

IN-718 高温合金特制螺栓制造工艺研究

李松林 杨季坤 江涛
(东方汽轮机有限公司 四川 德阳 618000)

摘要：本文介绍了一种特制螺栓制造方法，该特制螺栓材料为 IN-718 镍基高温合金，螺纹属 UNJ 航空航天螺纹，加工难度较大。为确保该零件顺利产出，通过大量的试验，不仅有效地解决了此种材料以及特殊螺纹的加工，而且确定了合适的加工刀具、切削参数以及螺纹检测方法，保证了产品质量，顺利实现该特制螺栓国产化的目标，为类似高温合金零部件的加工生产奠定了技术基础。

关键词：IN-718 高温合金；UNJ 螺纹；制造；检测

0 引言

紧固件是作紧固连接用且应用极为广泛的一类的机械零件，在各种机械、设备、车辆、船舶、铁路、桥梁、建筑、结构、工具、仪器、仪表等都设计有各式各样的紧固件，是应用最广泛的机械基础件。随着国内的紧固件产品在质量和技术上不断提高，我国的紧固件产品在国际贸易舞台上地位也不断提升，但中国仍处于紧固件大国向紧固件强国进步的初级阶段，后期的发展任重而道远，还需要依靠国内经济的稳步运行和国内航空航天、交通行业、建筑、设备等对高端紧固件需求的不断扩大的推动，加大高端紧固件国产化研制力度，才能持续高质量高速发展。

1 特制螺栓介绍

本文介绍的高温合金材质特殊螺栓，其材料为 IN-718、属 Ni 基高温合金，螺纹为 UNJF 细牙螺纹、属抗疲劳高精度螺纹，螺栓定位外圆精度要求高、且螺栓设计有六方、锁线孔、退刀槽、凸台等诸多结构特征，制造难度较大，该螺栓长期依赖国外进口。本文阐述了该螺栓从车削、螺纹加工、检测到铣削等整个流程工艺方案实施的全过程，并经过实际产品加工、检验、装配，最终制造出了合格的产品，解决了材料加工以及螺纹加工技术难题。

1.1 IN-718 材料简介

IN-718 是以 Ni 为基体，具有高温下强度高、稳定性好、抗氧化性出色、抗热疲劳损坏性能好以及在高、低温环境下耐腐蚀性好的优良性能，例如，在 700℃ 时仍具有高的抗拉强度、疲劳强度、抗蠕变强度和断裂强度，在 1000℃ 时具有高抗氧化性和承载高的机械载荷的能力。因此，该材料广泛用于燃气轮机、航空航天、低温 / 酸性环境以及核工程中。

