

超高强度钢内螺纹铣刀优化

刘钟毅^{1,2}, 魏娟¹, 熊肖肖², 谢勇前², 王洲伟³

¹西安科技大学; ²成都航天万欣科技有限公司; ³青岛前哨风动工具制造技术有限公司

摘要: 随着超高硬度钢在航空航天产品上的广泛应用,零件的螺纹孔加工成为难点。目前采用螺纹铣刀铣削加工螺纹,但现有螺纹铣刀在加工中存在容易崩断、耐磨度较差和刀具费用高等缺点。为了提高刀具耐用度、降低加工风险和刀具费用,从而降低零件加工成本,通过分析现有螺纹铣刀在加工中存在的缺点,优化螺纹铣刀结构和材质,实现国产化定制。经过试验验证,改进后的螺纹铣刀较原有螺纹铣刀耐磨度提高 100%,单个螺纹孔加工费用较原有加工费用降低 80%。

关键词: 超高硬度钢;内螺纹;螺纹铣刀;工艺;刀具优化

中图分类号: TG714;TG722

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2021.11.019

Optimization of Internal Thread Milling Cutter for Ultra-high Strength Steel

Liu Zhongyi^{1,2}, Wei Juan¹, Xiong Xiaoxiao², Xie Yongqian², Wang Zhouwei³

Abstract: With the wide application of ultra-high strength steel in aerospace products, it is difficult to machine threaded hole. At present, the thread milling tool is used in milling processing, it is easy to break off, abrasion resistance is poor and costs much. In order to improve the abrasion resistance, decrease the machining risk and machining tooling cost, realize the reduction of machining expense, the disadvantages of the existing thread milling tool in machining is analyzed, thread cutter structure and material is optimized, domestic custom tool is adopted. Through the experiment, contracted with original thread milling cutters, the improved thread cutter abrasion resistance is increased by 100%, a single threaded hole machining cost is reduced by 80%.

Keywords: ultra high hardness steel; internal thread; thread milling cutter; process; cutting tools to optimize

1 引言

30Si2MnCrMoVE 钢(简称 D406A 钢)是一种经过热处理强化的低合金超高强度钢,其抗拉强度达 1620~1700MPa,硬度高达 HRC48~52,被广泛应用于航空航天领域产品的零部件制造中,其中壳体类零件常采用螺纹连接,最后一道工序内螺纹孔的加工是难点,主要表现为攻丝阻力大、切削温度高、切削刃磨损快、刀具易崩刃甚至折断,导致螺纹孔报废,进而造成整个高价值的零件报废,加工风险大^[1]。通过对几种常用螺纹加工工艺进行评估(见表 1),选择使用硬质合金螺纹铣刀进行螺纹铣削。

螺纹铣削采用螺纹铣刀进行加工,与传统螺纹加工工艺相比,具有切削速度高、切削力小、加工精度高、同一把铣刀可以加工不同螺距螺纹等特点^[2,3]。

目前某项目壳体零件加工中,采用进口品牌标准螺纹铣刀进行螺纹加工,刀具费用高,耐磨度差。面对零件加工成本管控的要求,为进一步提高刀具耐磨度和降低刀具成本,本文通过分析现有螺纹铣刀结构特点和材质后进行优化改进设计,采用国产

定制的方法,提升刀具耐磨度,减小换刀频率,提高加工效率,降低了刀具费用和加工成本。

表 1 常用螺纹加工工艺

序号	工艺	刀具类型	特点
1	手工攻丝	高速钢成组丝锥	生产效率低、刀具寿命低、螺纹精度差
2	机床攻丝	高速钢单支丝锥	丝锥容易断造成报废,刀具寿命低
3	机床攻丝	硬质合金单支丝锥	丝锥容易断造成报废
4	螺纹铣削	硬质合金螺纹铣刀	刀具寿命长、切削力小,不易断刀、螺纹精度高

2 螺纹铣加工原理及难点

2.1 螺纹铣加工原理

螺纹铣是基于多轴联动数控机床的先进螺纹加工工艺,通过主轴高速旋转并以圆弧插补和轴向插补相结合的方式加工螺纹。螺纹铣刀同时进行周向进给和轴向进给,在螺纹铣削过程中刀具周向运动产生螺纹直径,同步的轴向运动产生螺距^[4]。使用三轴机床进行内螺纹铣削加工时,不仅能实现左旋螺纹和右旋螺纹加工,还能根据需求选择顺铣或逆铣加工方式^[5]。具体加工过程见图 1。

