

钛合金腐蚀加工技术

彭行东

郑州飞机装备有限责任公司 河南郑州 450005

摘要：介绍钛合金的特点，针对钛合金在航空航天及民用工业中的大量应用，引入腐蚀加工的概念，并对腐蚀加工的原理和分类进行综述。阐述腐蚀加工的各项技术优势和应用，并展望国内外发展趋势。

关键词：钛合金；腐蚀加工；航空航天；民用；发展趋势



高级工程师 彭行东

1 序言

钛呈银灰色，具有金属光泽。钛的密度为 4.51g/cm^3 ，高于铝但低于钢、铜和镍，属轻金属范畴。钛合金具有高熔点、高硬度和高抗拉强度，可塑性强（但有杂质时会变脆、变硬），无毒、无磁性，耐高温等优良性能，其抗腐蚀性能是普通不锈钢的15倍，对海水有特别强的抗腐蚀能力。因此钛被工业界称为“未来金属”和“梦金属”，在工业应用上已成为继铁、铝后的“第三金属”。

钛合金广泛应用于各工业领域：诸如在航空航天领域，钛合金结构件在航空发动机上大量应用；苏-27、美国第三代战斗机F-14、F-15及第四代战斗

机F-22等飞机上均大量应用钛合金，用量达15%~41%；在休闲体育用品中，有钛制网球拍、羽毛球拍、高尔夫球头和球杆等；在医疗行业，钛合金生物相容性好的优势得到充分发挥，已应用于假牙、骨骼和关节等人体修复领域。

2 腐蚀加工技术

腐蚀加工是将工件置于化学溶液中，利用化学溶液对基体进行腐蚀溶解的一种技术。其可通过控制化学溶液和对工件施加保护措施，在预定范围和深度上精准去除基体材料。腐蚀加工是一种存在扩散、吸附、化学反应和电化学反应等诸多局部反应的过程。合金材料内部因存在金属电位差，在腐蚀加工时，化学反应、电化学反应两种过程同时存在，哪一种为主要过程需要根据金属材料的成分及其含量而定。纯金属在腐蚀加工时，就是化学反应过程，它的机理简单地说就是晶界与晶粒的溶解。对于腐蚀液来讲，原子（晶粒）间距较宽的地方溶解比较迅速，直到显示出不平整的表面为止，而晶界上晶格的畸变和富集的杂质，常常导致更加快速的溶解作用，从而可能会使整个晶粒受到凹坑状的腐蚀，晶粒度越小，晶界腐蚀越轻。这种晶界腐蚀除了某些钢种以外，对于机械性能或者疲劳性能的有害影响都是微不足道的。

腐蚀加工与一般的机械加工方法有着根本的区别，在进行腐蚀加工的过程中，没有任何机械强制力加诸于所切削的表面上。此外，在保护层材料的有效保护下，腐蚀加工能够非常巧妙而精确地从

指定面积上把材料切削下来，并在需要的部位恰如其分地留下图样上规定的材料厚度。由于其工艺简单，容易实现，生产成本低，加工表面粗糙度值低，加工精度高，所以它在某些领域能够完全取代一般的机械加工。其主要特点：①不会产生加工应力，便于加工薄、易变形及面积大的零件。②不受金属材料状态的影响，不论是成形、热处理还是硬化处理前后，都可采用腐蚀加工方法。③某些焊接、铆接及胶结组合件，可以改为整体结构，直接用腐蚀加工方法加工，从而减轻结构质量，减少工艺装备，节约工时，缩短生产周期。④生产效率较高，可多零件同时加工。⑤零件浸入或出槽的速率较易控制，可以加工出锥形截面。⑥与锻、铸和机械加工方法相比，可节约金属材料。⑦零件设计更改时，只需简单地变更保护型面，就可应用于新零件的试制。⑧设备简单，投资少，适应性好，尤其适用于加工型面复杂的零件。

