

航天产品精益并行制造方案探讨

李曙光

(首都航天机械有限公司, 北京100076)



摘要: 针对航天运载器高可靠、制造高质量及高效率的要求, 结合相关结构产品研制认知, 基于现代制造工程精益制造、并行工程思想并不拘泥于其形式, 对产品精益并行制造方案内涵进行了分析, 并围绕产品研制总体工艺要求、材料工艺、关键产品工艺、专用工艺装备、可制造性、产品检测、工艺规范化与标准化等主要要求进行了探讨, 有助于面向不同特点产品, 系统权衡研究制定适宜的产品制造方案。

关键词: 产品制造方案; 精益制造; 并行工程

Discussions on Lean and Concurrent Product Manufacturing Solutions of Launch Vehicles

Li Shuguang

(Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076)

Abstract: According to the requirements of high reliability of launch vehicles, and of high quality and high efficiency during their production, combined with the cognition of related structural product development, based on the thought of lean manufacturing and concurrent engineering of modern manufacturing engineering and not limited to its form, the connotation of lean and concurrent product manufacturing solutions is analyzed, and the overall process requirements, material processing, key product manufacturing technologies, special processing tools and equipment, manufacturability, product testing, processing standardization and so on are discussed. It is helpful to formulate the appropriate product manufacturing solutions by systematic trade-off research for products with different characteristics.

Key words: product manufacturing solutions; lean manufacturing; concurrent engineering

1 引言

航天产品制造基于产品性能、功能、使用环境、可靠性等设计要求, 交付周期、成本等约束, 系统权衡制定产品制造方案, 确定可行制造技术路线并实施。

在产品全生命周期期内, 产品设计阶段实际发生费用为产品总成本5%, 但决定了产品总成本70%^[1], 前期设计阶段产品设计方案对后续产品主要制造路径、成本有重要影响。产品设计方案本质上包含了产品制造方案, 产品关键制造技术如没有突破就难以确定产品设计方案。先进航天运载产品由于其技术复杂

性, 需多专业协同参加产品设计, 制造技术是其中重要方面。制造技术本身包含新材料工艺、传统及非传统多种制造技术。在产品设计方案研究确定阶段同步开展可行制造方案研究实施, 为产品设计方案确定提供支撑。

2 产品精益并行制造方案内涵

产品制造方案应使产品每一制造过程产生“产品价值”增值。这里“产品价值”是指有利于保证产品指标性能、功能可靠、制造过程质量控制稳定性、生

产效率等。产品制造方案应“精益”，防止生产过程由于各种原因引的制造“浪费”。

产品制造方案应是可行可靠可高效实施的。产品研制阶段是新产品概念设计、产品要求、设计方案、制造方案、关键结构方案等交替萌生与确定阶段。产品制造方案与设计方案并行迭代并不断完善(见图1)，制造方案包含的产品制造技术路线本质包含于产品设计方案中。按照并行工程产品开发思想，设计与制造均要面向产品功能可靠实现，即设计与制造共同面向产品(Design and manufacturing for product, DMFP)。

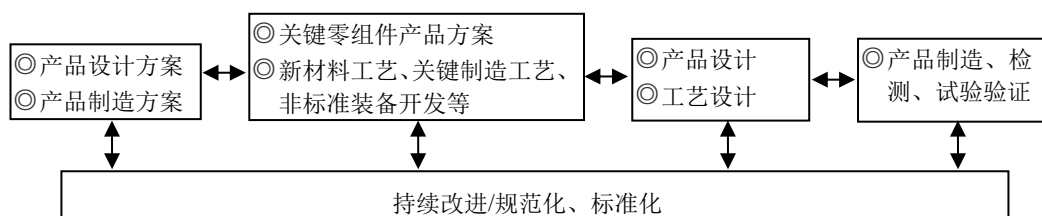


图1 产品并行设计制造

“三结合”强调实事求是，充分开展技术交底和讨论，提前交叉制造准备，同并行工程的高效研制及精益制造倡导消除研制中的无价值低效浪费等不谋而合。产品精益并行制造方案是汲取先进工程管理思想，围绕产品全生命周期研制任务需求，系统权衡产品研制性能、功能、结构制造关键、装配互换协调、研制进度与质量可控、成本等约束制定的制造技术对策集合，参见式(1)。

产品制造方案={产品研制总体工艺要求，材料工艺，关键产品工艺，关键专用工艺装备，可制造性，检测技术，标准化与规范化……} (1)