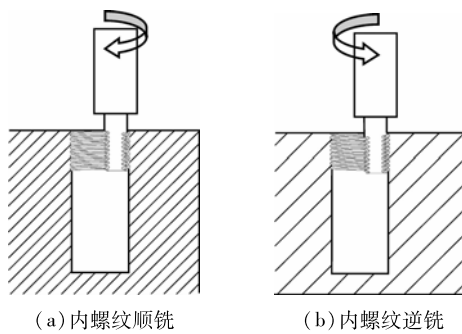


图1 内螺纹铣削加工原理

进行螺纹铣削加工时,相比传统手工攻丝的方式,采用螺纹铣刀具有以下优势:

(1)螺纹加工精度高。传统手工攻丝时不易察觉丝锥磨损,导致在后续攻丝中螺纹的牙底和牙顶产生尺寸误差,不容易通过螺纹通止规的检测。而铣螺纹是通过数控机床精确控制螺纹铣刀在轴向和径向方向的移动,螺纹尺寸精度得到有效保障。

(2)螺纹垂直度好。传统手工攻丝受操作者技能等因素影响,在螺纹成型过程中不能感知螺纹与加工表面的垂直度,难以保证垂直度符合加工要求,同时由于垂直度存在偏差,在后续攻丝中丝锥容易断裂。采用铣螺纹方式可有效保证零件在装夹时螺纹铣刀与零件表面的垂直度,并在加工过程中通过数控机床主轴进行有效控制,因此铣螺纹可以获得良好的垂直度。

(3)加工效率高,劳动强度低。对于超高强度材料进行螺纹手动攻丝时,切削阻力大,作业强度高,在大批量攻丝时感受尤为明显;采用铣削螺纹的加工方式有效降低了作业强度,提高了加工效率。

2.2 加工难点

分析铣螺纹加工原理和实际生产过程中的螺纹铣刀使用情况可知,目前铣螺纹加工中存在以下难点:

(1)螺纹铣刀容易崩断在螺纹孔中,造成零件报废。在铣螺纹进行到中后端时,螺纹铣刀与成型螺纹啮合长度长,铣刀的整个螺纹段处于绷紧状态,机床稍有振动就会造成铣刀崩断在螺纹孔中,而且铣刀处于啮合状态不易取出,最终造成零件报废。

(2)材料硬度高,螺纹铣刀磨损过快,加工成本较高。以实际加工 M6 螺纹孔为例,目前采用进口品牌螺纹铣刀,每把螺纹铣刀价值上千,但加工 2~3 个螺纹孔后,螺纹铣刀便因磨损而无法使用。

3 螺纹铣刀优化方案设计及应用

3.1 优化螺纹铣刀结构

(1)优化螺纹长度

考虑到加工效率,标准螺纹铣刀的螺纹部分设计为 10~12 牙螺纹长度,可以采用较大切深进行铣削,从而减少走刀长度,提高加工效率。多牙参与切削可以减少单牙刃口磨损,提高刀具寿命。但是对于超高强度钢的加工,大切深会使径向切削力成倍增大,引发断刀的风险,只能采用单牙切深螺旋铣削进刀,并且仅有第 1 牙参与切削,所以切削牙数减为 2 牙并不影响加工效率,而且切削牙数的改进有效降低了加工中的摩擦阻力和振动,改善了排屑性能。第 2 牙作为修光螺纹和留磨储备,可以提高螺纹铣刀的使用寿命,保证螺纹精度稳定,刀具结构见图 2。



(a)改进前螺纹铣刀结构

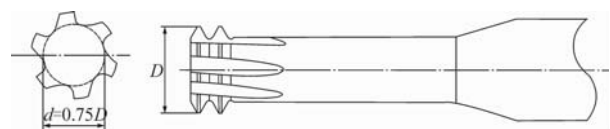


(b)改进后螺纹铣刀结构

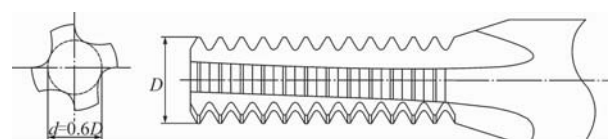
图2 改进前后螺纹铣刀结构对比

(2)优化切削槽型

进口品牌标准螺纹铣刀出于通用性的考虑,采用 4 刃的标准槽型设计,设计芯厚 $d=0.6D$ (D 为螺纹铣刀公称直径)。对于超高强度钢的螺纹铣削而言,为了保证加工可靠性以及尽可能降低切削力,一般采用比较小的每齿进给量,以创造良好排屑条件,因此改进后的螺纹铣刀为 6 刃槽型,设计芯厚 $d=0.75D$ (见图 3),并与螺纹长度优化相结合,减小了槽长。槽型的优化设计使螺纹铣刀的强度和刚性提高了 50% 以上,有效减少了折断风险。



