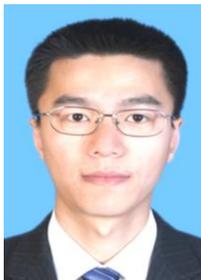


可重复使用增压输送技术发展研究

叶超¹ 史淑娟^{2,1} 周浩洋¹ 江海峰¹ 冉振华¹ 薛立鹏¹

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 2. 西北工业大学, 西安 710072)



摘要: 调研了国外可重复运载器的增压输送系统设计、结构材料、热防护、密封技术、焊接检测技术, 并在此基础上找出了国外增压输送系统的先进性和可借鉴性, 结合我国现有实际情况, 对后续可重复使用的增压输送系统技术进行了展望和关键项目规划, 包括可重复使用的阀门、密封等关键技术。

关键词: 可重复使用运载器; 增压输送系统; 阀门; 管路元件

Research on Reusable Pressurization Feeding Technology

Ye Chao¹ Shi Shujuan^{2,1} Zhou Haoyang¹ Jiang Haifeng¹ Ran Zhenhua¹ Xue Lipeng¹

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076;

2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: The present thesis investigates the pressurization feeding systems of foreign reusable launch vehicles, including system design, structure material, thermal insulation, sealing, welding and checking. The advanced foreign pressurization feeding systems that deserve learning are illustrated. In regard to the actual domestic situation, the thesis puts forward the future pressurization feeding technology, including the key project of reusable valve designing and sealing, etc.

Key words: reusable launch vehicles; pressurization feeding system; valve; piping components

1 引言

增压输送系统在航天工程中发挥着重要作用。本文针对重复使用运载器对增压输送技术的需求, 调研了国外重复使用运载器应用的增压输送技术和其发展趋势, 对比国内增压输送技术的发展现状, 梳理了发展方向和目标, 并提出了相应措施和建议。

近年来国外开展了一系列可重复使用运载器研究, 其中, 美国的相关型号主要包括 X-15、航天飞机 (Space Shuttle)、国家空天飞机 (NASP)、X-33、X-34、X-37 系列、X-43 系列、德尔塔快帆系列 (Delta Clipper) 等; 俄罗斯相关型号包括: 暴风雪号、快船号、渡船号; 欧洲相关型号包括: 使神号、森格尔 2; 日本相关型号: HOPE-X。

可重复使用运载器给增压输送系统的研制带来

了全新的挑战, 包括重复应用、飞行中经受的高温、冲击、恶劣的力学环境、磨损等。下面对国外可重复使用运载器增压输送系统应用的关键技术给予介绍, 主要从系统设计、结构与材料、热防护、密封、焊接和检测五个方面进行了分类综述。

2 国外增压输送技术发展现状

2.1 系统设计

国外在多年的可重复使用运载器研制中积累了丰富的增压输送系统设计和仿真经验。

2.1.1 航天飞机

航天飞机外贮箱由地面增压的氦气和液压头提供发动机起动前的泵入口压力, 发动机建压后由推进剂蒸汽压力维持贮箱压力。

作者简介: 叶超 (1986-), 硕士, 流体传动分析与设计专业; 研究方向: 运载火箭增压输送系统设计及仿真。

收稿日期: 2013-01-08

氮气供应系统分为贮箱增压和发动机供气两个子系统。前者为主推进系统中的气动阀门提供作动压力、贮箱增压并在再入前对推进剂管路再增压；后者在飞行中对发动机进行吹除和应急起动、关闭推进剂阀门。

推进剂输送系统通过两条直径 43cm 的管路从外贮箱向轨道飞行器主发动机输送液氢、液氧。在轨道飞行器机身尾部处，2 条 43cm 直径管路各分为 3 条 30cm 直径管路通往 3 台主发动机，液氧输送系统见图 1。轨道飞行器共有两条 43cm 直径推进剂输送管路、6 条 30cm 直径推进剂输送管路和 6 条 16cm 直径增压管路。

