

航天箭体用薄壁结构机械加工噪声分析及防治

方凯悦 王新 易美军 耿力
(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)



摘要: 针对航天箭体用薄壁结构因具备弱刚性特征, 更易产生尖啸噪声, 会对工人的身体和心理造成严重危害, 讨论了机械加工噪声的产生原因和影响因素, 并从参数设置、刀具选用、工装使用等方面归纳了抑制噪声的方法, 以期为工业企业机械加工噪声的防治提供解决思路。在此基础上, 对复合材料构件的机械加工噪声、磨削噪声的产生与防治、降噪工装设计等方面的研究前景进行了展望。

关键词: 机械加工; 职业危害; 噪声

中图分类号: TB535 文献标识码: A

Machining Noise Analysis and Prevention of Thin-walled Structures for Space Rockets

Fang Kaiyue Wang Xin Yi Meijun Geng Li
(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract: With the vigorous development of China's aerospace manufacturing industry, high-precision, lightweight, large-size thin-walled structural parts have become the mainstream products in the field of space rockets manufacturing. However, during the machining process, the thin-walled structures for space rockets are more susceptible to generate squeal due to their weak rigidity characteristics, which can cause physical and psychological hazards to workers. In this paper, we discuss the causes and influencing factors of machining noise for thin-walled structures, and summarizes the methods to suppress noise from parameter setting, machining tool selection, tooling fixtures using, etc., with a view to providing solutions for the prevention and control of machining noise in industrial enterprises. On this basis, the research prospects of machining noise of composite components, the generation and prevention of grinding noise, and the design of noise-reducing tooling fixtures are prospected.

Key words: machining; occupational hazards; noise

1 引言

随着我国航天制造业的蓬勃发展, 航天企业对航天产品的结构、强度和重量提出了更为严苛的要求。高精度、轻质化的复杂结构件, 例如火箭舱体、火箭燃料贮箱等大型薄壁构件, 作为高效率、高精度、高质量航天产品的代表, 其大尺寸和弱刚性的特点给制造加工技术带来了巨大的挑战。由于箭体用薄壁结构的弱刚性特征, 导致其在加工过程中会发生结构颤振现象, 这不仅会引起加工精度下降和效率降低, 并且

还会导致机械加工噪声的出现。

世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 认为, 长时间暴露在噪声环境中会导致一系列健康问题, 包括听力损伤、心血管和神经系统疾病、睡眠障碍等^[1-2]。除此之外, 噪声环境还会诱发焦虑、愤怒、抑郁等不良情绪^[3], 严重影响工人的正常工作和生活。国内外均对工业企业噪声的声压级进行了规定: 国际标准化组织 (International Organization of Standardization, ISO) 建议终身职业性噪声暴露水平不能超过 85dB; 欧洲法规 2003/10/EC 指出, 噪声超过

作者简介: 方凯悦 (1994), 博士, 固体力学专业; 研究方向: 复合材料高精度机械加工及装配技术。

收稿日期: 2022-07-04

85dB 的企业需启动噪声减排计划^[4]；我国对工业企业噪声的规定依据《工业企业噪声控制设计规范》（GBJ87—1985），即生产车间级作业场所，噪声最高不超过 90dB。通常地，当长时间处于噪声级超过 85dB

的环境中，造成耳聋的概率可达 50%，但绝大部分的机械加工场所均超过 85dB 的噪声暴露水平^[5-6]，这就迫使研究者们了解机械加工噪声的产生原因并进一步对噪声进行有效防治。



图 1 典型的箭体用弱刚性薄壁结构^[8-9]

已有大量研究关注于机械加工设备运转噪声的防治^[7]，但对于机械加工过程噪声的产生原因和防治方法，尤其是箭体用薄壁结构（如图 1 所示）的机械加工噪声的总结还不够充分。本文从车削、铣削、磨削三种常见的机械加工方式出发，阐述噪声产生原因和影响因素并对噪声防治方法进行综述，以为工业企业机械加工噪声的防治提供解决思路。