3 产品制造方案的主要要求

3.1 总体工艺要求

总体工艺要求是研制生产思路和总协调要求，基于设计工艺有效协同，结合现有制造资源优势，系统权衡产品制造技术路线，控制关键产品可能研制风险，交叉并行、又快又好地实现产品研制，主要如：

围绕产品研制目标，制定交叉并行、简洁可行的产品制造技术路线、制造流程。

分析确定并优先进行关键产品研制材料工艺试验项目，以消除影响正式产品生产的桎梏。

优先开展关键工艺装备研制。其不同于一般的专用工装，对关键产品研制技术验证、产品研制进程有

产品设计影响到产品从坯料开始的全制造生产流程及制造难度，设计面向制造(Design for manufacturing, DFM)即在最初设计中考虑可制造，消除临界状态制造工艺能力、材料工艺特性等带来生产不稳定。制造要实现产品性能及功能可靠(Manufacturing for Design, MFD)。在一些情形下，即使符合图纸及技术文件要求，仍存在产品功能达不到或不稳定，说明设计制造存在不完善，设计制造需围绕产品功能要求改进提高，消除影响产品功能不可靠内在因素。

着重要影响。

产品研制协调中“软”、“硬”的两个重要方面是：工艺方法之间的技术状态协调、不同零部件之间的配合连接装配协调。

制造工艺设计须是可靠的，产品设计、制造工艺均要保证产品可靠功能，分析识别消除影响产品功能可靠的不确定材料特性、制造工艺因素。

3.2 材料工艺

材料工艺是材料冶金与热加工工艺的密切结合，是适于金属结构应用功能可靠的重要基础。

金属材料工艺选择应进行环境适应性分析和必要验证。并非所有铝合金都适合液氢环境的结构件；一些金属或非金属高压液氧环境下会带来爆燃风险；不锈钢及铝合金异种金属之间软钎焊连接难以适应液氢液氧极低温高动态冲击压力环境。超低温非金属特种密封涂层不同厂家材料特性差异对密封涂层工艺质量有一定影响，影响密封稳定性。可重复使用飞行器要求轻质结构材料抗疲劳性能优，2219高强铝合金杂质Si、Fe含量很低，可降低高应力下微硬质材料组织结构产生的裂纹源，提高材料韧性^[2]，较2A14高强铝合金结构应用更为可靠。

一些高温合金最高使用温度超过1000℃。高性能高温合金具有常温、高温强度高，耐蚀性优，可用于高强耐热耐蚀结构及高要求紧固件。钛合金热成形、超塑成形/扩散连接技术的快速发展，降低了制造难

度,可用于高性能耐热减重结构。激光选区SLM增材制造对于中小尺寸复杂薄壁结构高温合金、钛合金等难加工材料产品整体制造具有技术优势,材料力学性能超过铸件,与锻件相近。如美国SLS火箭J-2X氢氧发动机燃气发生器喷注器研制中采用了SLM成形,将传统喷嘴加工、钎焊、焊接等工艺合并为一次整体成形^[3]。

铸造、锻造、增材制造、成形、焊接、钎焊、热处理等热加工工艺过程决定或影响产品金属结构力学性能,需进行材料化学成分、材料组织、热处理状态、缺陷等控制。电解加工存在电解晶间腐蚀表面层、电火花加工有放电熔铸层,与机械加工表面完整性呈现不同特征。高性能铝合金、镁合金锻件组织性能控制要提前至铸态坯料及开坯工艺等过程。大型复杂铝合金铸件凝固组织差异、孔洞及疏松等内部缺陷、热处理参数波动等会引起力学性能差异,高性能结构需优化铸造工艺设计,精确控制金属溶化、凝固、热处理等热过程。高强铝合金预拉伸板材性能优,但厚度方向韧性相对低,应用中要注意板材不同方向强韧性差异影响。材料有多种材料特性,实际应用不可能对每种材料特性都进行检测,不同热处理制度对材料组织影响较大,材料强度、韧性等特性往往存在很大不同,应明确结构需要的重要材料特性。热处理参数应处于优化工艺窗口内,加热炉温控均匀性、热处理过程温度等应精确控制,微观组织决定材料性能,但其又受过程操作影响,要防止热过程波动超出预定的范围引起材料性能不良。