2.1.2 X-34 飞行器

X-34 飞行器是美国 20 世纪 90 年代为研制未来可重复使用运载器而开发的验证样机，是一种无人驾

驶、亚轨道、可重复使用的小型运载工具，其飞行最大马赫数为 8，飞行最高高度 76.2km。

X-34 动力系统布局见图 2。动力系统最显著的特点是液氧贮箱采用隔舱布局，分为前、后箱，其中前箱分隔为 3 个隔舱，后箱分隔为 4 个隔舱。每个隔舱前底通过设置单向活门，防止液体从下隔舱流出、并防止上隔舱气枕气体进入下隔舱，从而使气枕气体集中于上隔舱，下隔舱保持充液状态，保证贮箱出口处液体连续输送、发动机启动和正常工作，同时这种设计方案能够有效减少飞行状态下液体晃动对飞行器质心的影响。

作为一款技术验证机，X-34 试验的增压输送相关关键技术包括：复合材料贮箱、管路、低温隔热材料、健康监测系统等。

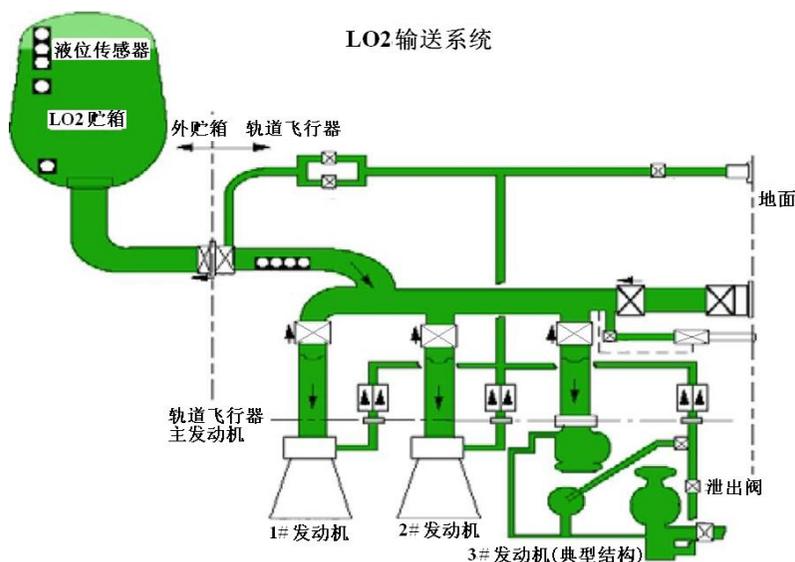


图 1 航天飞机液氧输送系统

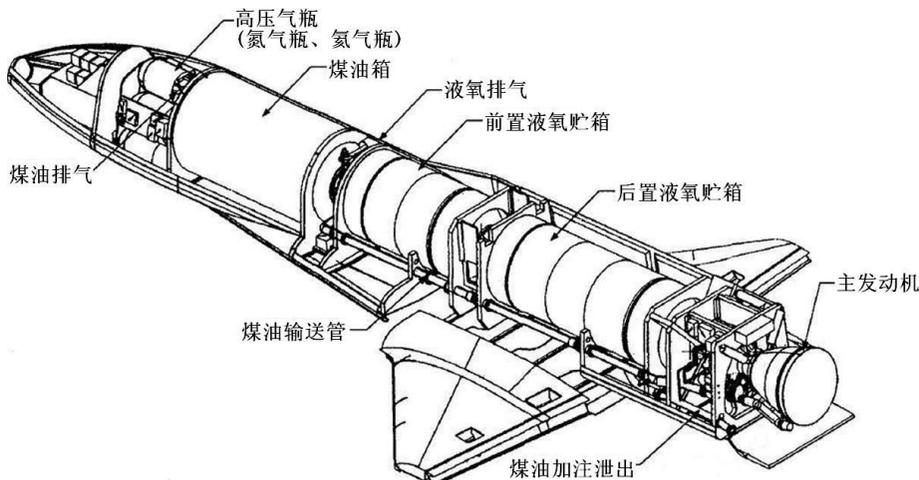


图 2 X-34 动力系统布局示意图

2.1.3 X-37 飞行器

X-37 是美国空军空间机动飞行器的技术验证机，同时又是 NASA 第二代重复使用运载器的技术验证机，将着重验证长期飞行、可重复使用的航天运载工具所必需的技术。X-37 动力系统布局见图 3。