1.2 UNJ 螺纹介绍

UNJ 螺纹属于美制航空航天用螺纹标准系列，该螺纹的设计源于优化螺纹牙型的研究——即在不损失静强度特性的条件下具有超常的抗疲劳性能，该螺纹控制牙底圆弧半

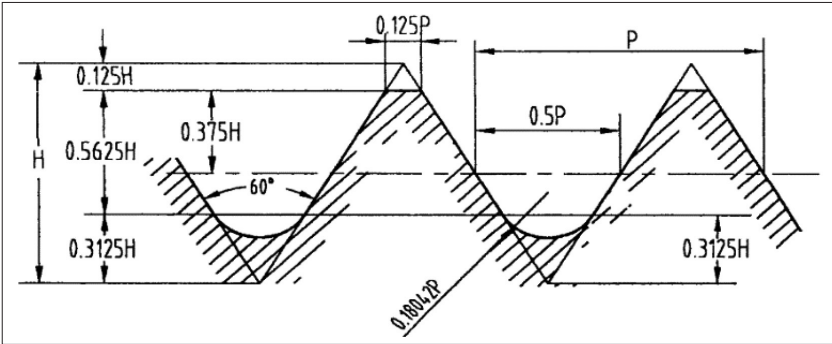


图 UNJ 螺纹

径极限值为 0.1501~0.1804 倍的螺距，与普通 UN、UNR 螺纹相比要大得多，牙形轮廓如图所示（以外螺纹为例）。

UNJ 螺纹设计为大圆弧结构牙底，能减轻应力集中，提高疲劳强度，虽然牙底圆弧增大会导致外螺纹小径增大，使得 UNJ 螺纹的接触高度会稍微缩短，但是通过采用 3A/3B 级螺纹公差可以补偿此强度损失。UNJ 螺纹系列包括 UNJ 螺纹、UNJC 粗牙螺纹、UNJF 细牙螺纹、UNJEF 超细牙螺纹，该螺纹常用在航天航空紧固件和高尖端的工业产品中，也是对尺寸、重量、强度均有严格要求的连接部位的首选，该螺纹使用的公差内螺纹 3B、外螺纹 3A，是美制螺纹中最精密的配合等级。

2 制造方案及实施过程

2.1 制造难点

2.1.1 材料难加工

由于加工对象为 IN-718 沉淀硬化型镍基高温合金（经固溶 + 稳定化 + 时效处理，硬度 HRC40 以上），材料本身具有很好的塑性和韧性，切削时切屑变形大，易粘刀不易断屑，易发生粘结磨损，且加工过程中材料硬化现象严重。该材料切削加工主要特性：塑性变形大，变形系数是普通材质的 1.5 倍；加工硬化倾向大，硬化程度超过 25%；切削力大，加工切削力高于普通材料切削力 2 倍以上；材料导热性差，切削热由刀具承受，可达 1000℃ 以上；刀具磨损快，其成份中钽、铌、钨等也是硬质合金的主要成份，会加速刀具磨损，材料切削加工难度大。

2.1.2 螺纹的加工及检测

本文所述特制螺栓，其螺纹采用 UNJ 系列螺纹，该螺纹属于美制航空航天用螺纹标准系列，螺纹精度要求高，牙底圆弧大，加上国内缺少该种螺纹的相关标准，缺乏经验支持；国内现有刀片能否满足要求有待试验确定，此外如何选择合式的新刀具确保加工出的螺纹满足设计要求，保证螺纹强度以及螺纹的检测方法均需要摸索。

2.2 解决方案及实施过程

2.2.1 车削加工

高温合金在高的切削温度下机械物理性能很好，在高温条件下，其合金中的部分成份对刀具会产生化学磨损，为此，刀具材料要有很好的切削性能，而且抗氧化抗扩散磨损、抗粘力等高温下的特有切削性能要好，鉴于该情况，主要选用硬质合金材料刀具开展了车削加工试验验证，试验加工安排在精密数控小车上进行。

选用 JC5015、TT5080、S05F 不同材质硬质合金刀片开展对比试验，转速 $n = 700\text{r/min}$ ，根据刀具磨损情况及工件表面加工质量进行分析，材质为 JC5015 的卷屑槽较宽，不利于断屑，刀片正前角设计加上锋利的刀刃适用于长屑型材料的加工；而 TT5080、S05F 材质刀片在加工 GH901 高温合金阀杆效果良好，根据本次试加工结果情况，该材质刀片更适合用于 IN-718 材料的精加工。另外为更好的保证加工表面粗糙度，需选用刚性高的设备，同时冷却要充分，也有助于延长刀具的寿命。

2.2.2 螺纹车削

本文所述特制螺栓上的螺纹为外螺纹，其螺纹规格为 3/4-16UNJF-3A，相关尺寸如下表所示（单位 mm）。

表 螺纹规格

牙形角	螺距	角底 R	大径	中径	小径
60°	1.5875	0.238~0.286	19.050~18.812	18.018~17.923	17.216~17.024

螺纹常用的切削加工方法有车螺纹、铣螺纹、磨螺纹、攻螺纹和套螺纹等；少无切削加工方法有搓螺纹和滚螺纹等。选择螺纹的加工方法主要从工件形状、螺纹牙型、螺纹的尺寸和精度、工件材料和热处理以及生产类型等多方面进行考虑，本文所述特制螺栓，根据螺栓结构、材料以及设备资源情况，采用精密数控小车车削方式加工螺纹。