新材料选择与产品性能、功能、进度等研制要求有关,竞争快响应要求高的产品需选择成熟材料。先进液体火箭发动机等由于耐高低温、高压、耐磨等特殊要求,高性能高温合金、钛合金、铜合金、弹性合金、热防护涂层、耐磨密封涂层、润滑材料、钎焊合金等的不断开发非常必要。运载器箭体结构轻质化强韧可靠需高性能铝合金、铝锂合金、镁合金等材料工艺的不断发展。高性能稀土镁变形合金通过成分优化,铸坯、锻造、热处理过程组织控制可实现大尺寸结构本体强度350MPa以上,延伸率5%以上,150℃以下力学性能没有明显降低,通过表面微弧氧化等涂层防护,盐雾腐蚀试验时间可达1000h以上。

新材料结构工艺需充分试验验证不同炉批次产品材料组织性能的稳定性,进行冶金与材料成形等相关化学成分、微观组织、力学性能等大量探边摸底研究和数据积累分析评价,发现组织性能调控机制,确定较优的生产工艺边界条件,形成材料验收及工艺标准

规范,防止不同材料炉批次生产过程差异影响产品材料性能。

3.3 关键产品工艺

产品制造一种是应用已有成熟技术,继承既有工程经验知识,开展产品详细工艺设计与组织实施,不需要做过多的工艺试验探索验证,有利于生产的快速组织,减少产品研制成本;另一种是需研究突破关键工艺技术,以新产品研制为牵引,研究先进适用制造技术。关键产品工艺与产品功能创新度、结构先进性与复杂性等有关,受这些因素约束,参见式(2)。先进新产品往往包含有材料结构制造创新技术挑战,有效解决可有利于提升掌握产品核心制造能力,促进产品后续研制顺畅。关键产品工艺在产品研制早期识别,分析研究可行适合的技术路线,提前开展模拟件等验证试验,防止技术不确定性对产品设计方案的影响。这也表明设计方案研究制定时就要并行开展产品制造方案“论”、“做”结合工作,“论”是为了制造方法的科学分析优化选择;“做”是及早验证关键制造工艺切实可行。产品系统复杂重要性越高,这方面工作就越必要,是并行工程设计制造的协同要点,研究突破关键产品工艺也是制造方案的重点内容。

关键产品工艺=F(产品功能要求,结构复杂性,使用环境,新材料工艺……) (2)

每种制造工艺技术都有其优势及局限,先进产品往往依靠先进制造技术组合应用优势:“巧”——避免结构复杂、制造工艺繁杂;“新”——方法创新破解传统或单一制造工艺局限;“防”——防止不可靠材料工艺因素引起的产品隐患。多专业多维度综合技术分析确定关键制造技术路线,优化产品结构及研制工艺,控制质量风险。

关键工艺技术路径的选择与已有的技术基础、研制经验有关。一方面研究应用拓展具有较完备的工艺规范、技术标准、制造资源能力的先进适用成熟制造方法。另一方面,提前进行先进产品制造技术发展预测,提前研究发展技术经济性好的工艺技术。新产品开发并行工程也包含提前进行技术准备、重点技术研究开发内容。液体发动机高低温高压部件等先进焊接结构实现要综合考虑焊接材料、焊接组织性能、零件成形加工精度、焊前准备、焊接装配装备、零件热处理状态、焊接工艺、焊接应力和变形等方面。欧、美、日氢氧火箭发动机推力室身部以往主要为电铸+铜内壁结构,身部铜合金内壁为整体,外部电铸成形后直接加工,内外壁连接结构较为简化。但电铸身部外壁

成型耗时长,质量控制环节多,防止内外壁电铸连接结合力波动。俄罗斯的液体火箭发动机推力室主要为铜合金内壁铣槽+钢外壁分段扩散钎焊再分段焊接连接,该工艺优点是扩散连接界面连接强度高,结构强壮性好,批产效率高,但需要特殊扩散钎焊材料、扩散钎焊工艺及装备等。美国 RS-68 氢氧发动机地面推力 300t^[4-5],引进吸取了前苏联 RD-180 液氧煤油发动机推力室身部扩散钎焊工艺,进行了推力室、喷管等为应用对象的大量扩散钎焊技术试验研究,开发了整体铜合金内壁扩散钎焊推力室新方案,铜合金内壁为整体结构,简化了结构工艺,提高推力室扩散钎焊装配效率及铜内壁结构可靠性,由于喉部扩散钎焊结构需要增加内支撑结构,推力室重量稍有增加。RS-68 发动机涡轮转子为不带冠整体高温合金结构,采用了电解加工整体叶片成形,属于传统特种加工工艺,但相比电火花整体涡轮盘叶片成形效率显著提高。该发动机系统设计采用了燃气发生器系统循环,相比航天飞机主发动机高压补燃循环系统,降低了泵后、推力室等关键组件的工作压力,降低了对材料工艺的高可靠要求。