腐蚀加工可对零件进行整体加工，亦可局部加工，按加工方式对腐蚀加工进行分类如图1所示。

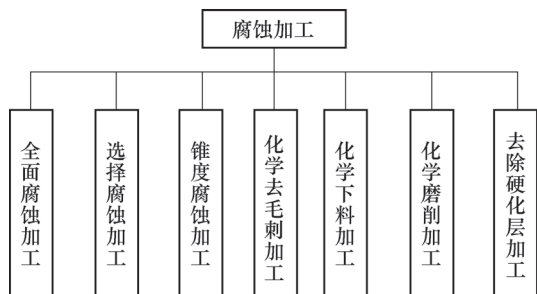


图1 腐蚀加工的分类

3 腐蚀加工技术在航空航天工业中的应用

腐蚀加工作为一种特种加工技术，已成为制造飞机、宇宙飞船及火箭结构等大型整体壁板蒙皮无法取代的加工方法，特别是对单双曲度薄壁板蒙皮的加工。随着航空航天事业的飞速发展，腐蚀加工技术的重要性日益受到重视。

(1) 去除结构中的“废重” 根据飞行器壳体的受力状态和装配工艺的需要，从板材的特定区域上把不必要的材料去除掉。就飞行器本身的机构特点而言，飞行器的外形往往是单曲度或双曲度的表面形状，由于使用传统机械加工方法在这类工件上开槽或铣凹陷等，要比化学腐蚀加工方法困难

得多，所以腐蚀加工在飞行器机构减重方面有明显优势，越来越多的飞行器设计利用腐蚀加工进行减重。例如波音747飞机和前苏联Tu-144飞机上的钛合金零件，都充分利用了腐蚀加工方法来减重。

(2) 应用在整体结构中 腐蚀加工整体结构与铆接结构相比，具有许多优点：①在气动性能方面，表面光滑，外形准确，对称性好。②在结构强度方面，总体和局部的刚性好，强度-质量比高，可减轻部件质量15%~20%，还保证了气密性。③能大大减少连接件的数量，装配后变形小，可降低部件成本的50%左右。④改善了结构的抗腐蚀性能。

(3) 加工锥度工件 腐蚀加工的一大优点就是能沿着长度方向加工出厚度逐渐变化的长而薄的锥度工件。在飞机机翼上，为获得最高的结构效率，根据机翼上受力分布的情况，从受力最大的翼根到受力最小的翼尖，使工件的尺寸连续均匀地变化。

(4) 加工难加工材料 腐蚀加工几乎能加工各种金属材料，无论是强度超过1960MPa的超强度钢，还是氧化物或氮化物硬化表面的锻造、铸造或挤压的钛合金，航空发动机制造公司经常将腐蚀加工用于叶片去除硬化层。

(5) 在挤压型材上的应用 各种型号的挤压型材已广泛用于飞行器制造过程。由于挤压型材表面常存在粗晶环，严重影响其机械性能，因此可利用腐蚀加工去除复杂型面挤压型材的表面晶环。

(6) 加工薄壁工件 可加工各种异形轮廓，如飞机机翼、机尾和机身的外形轮廓加工等，可避免薄壁零件加工变形等现象。

4 腐蚀加工技术在民用工业中的应用

应用腐蚀加工工艺可以加工铝、镁、钛、镍、铜和钢铁等多种金属和合金，例如直齿锥齿轮精锻模电极齿轮的齿顶修边、齿宽鼓形加工等，可降低表面粗糙度值。我国已用腐蚀加工方法加工人工心脏瓣膜骨架、照相机钛合金快门盘、电阻丝片及过滤网等。我国某公司使用高速铝合金腐蚀加工技术已加工出多种产品；美国的