为防止氧化剂和燃料蒸汽之间形成“潜通路”，由两套独立的增压子系统分别为氧箱、燃箱增压，每套增压子系统包括一个氦气瓶、一个“增压阀门面

板”、一套管路及贮箱的保险排气系统。“阀门面板”的布局方案对增压阀门进行集成安装，布局紧凑，有效降低了增压系统的总装难度。

根据文献，在 X-37 增压系统设计过程中，共设计了 5 种增压方案，并通过评分方式进行对比，综合考虑系统重量、单机可靠性、控制系统复杂度、成本等因素，最终确定采用并联电磁阀的冗余式增压系统。

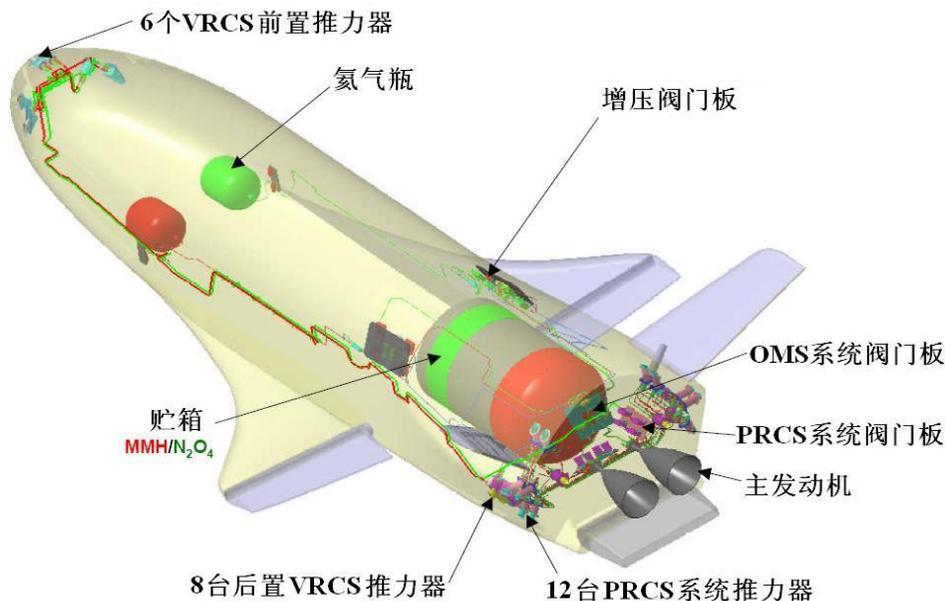


图 3 X-37 动力系统布局示意图

2.2 结构材料

国外可重复使用运载器增压输送系统在结构方面多使用强度较高、结构较轻的材料，如 X-34 采用复合材料的管路和阀门，DC-XA 的液氢输送管也采用复合材料（C/环氧复合管）。在气瓶等压力容器的设计中，也较多地采用了先进的复合材料。

2.3 热防护/绝热技术

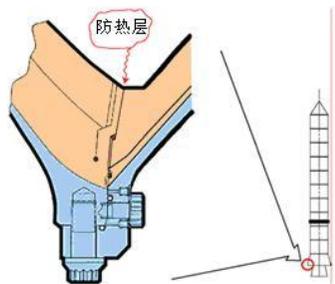


图 4 NASA 设计的防热结构

暴风雪号使用的热防护材料主要是有机柔性石英硅纤维和 C 纤维。

使神号在温度较高的机身，采用刚性外部绝热结构，该结构由 C/SiC 陶瓷盖板等组成。

其它一些防热和绝热设计如图 4 所示。

2.4 密封技术

密封技术是可重复使用运载器输送系统的一项关键技术，它不仅要求安全可靠，还尽可能要求可重复使用，国外输送系统和结构所采用或研究过的密封技术包括金属密封、非金属密封、陶瓷核钢丝编织密封（图 5）、波形表面密封（图 6）、动密封等。