美国 SpaceX 公司猎鹰 9 火箭铝锂合金贮箱采用了全搅拌摩擦焊接^[6-7],研发了蒙皮与加强结构高效可靠连接等一系列搅拌摩擦焊接工艺及装备,发挥了铝锂合金的高比强度比刚度的材料优势,避开铝锂合金常规熔焊焊接性差的不足。低成本是猎鹰 9 火箭研制的重要目标,设计制造方案系统考虑降低了火箭发射运行总成本,没有单纯依靠降低材料制造成本,铝锂合金虽昂贵,但箭体结构可设计得更强,达到了载人火箭结构可靠性指标要求;火箭发射回收重复使用;采用推力适中发动机多机并联、冗余备份提高动力系统可靠性;使每台发动机结构制造强壮可靠,降低了重复使用后发动机分解检修的繁杂工作;箭体贮箱、发动机零部件品种减少,采用精益化制造流程批产工艺提高生产效率。

运载火箭铝合金贮箱过渡环有挤压件弯曲成形焊接、环轧锻造等制造方式。9m 级 2219 铝合金超大直径过渡环如果采用锻件环轧方案,除需要大型成形热处理设备外,大尺寸铸锭组织控制均匀性、环轧锻造组织性能调控难度大,尤其要分析评价过渡环材料组织对焊缝组织性能可能影响。采用挤压型材退火态(或固溶态)弯曲成形、固溶处理、搅拌摩擦焊接、时效热处理路径,通过优化焊接结构受力更易于成形、焊接,所制造的框环材料组织性能可控、可预测,有利

于贮箱焊接可靠性设计。采用搅拌摩擦焊接连接比以往实际采用的电弧熔焊可显著提高焊接效率及焊缝质量。

运载器铝合金舱体结构有钣金成形焊接装配、铆接装配、整体铸造加工、整体锻件环轧加工、旋压成形加工等多种方式,方案选择与结构材料性能要求、几何形状、尺寸精度等有关。钣金成形组合焊接装配加工制造资源分散,制造成本低,需要解决成形精度、焊接变形和焊缝质量控制等问题。筒形舱体采用环轧锻件加工整体结构性能高,但随着舱段高度及直径增大,铸锭锻件组织控制、锻件内应力控制等难度增加,引起材料组织性能波动、加工变形等问题。整体铸造加工生产准备效率高、制造成本低,但对于内表面不加工舱体重量等设计指标需要合理确定,主要铸件长时间高温固溶热处理热蠕变形,尤其是淬火冷却时剧烈温度场变化引起铸件内应力及较大变形使得最终产品壁厚及重量控制困难。钣金成形、铆接装配可分散零件制造,解决好零件成形精度及装配变形控制,可提高制造效率,生产节奏可控。旋压成形可实现圆柱形、锥形、封头等薄壁结构高性能整体近净成形,2219 铝合金可热处理变形强化,对淬火后等待时效处理时间不敏感,便于淬火后旋压操作,淬火后冷旋校形 T8 状态比锻件 T6 状态力学性能更高,并通过校形变形均匀化淬火时引起的残余应力。

在产品开发初期识别关键产品工艺并开展研究和试验验证,改进提高稳定工艺,使设计制造方案可行、产品可靠、生产效率可接受。

3.4 专用工艺装备

工具水平是生产力进步的重要或主要标志,先进产品制造技术离不开先进制造装备。专用工艺装备主要针对产品结构及工艺方法要求专门设计制造,是产品独特制造技术的重要组成部分且不可或缺。零件加工、成形等主要采用通用机床、压力机等设备,但还是需要夹具、成形模具等工装。焊接、铆接需要专用工装用于产品装配定位精度及变形控制。产品精度越高越复杂,对工装精度等要求越高。部组件需要性能装调测试及功能考核试验。总装阶段产品价值高,总装工艺装备应安全可靠,符合人机工程要求,防止质量及安全隐患发生。

在产品研制初期,一方面力求减少新制工装,缩短研制生产准备时间,如毛坯状态便于装夹,使用模块化组合夹具等;另一方面根据产品关键产品工艺技术路线,及早分析识别需研制准备关键重点专用工艺

