蠕变时效校形装置: CN, 200970602[P]. 2007
- 41 周贤宾, 戴美云. 时效应力松弛校形原理及其在蒙皮制造中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 1992(2): 65~66
- 42 廖凯, 吴运新, 郭俊康. 振动时效在铝合金厚板应力消减中的局限与应用[J]. 振动与冲击, 2012, 31(14): 70~73
- 43 廖凯, 吴运新, 郭俊康. 振动时效在铝合金厚板应力消减中的局限与应用[J]. 振动与冲击, 2012, 31(14): 70~73
- 44 瞿峰, 李兵. 一种壳体产品端面圆度振动时效校形装置及其校形方法: CN, 104372168A[P]. 2015
- 45 刘晓霏. 振动时效原理分析及在大型环框类零件上的应用[J]. 航天制造技术, 2008(6): 10~14
- 46 姜亦涛, 孙杰, 王中秋, 等. 振动时效技术在航空整体结构件变形校正中的应用研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(2): 82~86

参考文献

- 1 休泽尔 D K, 等. 朱宁昌等译. 液体火箭发动机现代工程设计[M]. 中国宇航出版社, 2004
- 2 詹姆斯·P·沃麦克, 丹尼尔·T·琼斯, 丹尼尔·鲁斯. 改变世界的机器——精益生产之道[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015
- 3 孙炜, 许旭东, 余志强. 基于 VPM 的并行工程在飞机研制过程中的研究初探[J]. 航空制造技术, 2013, 13: 4751
- 4 张硕, 杨继平, 王洋, 等. 冲压发动机协同研发继承产品团队组织模式研究[J]. 飞航导弹, 2014(6): 81~85
- 5 陈洁. 大型商用飞机工艺规范体系构建[J]. 航空制造技术, 2012, 22: 32~35
- 6 韩秀峰. 商用航空发动机工艺 s 规范体系构建探讨[J]. 航空制造技术, 2015, 22: 62~66
- 7 Ingram C M. 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit[C]. AIAA2006-4361
- 8 许鸿杰, 沈波. 飞机研制过程中仿真生命周期管理的研究[J]. 航空制造技术, 2015, 18: 92~95
- 9 Johnson K G, Khanb M K. A study into the use of the process failure mode and effects analysis (PFMEA) in the automotive industry in the UK [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139: 348~356
- 10 马彦辉, 吕君, 穆菁, 等. 因果矩阵分析与工艺 FMEA 在航天型号生产过程检验点设置中的应用探究[J]. 质量与可靠性, 2014(5): 8~10, 34
- 11 蒋志广, 易旺民, 张延磊, 等. 卫星总装工艺 FMEA 应用初步研究[J]. 航天器环境工程, 2010(4): 510~514
- 12 朱丽, 李小强, 迟彩楼, 等. 航空钣金材料性能参数与工艺知识库[J]. 锻压技术, 2015(4): 143~148
- 13 付龙, 高阳, 张森棠, 等. 基于加工特征的快速编程技术在航空发动机产品中的应用[J]. 航空制造技术, 2014(7): 80~83
- 14 秦林, 薛善良, 顾永登. 航天产品装配工艺知识库建模与检索[J]. 计算机与现代化, 2015(1): 53~56
- 15 Cochrane S, et al. Knowledge reuse in manufacturability analysis[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2008, 24: 508~513