航空化学铣切公司用腐蚀加工方法加工赛车车身，使车身减重达90.8kg。

5 国内外研究现状及发展趋势

钛合金加工困难，一定程度上制约了其应用。钛合金腐蚀加工技术的出现，必将进一步拓宽钛合金的应用前景。目前在国外，钛合金腐蚀加工已作为一种减轻飞机结构质量的通用加工方法，腐蚀加工技术得到了飞速发展。

钛合金腐蚀加工技术是20世纪50年代发展起来的新技术。20世纪70年代，化学腐蚀加工这一课题已在发达国家有了相关文献报道，我国从20世纪80年代开始关注这一研究领域。由于涉及到专利及保密内容，这方面的报道与书籍比较少。早期，美国最广泛使用的钛腐蚀液是以氢氟酸和铬酸为基础的混合溶液，英国使用的是氢氟酸和硝酸的混合溶液。但是现在国外一般都不使用含铬酸的溶液，除了因为其成本高，会产生固有污染外，更重要的是用此溶液时会发生氢脆，致使加工后材料的机械性能较差。

国内在钛合金应用方面与国外发达国家有一定差距，使用钛合金零件数量有限，钛合金腐蚀加工技术尚未有完整的产业链，处于起步阶段。由于国防的需要，我国研究人员开始重视对钛及其合金腐蚀加工的研究，南昌航空大学对TC1和TC4两种钛合金腐蚀加工工艺的研究已相对成熟，研制的腐蚀加工液具有加工寿命长、环境污染小及加工表面粗糙度值低等特点。国内常见的腐蚀加工液有氢氟酸型、氢氟酸-硝酸型、氢氟酸-铬酸型和硅氟酸型。目前钛合金腐蚀加工技术在国内已进行了少量生产应用，主要集中在航空发动机厂和主机装配厂等钛合金应用较多的企业，通过腐蚀加工不断拓宽钛合金的应用，但还只是把腐蚀加工作为一种辅助加工手段，尚未大量应用。

6 结束语

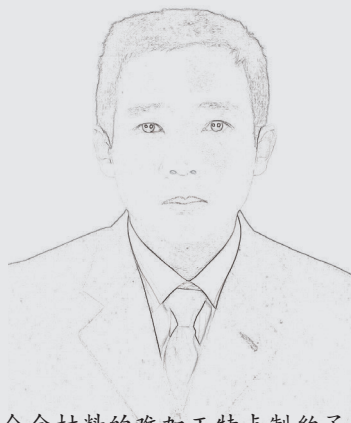
钛合金材料的难加工特点制约了其在工业领域的广泛应用，腐蚀加工技术的出现，必将进一步拓宽钛合金的应用前景。随着钛合金在航空航天领域的广泛应用以及腐蚀加工技术应用的不断成熟，钛合金腐蚀加工技术在国内将得到快速发展。

参考文献：

- [1] 张招贤. 钛电极工艺学[M]. 北京：冶金工业出版社，2000：25-28.
- [2] 陶春虎. 航空用钛合金的失效及其预防[M]. 北京：国防工业出版社，2002.
- [3] 高敬，宁兴龙. 钛应用近况[J]. 轻金属，2000（11）：48-52.
- [4] 威廉.T.哈里斯. 化学铣切[M]. 北京：国防工业出版社，1983.
- [5] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册-特种加工[M]. 北京：航空工业出版社，1993.
- [6] 袁绍斌，尹海波. 机械加工中的化学铣切[J]. 黑龙江科技信息，2004（6）：215.
- [7] C.莱茵斯，M.皮特尔斯. 钛与钛合金[M]. 北京：化学工业出版社，2005.
- [8] 李荻，金蕾. 钛合金化学铣切液的研究[J]. 稀有金属，1991，15（1）：22-25.

MW 20210512

专家点评



钛合金材料的难加工特点制约了其在工业领域的广泛应用，腐蚀加工技术的出现，必将进一步拓宽钛合金的应用前景。文章介绍了钛合金腐蚀加工的各项技术优势和应用，并展望国内外发展趋势，具有一定的理论创新和技术前瞻性。