装备,同步并行研究确定关键工艺装备结构方案,进行加工装配工艺研究,确定适宜的装配定位精度,明确零件加工成型精度要求,提高装配一致性,减少装配调整准备时间。关键重点专用工艺装备较一般工装往往更为复杂,设计制造上存在一定技术挑战,直接影响关键产品工艺突破等工程标志性进展。

在产品批量产阶段,质量稳定性、生产效率、交付周期是优先解决项。提高产品工艺规范化、标准化水平,根据生产数量、交付周期配备必要工装及检测量具以有效控制生产节奏、质量稳定性、产品装配协调互换性。零件品种多、数量多,研究建立多品种小批量零件加工柔性加工单元,按零件类别优化工艺流程,将多品种研制转变为批产流水生产作业特征,提高工艺文件、刀具准备等规范化标准化程度,开发不同工序间精确定位装卡快速转换工装,提升同类不同规格零件的柔性生产效率及质量稳定水平。

机器人数控执行机构已较广泛应用于自动化焊接、铆接等工艺装备;焊接装夹快捷,精密装配满足自动焊接接头对接间隙、错缝等焊前装配要求;应用反变形等控制焊接变形;一个自动化专机,多装配工位,适应复杂结构装配柔性自动化焊接、铆接等装配过程节奏;加工装配过程进行关联工艺要素自动检测及自适应过程控制。关键航天产品工艺装备已从传统专用工装向精密、数控、柔性自动化、智能化方向发展,一些已发展成为高档数控机床装备,提高了产品性能及制造效能。

3.5 可制造性

产品设计具有可制造性,易于生产高效、过程质量稳定。不同材料具有不同材料特性,可成形性、加工性和焊接性不同;零件越复杂、精度高,加工、成形等制造难度及成本增大。在满足产品功能使用要求情形下,选用加工成形性优的材料。简化结构,合理确定尺寸精度与表面加工质量等要求。最大程度使用标准件、借用件;产品孔系、螺纹、铣加工圆角等几何特征标准化,减少专用刀具品种数量,减少研制生产准备时间。一方面在产品并行设计阶段设计与工艺充分沟通,另一方面将以往产品成熟研制经验知识资源化,制定设计及工艺规范、可制造性指南,促进产品设计、工艺设计规范化标准化。

满足产品性能要求,功能可靠是可制造性的前提。可制造性不仅仅是为了方便制造,还应包含消除对产品功能产生隐患的结构、材料、工艺不可靠的因素。如小圆角半径应力集中引起结构开裂。高温合金电解

加工表面晶界处产生腐蚀层对产品疲劳性能有一定影响,应进行表面光整处理。即使是精密焊接也存在一定变形,精密运动副应用要防止微小变形对运动灵活性影响。产品材料常温、高温组织性能虽符合标准但有一定范围,不同冶炼水平、炉批存在波动,一些材料不同方向组织性能也存在差异,即使经过了强度试验、发动机试车等试验考核,不表明这些试验验证真正充分,需具体分析。材料组织存在一定差异,在焊接后会有不同表现,需试验评定防止原材料组织不均匀性对焊接结构可靠影响。

对于要求高的产品设计特性,需工艺改进提升制造能力,最终实现生产过程稳定。在产品研制过程虽有一定超差,但一直处于有效监控,经过改进后可提高产品性能与可靠性。而一些要求宽松检测不明确的结构,如没有考虑到实际使用中对产品功能的影响,可能引起失效故障。符合设计图纸技术条件是制造的基本要求,不是制造的目的,设计、制造共同目的要能保证产品性能及功能可靠,在此基础上完善设计工艺。

可制造性包括应用经过实际验证可靠成熟的材料及状态、工艺方法、结构方案,减少研制试验,制定设计规范、工艺规范等将日常可制造性工作标准化。另外,针对研制需求,研究改进提高现有制造技术,将不可制造变为可制造、易制造,提高产品性能、功能与可靠性。

3.6 产品检测

产品质量是制造出来的,是否满足技术要求须通过检测,二者都是产品制造过程的环节。产品检测包括判定产品是否合格,进行影响产品质量过程要素监测,检查验收不交付、不使用不合格品。产品发生故障、失效往往存在产品检测要求不明确。金属结构件产品的检测主要包括表面质量、尺寸精度等产品外部特征检测;涉及产品材料组织、缺陷、力学性能等内部质量分析检测;是否有多余物的洁净度检测;零组件至产品总装性能试验考核测试等。