2 机械加工噪声的产生原因和影响因素

绝大部分的机械加工过程都包含冲击、摩擦和挤压等相互作用^[10]。当具有弹性的切削工具与被加工弹性工件作用时，二者先短暂离开相应的平衡位置，之后又弹回到原来的位置，进而产生持续性的振动。此时，刀具和工件表面及其附近的空气交替产生膨胀和压缩，以波的形式向周围传播，即为声波。如果声波振动产生的声压级过大，超过了规定的上限值，则被称作噪声。

2.1 车削噪声的产生原因和影响因素

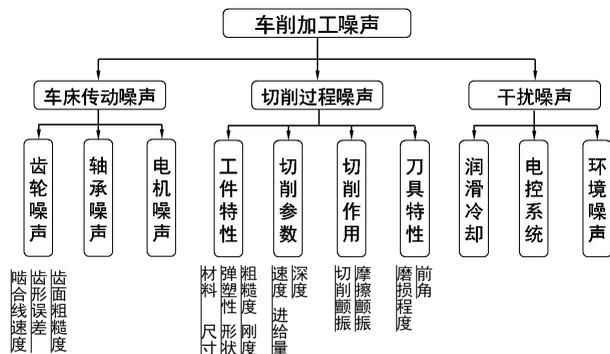


图 2 车削加工噪声的组成与影响因素

车削加工噪声主要由三部分组成，分别是车床传动噪声、切削过程噪声和干扰噪声（如图 2 所示）。当车床空运转时，噪声主要为机械传动和电动机产生的低频声（ $<2\text{kHz}$ ）^[11]；当刀具切入工件后，切削作用导致“刀具-刀架”系统振动而引发的高频声（ $2\sim 8\text{kHz}$ ）占主导部分^[12]。一般来说，车床传动噪声在整个加工过程中一直存在，而切削过程噪声的声压级更大、频率更高，因此更需要被考虑和抑制。

影响切削过程噪声的因素有很多，包括工件特性、切削参数、切削作用、刀具特性等，其中工件特性，例如工件的材料^[13]、形状^[14]、刚度^[14]等都会影响切削噪声声压级。庞怀玉等^[14]研究了弹体的车削加工噪声，发现弹体上高达 120dB 的高频噪声区出现在弹体的变截面部分，此处壁厚最小，刚度相比于前后支承部分较为薄弱；大量研究还表明弱刚性薄壁构件更易由于结构颤振而产生高频噪声^[8-14-15]。除了工件本身，机械加工中的切削参数也会对声压级和声压频带产生影响，包括切削速度^[13-16]、进给量^[13]、切削深度^[17-18]等。此外，切削作用导致的切削颤振和摩擦颤振，同样会对噪声的声压级和频率产生非常重要的影响。切削颤振是由周期性变化的切削力所激发的；摩擦颤振是由刀具和工件之间的摩擦作用引起的。摩擦颤振往往伴随高强度的尖啸噪声，通常频率在 1000Hz 以上，声压级高达 100dB，尤其在加工空腔型工件时更为显著（120dB）^[19]。研究发现，尖啸噪声总是在摩擦因数较大时出现（ $\mu = 0.38\sim 0.42$ ），此时刀具振动剧烈，刀具与刀杆振动产生的惯性力促使刀杆表面产生较大的应变（平均应变 $\varepsilon = 117.77\mu\varepsilon$ ）；当摩擦因数处于较低水平（ $\mu = 0.14$ ），刀杆振幅不大，应变变化平稳且