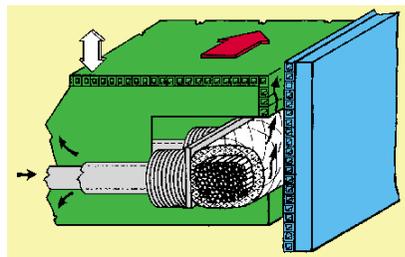


图 5 NASA 设计的陶瓷核钢丝编织密封（适合 1500~2200 F 的温度，重量轻，有弹性）

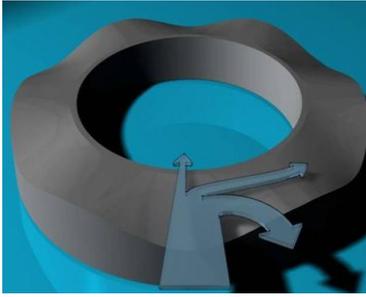


图6 波形表面的密封（适于高压且防污染）

2.5 焊接与检测技术

在美国，由于铝合金具有高的比强度，所以广泛用于结构设计中，但也带来了焊接的难度，从资料调研看，美国多采用自动钨极氩弧焊接技术。

俄罗斯的管路元件则广泛地使用了焊接技术。

在焊接质量的检测方面，美国在 DC-XA 的贮箱中，采用了声发射检测技术。

3 国外增压输送技术发展趋势

3.1 系统集成化程度越来越高

从国外天地往返的增压输送系统来看，美国已经实现了阀门的集成化设计。从结构安装布局、系统管理和成本的角度，都对集成化提出了需求。

3.2 结构和密封能够适应更加恶劣的环境

美国随着航天飞机的多次成功飞行，对管路和阀门提出了更加严酷的温度和环境要求，也随之诞生了更加先进的材料（如 Ti-Al 复合材料等）和密封方案（如非接触式密封）。

3.3 对防腐的要求增加

由于需要长时间处于高温、辐射等环境，增压输送系统的结构元件对抗腐蚀的要求也随之增加。

4 国内增压输送技术发展现状

目前，我国某型号火箭三级动力系统推进剂为液氢液氧，增压输送系统中包含多种低温管路和低温阀门，包括输送管、气瓶、排气管、减压器、加注阀、保险阀、电磁阀、压调器等。其中，管路和低温阀门是上世纪八十年代开始研制，目前已经历了几十发火箭的飞行。低温管路和阀门的设计要求仅为单次使用，其技术方案、结构强度、可靠性指标、试验验证等环节均只考虑单次飞行工况。因此增压输送系统只能满足一次飞行。目前国内运载火箭增压输送系统的

管路和阀门技术不能满足重复使用要求，距离重复使用上百次的要求相距甚远。

5 可重复使用增压输送技术发展方向

增压输送系统包括贮箱增压、推进剂输送、推进剂管理等多方面研究内容。对于常规运载器，目前已经具备较好的技术基础。面对未来可重复使用、深空探测运载器等，增压输送系统的任务发生了本质性变化，必须做好预先研究工作，完成可重复使用的增压输送系统方案、材料、高可靠密封技术、高可靠焊接和检测技术、阀门技术方案研究，实现可重复使用增压输送系统的工程应用。

5.1 箭体阀门发展方向

根据要求，多次重复使用飞行器的推进剂为低温推进剂，温度在 100 K 左右。在该温区，材料的力学性能会发生较大的变化，比如变硬、变脆、强度下降等等。而多次的常温—低温循环工况会对材料的物理特性产生影响。目前国内尚没有针对箭体低温阀门结构材料开展重复使用的研究。因此须进行适合阀门低温工况重复使用的材料研究。

低温密封一直是世界范围的难题，而低温阀门的静密封、动密封、阀座密封都非常困难。由于目前尚未得到很好的解决，导致低温阀门生产合格率不高。而影响低温密封的重要环节就是密封材料。根据目前的使用情况，低温密封结构从常温到低温再回到常温，由于材料的性能变化，很容易发生泄漏。因此，必须开展低温密封材料以及密封结构的研究，才能满足重复使用要求。根据目前的技术水平预测，在可预见的将来，很难保证低温密封件重复使用上百次，最有可能的是使用有限次数后更换密封件。

调节类阀门（减压器、压调器等）以及保险类阀门（保险阀、安全阀等）都需要敏感元件来感受压力变化，为阀门动作提供动力。敏感元件对阀门来说至关重要，一旦发生破裂、泄漏，阀门即失效，可能导致整个飞行失利。而工作过程中，阀门内部的动态环境非常复杂，要求敏感元件具有很高的可靠性。目前低温下的敏感元件包括波纹管、金属膜片、金属膜盒等结构形式。要满足多次重复使用，必须进行敏感元件的长寿命和多次使用研究。根据目前的技术水平预测，在可预见的将来，很难保证低温敏感元件重复使用上百次，最有可能的是使用有限次数后更换敏感元件。