产品本身也存在质量控制问题,即测量方法正确,有效检测判定产品质量。检测不完全是为了得出产品设计要求的某项数值,如采用专用量规、检验样板等检测器具,可快速判定批产加工件是否合格。

即使是难以检测,也不应轻易放弃对有效检测方法的探索。如发动机叶轮复杂空间曲面结构采用数控加工量化检测困难,采用检验样板检测可验证数控程序正确性防止质量问题发生。一些焊接结构X光不能完

全透照检测出内部缺陷,但即使是检测出焊缝的部分区域也很有意义,通过结合产品过程控制能够判明产品质量是否可靠。应用不同无损检测技术优势,针对性检测产品内部可能制造缺陷是否在限定范围内。

产品设计之初如能避免不可检测结构有利于制造质量控制。对于高性能产品由于结构重量、空间尺寸限制,存在不能全部直接检测情形,需要权衡利弊取舍。通过制定过程工艺措施、工艺试验、工艺评定、过程要素监测检测、考核等使交付的产品可靠。

3.7 工艺规范化与标准化

工艺标准化与规范化是产品制造质量稳定的重要基础。结构设计、制造工艺、产品检测等根据产品使用功能要求选用、执行有关技术标准。已有标准也会受一定时期工艺条件的局限,存在已有工艺方法不可靠、不适用的情形。超出现有制造标准要求,需开展工艺改进,开发研究新工艺方法,在工艺改进成熟基础上,制定新的专用制造技术条件、工艺规范等。

制造工艺是基于产品图纸、技术条件、标准、制造资源等要求系统考虑面向产品生产全过程设计,即工艺设计,明确工艺流程、工艺方法、工艺参数、工具、质量控制措施、检测验收等具体要求。产品设计是产品功能可靠的源头,工艺文件是产品功能可靠在制造现场落实的源头。本质上产品工艺文件是针对一项产品的制造标准,以此来规范化现场作业,防止生产要素变化引起产品质量波动。产品工艺文件的标准化、规范化程度越高,可更有效提高产品过程质量控制水平。

产品定型不应简单移植研制阶段的工艺状态,进行产品质量稳定化系统分析,分析识别零部件至总装过程质量有波动的环节,对有质量隐患环节改进、验证。围绕批产效率质量控制,优化流程,明晰不同工艺方法状态协调要求,优化探索可一次生产合格的工艺参数窗口,配置必要的专用工装、测量器具,从工艺文件到作业现场促进批产规范化、标准化。

4 结束语

随着科学技术进步,产品制作已从早期单纯依靠工匠自身技艺转变到多专业协同工作,产品设计构想和制造实现在形式上进行了专业分离,材料种类、制造技术门类众多和快速发展,存在不同应用优势和局限,产品功能越先进系统越复杂,越需要更多专业技术优势互补、高效并行协同开发高性能产品,消除材料、制造工艺等应用中不可靠因素。产品制造方案是为了实现产品设计方案对产品性能、功能、可靠性等产品要求,并能使生产过程高效、质量稳定。产品制造方案本质内容包含在设计方案中,在产品设计初期即应并行开展产品制造方案科学论证,提前开展关键工艺技术研究、试验验证,“论”、“做”结合,使产品制造方案切实可行。产品制造方案应精益求精,具有较好的技术经济性,减少技术方案反复等原因引起研制过程的各种浪费。

参考文献

- 1 查建中,郭伟司,黎明.机械产品的并行设计[J].机械设计,1993(4):47
- 2 徐崇义,李念奎.2XXX 系铝合金强韧化的研究与发展[J].轻合金加工技术,2005,33(8):13~17
- 3 Gradl P, Sandy E, Protz G C, et al. Additive manufacturing of liquid rocket engine combustion devices: a summary of process developments and hot-fire testing results[C]. AIAA Propulsion and Energy Forum 2018 Joint Propulsion Conference, Cincinnati, Ohio, 2018
- 4 Fint J, Kuck F. Development of channel wall nozzles for use on liquid propellant rocket engine[C]. 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Tucson, Arizona, 2005
- 5 Wood B K. Propulsion for the 21st Century - RS-68[C]. 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Indianapolis, Indiana, 2002
- 6 Vozoff M, Couluris J. SpaceX Products - Advancing the Use of Space[C]. AIAA Space 2008 Conference & Exposition, San Diego, California, 2008
- 7 王国庆,李曙光,吴会强.重型火箭储箱大型结构制造技术现状及发展分析[J].宇航材料工艺,2014(A01):1~6