(a)改进型螺纹铣刀



(b)进口标准螺纹铣刀

图3 螺纹铣刀切削槽型优化

3.2 优化螺纹铣刀材质涂层

由于超高强度钢的超高强度和硬度,切削过程的切削力和切削热比较大,而 D406A 钢的导热系数仅为 45 钢的 1/5 左右,导热性较差。切削加工时,单位切削力大,切削温度高,切削热集中在刀尖上。根据这些加工性能特点,优化后螺纹铣刀的材质上选用超细晶粒硬质合金(见表 2)。涂层选用更高抗氧化温度的 AlCrN 涂层(见表 3)。

表 2 螺纹铣刀材质对比

	标准螺纹铣刀	定制螺纹铣刀
材料牌号	H10F	TSF22
硬度 HV30	1600	1930
抗弯强度(MPa)	4300	4400
碳化钨颗粒(μm)	0.8	0.4
钴含量(%)	10%	8.2%
密度(g/cm^3)	14.5	14.55

表 3 螺纹铣刀涂层对比

	TiAlN(标准螺纹铣刀)	AlCrN(定制螺纹铣刀)
显微硬度(HV0.05)	3300	3200
干摩擦系数(钢)	0.30-0.35	0.3
残余应力(GPa)	-2.0	-3.0
最高工作温度($^{\circ}\text{C}$)	900	1100

4 改进应用

4.1 验证条件

加工机床为动龙门镗铣床;零件材质为 D406A 钢,硬度 HRC48~52;螺纹参数为 M6-1,盲孔,底孔直径 5mm,孔深度 12mm,攻丝深度 8.5mm,冷却条件为液冷。加工参数:机床转速 800r/min,轴向进给量 20mm/min;试验样块状态;试验样块上共计钻取了 30 个底孔作为螺纹加工试验底孔;判定条件:分别采用进口品牌标准螺纹铣刀和优化设计定制螺纹铣刀各 3 支进行螺纹加工,每加工完一个螺纹孔就对刀具磨损情况进行观察,并用通止规对螺纹进行检测。若发现刀具磨损且下一个螺纹孔加工后通止规检测不通过,则判定此刀具不能使用。

4.2 改进效果

实际加工后统计每支刀具的螺纹加工数量,进行对比得到表 4。

表 4 改进前后螺纹铣刀加工螺纹数量对比

序号	名称	材质/涂层	螺纹加工情况
1	进口品牌标准螺纹铣刀	H10F + TiAlN	平均加工 3~5 个满足要求的螺纹孔后,铣刀存在磨损,需要更换
2	改进设计螺纹铣刀	超细晶粒 + AlCrN	平均加工 8~10 个满足要求的螺纹孔后,铣刀存在磨损,需要更换

5 结语

通过试验验证,改进的螺纹铣刀相比原有螺纹铣刀存在以下优势:

(1) 刀具耐磨度得到极大提升。采用优化后的螺纹铣刀,单支刀具的螺纹加工数量相比原有螺纹铣刀提高了 3~5 个螺纹孔,耐磨度提高了 100%。

(2) 加工风险降低。原有螺纹铣刀结构随着螺纹加工深度加大,刀具与螺纹啮合段长度同步加大,会增加刀具崩断概率,导致螺纹报废。优化后的螺纹铣刀在螺纹加工中,与加工出来的螺纹始终保持 1~2 刃的啮合,啮合段的减少降低了刀具崩坏的风险。

(3) 加工成本降低。原有进口品牌刀具含税价 1700 元左右,按照最大加工 5 个螺纹孔计算,单个孔刀具费用达到 340 元,优化后的定制刀具含税价 800 元,按照最大加工 10 个螺纹孔计算,单个螺纹孔刀具费用仅 80 元,比原有加工刀具降低了 80%,经济效益明显。

优化后的螺纹铣刀在超高强度钢螺纹加工中有明显的效率提升、寿命提升,同时加工刀具成本有明显的降低,效率和经济效益明显。

参考文献

- [1] 徐和平, 郭本祥, 陈伦, 等. 高硬高强度钢专用丝锥的开发与应用[J]. 工具技术, 2020, 54(9): 60-63.
- [2] 刘峙. 螺纹车刀在铣削螺纹时的应用[J]. 机械工程与自动化, 2013(5): 203-204.
- [3] 严凯, 苏宏华, 周井文, 等. 高温合金螺纹铣削力优化研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(5): 707-712.
- [4] 俸跃伟, 燕凯, 于洋. 数控铣螺纹及其在航空发动机上的应用[J]. 制造技术与机床, 2014(8): 110-112.
- [5] 宋亚洲. 大直径非标内螺纹铣削加工技术的研究及刀具设计[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.

第一作者: 刘钟毅, 硕士研究生, 工程师, 西安科技大学机械工程学院, 710054 西安市

First Author: Liu Zhongyi, Postgraduate, Engineer, College of Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

通信作者: 魏娟, 教授, 西安科技大学机械工程学院, 710054 西安市

Corresponding Author: Wei Juan, Professor, College of Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China