调节类、保险类阀门的运动部件需设置适当的阻尼,抑制介质流动过程中可能产生的流固耦合现象以及开启过程的冲击。低温阀门的阻尼设计一直是个难题,温度变化会影响阻尼效果。因此,要满足低温工况重复使用,必须解决阻尼问题,开展相应的研究,研制新的阻尼结构和材料。

在飞行中需要动作的阀门,基本都设置了导向结构,用来保证每次动作的回位密封。导向部位不可避免地会发生相对摩擦,在严酷状态下会因为磨损而发生卡滞,从而导致阀门失效。低温工况下防止导向卡滞是比较困难的事情。在重复使用工况下,随着使用次数的增加,磨损会越来越严重,卡滞的几率增大。因此,必须进行多次重复使用工况下的导向结构研究,从结构形式、材料匹配、间隙优化、冗余设计、长寿命等环节入手,实现多次使用要求。根据目前的技术水平,在可预见的将来,很难保证低温导向结构重复使用上百次,最有可能的是将导向结构设计成可拆卸结构,使用有限次数后更换导向结构。

运载器阀门都包含多个零组件,各零组件通过螺纹、法兰、过盈配合等方式装配在一起。各组件之间的连接可靠性至关重要,一旦某个零件或组件在飞行过程中松动,可能导致泄漏、断裂、整阀失效等故障。目前的连接设计仅限于单次飞行工况,针对多次重复飞行器,必须开展阀门组件连接的设计、试验、可靠性研究。

多余物是运载器阀门的天敌,可能导致阀门泄漏、卡滞、堵塞等故障。在阀门生产、装配、试验、总装、靶场测试、飞行等过程中都可能产生多余物。而在总装、靶场、飞行过程中,很难做到绝对防控多余物。多次重复使用飞行器,随着使用次数的增加,多余物进入阀门内的几率增大。因此,阀门防多余物必须从设计源头抓起,在结构形式、防多余物结构等方面开展研究,提高阀门防、抗多余物的能力。

目前,运载器阀门依照的标准、规范、设计准则都是以单次飞行为目标,阀门的寿命、强度、可靠性等指标都仅限于单次飞行。要想适应多次重复飞行器的使用工况,必须开展长寿命、多次使用工况下的设计准则研究,同时必须有相应的试验研究作为支撑。

要保证阀门在飞行过程中正常工作,那么在飞行前必须确保阀门的各项性能是合格的。因此,对于多次重复飞行器来说,每次飞行结束后、下次飞行前都必须对阀门性能进行检测。而目前在阀门不下箭的情况下,不可能对阀门的性能进行全面的检测。因此,

必须研究阀门装箭状态下的检测方法和手段,研究判定规则和维护方法。同时,从设计上就必须考虑多次使用工况下的检测、维护问题。

5.2 管路元件研制方向

现有管路元件产品包括输送管、气瓶、蓄压器、补偿器等,均按照一次使用需求进行研制,从介质相容性、环境适应性、材料选择、结构设计、试验项目均满足一次性使用要求。若设计可重复使用运载器的管路元件产品,需重点考虑材料在多次使用过程中的疲劳和寿命问题,因此管路元件疲劳寿命预测与评估技术的研究势在必行;为确保产品的可靠性,现有管路元件产品在总装前均要进行各项性能试验,合格后才能装箭,装箭后还要进行系统的各项检查和测试,如果是可重复运载器,应该会有更高的要求,如产品不需分解即可进行各项测试和检查,检测出有损伤的产品是否可继续使用等。面对可重复使用要求,管路元件研制需要开展研究包括:

- a. 针对可重复使用的状态,进一步研究管路元件材料与推进剂的长期相容性,通过相关力学性能试验,验证材料与介质的相容性;
- b. 管路元件所用材料及其焊缝区材料的疲劳曲线研究;
- c. 考虑管路元件焊缝区材料性能变化和热影响区域的焊缝疲劳研究;
- d. 考虑热、力学环境条件和空间环境影响的管路元件结构疲劳设计方法研究;
- e. 考虑热、力学环境条件和空间环境综合影响的管路元件结构疲劳可靠性试验方法研究;
- f. 抗疲劳的结构和连接形式研究;
- g. 制定管路元件疲劳设计和试验标准,准确预估管路元件的疲劳寿命。
- h. 研究及应用更为先进及便捷的管路元件无损检测技术,在每次发射返回后对所有管路元件进行全方位的检查,包括对导管材料内部的透视检查技术、声发射探伤技术等;
- i. 有损伤管路元件的剩余寿命评估方法;
- j. 制定管路元件无损检测标准,即在进行完所有的检查后,可判定产品是否需要更换;
- k. 研究管路元件的快速检漏技术;
- l. 改进现有管路元件的结构形式及装配工艺,进一步提高产品的维修性,以适应多次重复使用的需要。

作为增压输送系统中的重要产品,目前国内型号

应用的气瓶充放气疲劳寿命次数能满足上百次使用要求。但重复使用运载器气瓶研究面临以下难点：气瓶工作时间长；为提高可靠性、简化系统，需减少气瓶数量，因此需要设计大容积气瓶；大容积气瓶制造技术落后；气瓶工作环境恶劣，重复使用运载器气瓶需要经历发射、回收等过程，载荷比一次性运载火箭苛刻；气瓶回收利用的检测。因此需开展相关研究：

- a. 重复使用大容积气瓶设计与分析技术；
- b. 重复使用大容积气瓶制造技术，包括成形、热处理、机械加工等；
- c. 重复使用大容积气瓶监测、检测、维修技术；
- d. 重复使用大容积气瓶的寿命评估；

e. 重复使用大容积气瓶疲劳试验设计。

5.3 技术发展路线

可重复使用增压输送技术发展路线如图7所示，最终实现：

- a. 重复使用增压输送技术；
- b. 重复使用阀门技术；
- c. 重复使用气瓶技术；
- d. 重复使用连接结构（紧固件）技术；
- e. 重复使用导向技术；
- f. 重复使用密封技术；
- g. 重复使用增压输送系统检测及健康监测技术。

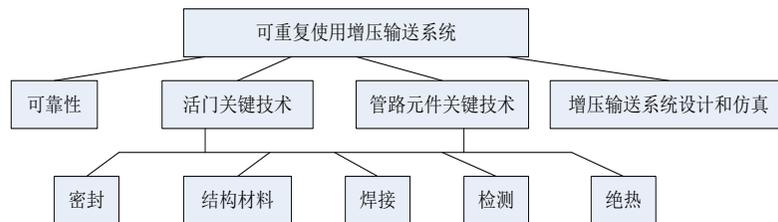


图7 技术发展路线

6 结束语

目前我国的天地往返增压输送系统研制还刚处于起步阶段，而国外已经有飞行成功的先例，从时间上至少相差了半个世纪，但我们目前已部分具备与国际接轨的软件、硬件条件，更重要的是也不乏各类专业人才，所以可以充分借鉴国外的经验，在他们的基础上进行研制，大大缩短我们研制的历程。

- a. 充分调研国外的先进经验，并积极进行技术消化；
- b. 科学管理，减少时间和成本浪费，结合现有的质量可靠性体系，将人才、项目、结果要求等全部纳入数字化、信息化的管理范围；
- c. 重视计算机仿真，积极引进国内外先进的信息化仿真经验；
- d. 重视国外各型号（天地往返和与该环境有关的

型号）研制中出现的问题，将教训积极给予整理归纳，作为我们研制的经验积累。

参考文献

- 1 Hugo E. Martinez, et al. Lessons learned from the design, certification, and operations of the space shuttle integrated main propulsion system(IMPS). NASA/JSC-CN-24087, 2011
- 2 光波. 为可复用航天运载技术开路的X-34. 中国航天, 1999(7)
- 3 Henry Rodriguez, et al. X-37 storable propulsion system design and operations. AIAA Paper, 2005: 39~58
- 4 Dr. Bruce M S. Seal technology for hypersonic vehicles and propulsion systems: An Overview. NASA Glenn Research Center, 2008, 2: 26~28
- 5 Andrew Flaherty, et al. Seal development at flowserve corporations. In: 2003 NASA Seal/Secondary Air System Workshop. Cleveland, Ohio, 2003
- 6 Clyde S Jones. Automated and aluminum welding technology. NASA-TM-111877, 1994