选用 GC1125 和 PR1115 两种材质刀片进行对比试验，转速 $n = 400\text{r/min}$ ，根据刀具磨损以及螺纹加工质量分析，材质为 GC1125 螺纹刀片底部有三处定位凹槽，每个槽对应于一个切削刃，该刀片与刀垫上定位稳定性高，保证高刚性，从而显著降低刀片的磨损，延长刀具寿命，提高零件表面质量；同时刀片有 PVD-TIAN 涂层，提高了刀片的耐磨性和韧性，该刀片更适合加工该螺纹。同时为了更好的控制刀具磨损均匀性、减小切削受力，螺纹加工优先选用左右侧交替进刀车削方案。

2.2.3 螺纹检测

螺纹检测方法主要有螺纹通止规检测法、螺纹千分尺、

三针测量法、量规式螺纹测量仪、影像法、三坐标测量测量等多种方法，其中最常用的是螺纹量规检测法，该方法检测效果高，螺纹规有通止端，要求通端通止端止，螺纹规必须使用第三方外校合格，且在有效期内，否则螺纹规磨损了检测出的产品是不合格的。根据螺纹内外分布形式螺纹规分为环规和塞规，本文所述的特制螺栓为外螺纹设计，采用螺纹环规进行检测。

螺纹加工后，采用环规对两种刀具加工的螺纹进行检测分析，出现了通规不过、止规过的现象，特对螺纹进行了全尺寸检查，发现两种试验刀片加工的螺纹存在牙底圆弧不同、螺纹小径不同，其中 UNJ 专用螺纹刀片车削的螺纹满足图纸的要求，同时发现本次使用的环规是不合格的，需要重新订购。

2.2.4 铣削加工

根据 IN-718 材料的切削特点，选用直径 16mm 的硬质合金可转位立铣刀，刀片材质 PR1025，转速 $n=2600\text{r/min}$ ，在卧式加工中心上开展铣削加工试验，该方案铣削表面粗糙度达到 $Ra1.6$ ，满足要求。

本次铣削采用的是顺铣方式，有效避免刀具切入时先接触到硬化层，还可以缓解刀具磨损，提高刀具寿命；刀片的断屑槽设计很好的保证了切削时的低阻力，并通过内冷充分冷却刀片和刀体，降低刀具磨损，延长刀具寿命，另外由于高温合金通常都会产生 0.02mm 左右的硬化层，因此推荐最低切削深度不小于 0.05mm。

2.2.5 产品的加工

根据试验确定的加工工艺方案，同时螺纹加工采用 UNJ 螺纹车刀片进行车削加工，由于环规需要重新订购，螺纹检测采用外径千分尺控制大径、螺纹千分尺检查中径、公差按中差控制，一次性加工 120 件产品，经专检以及后续机组总装检验，全部满足设计要求，说明本文制定的高温合金特制螺栓制造方案是合理的。

3 结语

本文通过从车削、螺纹加工、检测到铣削等整个流程对 IN-718 材质特制螺栓制造工艺实施的全过程进行介绍分析，并经过实际产品加工、检验、装配，最终制造出了合格的产品，解决了 IN-718 材料加工、螺纹加工及检测技术难题，掌握了 IN-718 Ni 基高温合金车削、铣削的加工方法，选出了合适的加工刀具和正确的切削参数，完全掌握了 UNJ 航天航空抗疲劳高精度螺纹的车削和检测方法，同时验证了数控车削+专用刀片+千分尺检测螺纹的操作方式是可行的，不过在大批量螺纹加工时采用环规检测，效率更高，检测更全面。

参考文献：

[1] 王启平. 机械制造工艺学（修订本）[M] 北京：机械工业出版社,1982.

[2] 蔺启恒. 金属切削实用刀具技术 [M] 北京：机械工业出版社,2002.