无尖啸噪声产生 ($\varepsilon = 95.27 \mu\varepsilon$) [20]。

2.2 铣削噪声的产生原因和影响因素

与车削加工的组成类似, 铣削加工噪声也由传动系统声、铣削过程声与其他干扰声混合而成[21], 这里同样重点讨论铣削过程噪声。影响铣削过程噪声的因素有很多, 包括进给速度、主轴转速、每齿进给量、轴向切削深度和工件刚度等[22-23]。有研究者认为, 声压级随着主轴转速的增加呈现先增大后减小的趋势; 随着每齿进给量的增加, 声压级由 88dB 增加到 95dB; 随着轴向切深从 0.5mm 变化到 2mm, 声压级由 91dB 增加到 100dB, 这都归因于铣削力的增加[23]。有研究者提出基于经验公式的铣削力 F_C 模型[8], 认为适当减小 F_C 有利于噪声的降低。除此之外, 研究发现铣削加工中声压级显著增大的最关键因素是工件的比刚度[22]。该研究指出, 工件刚度对声压级的影响在比刚度大于 1 时不显著, 但当刚度比小于 1 时, 声压级急剧增加到 100dB 以上, 此时铣削操作引起的结构颤振成为主导[22]。康鲁迪[23]和姚继铭等[8]认为, 薄壁结构会导致铣刀旋转频率的二倍频严重, 薄壁件的弱刚性导致其更容易在刀具轴向方向发生颤振, 由于薄壁结构的空腔特点, 使噪声愈加显著。

2.3 磨削噪声的产生原因和影响因素

在机加车间中, 磨削过程导致的噪声声压级增量 (12~18dB) 相比于车削 (1~10dB) 和铣削 (2.5~5.5dB) 更大, 特别是用砂轮进行切割或对金属薄板进行磨削时, 声压级高达 100dB 以上。在磨削过程中, 砂轮上的磨粒切削刃与工件表面发生接触, 砂轮磨粒和结合剂会与工件产生挤压和摩擦作用, 此时砂轮与工件之间的作用力被称为磨削力, 且磨削力 (特别是法向磨削力[24]) 与磨削过程产生的噪声有很强的相关性。研究表明, 磨削噪声与工件表面粗糙度、砂轮与工件的接触作用、磨削参数、砂轮钝化等有关[25]。当砂轮切削刃锋利、工件表面光滑时, 磨削力相应较小; 随着磨削深度的增加, 法向和切向磨削力都有相应的增加, 且法向磨削力增加幅度更大; 工件的进给速度增大, 法向和切向磨削力均增大; 磨削力随砂轮线速度的增大而减小, 速度增加使得磨粒切削厚度减小, 磨削力减小。

磨削过程中, 砂轮表面会在磨削力和磨削温度的共同作用下逐渐钝化。钝化的砂轮顶部被磨成平面, 促使磨削力增大, 甚至出现磨削振颤, 造成尖啸噪声产生。对于回转薄壁类工件, 壁薄、刚性差的特点使其在轴向和径向磨削力的作用下容易发生振动和变

形, 进而产生高频噪声[26]。

3 机械加工噪声的防治

3.1 参数设置和刀具特性

切削参数会影响噪声级的大小, 在加工刚度差工件时, 保持高速度、小切深、大切宽和适中进给量可以有效消除切削颤振[15-27]。表 1 总结了在车削、铣削过程中, 噪声声压级和声压频率随切削参数的变化关系, 可以作为降噪时的定性参考。

表 1 在车削、铣削过程中, 噪声声压级和声压频率随切削参数的变化关系

加工类型	参数变化	声压级变化	频率变化	参考文献
车削	切削速度 $v \uparrow$	↓		[16]
	切削速度 $v \uparrow$	↓↑		[13]
	切削速度 $v \uparrow$	↑		[17]
	切削深度 $a_p \uparrow$	↑	—	[18]
	切削深度 $a_p \uparrow$	↑		[17]
	切削进给量 $f \uparrow$	↑		[17]
	切削速度 $v \uparrow$		↑	[18]
铣削	铣削速度 $v \uparrow$	↑		[22]
	主轴转速 $n \uparrow$	↑↓		[23]
	主轴转速 $n \uparrow$	—		[28]
	每齿进给量 $f_z \uparrow$	↑		[22]
	进给量 $f \uparrow$	↑		[28]
	轴向切深 $a_p \uparrow$	↑		[22]
	轴向切深 $a_p \uparrow$	↑		[28]
	径向切深 $a_e \uparrow$	—		[22]
	径向切深 $a_e \uparrow$	↑		[28]

注: ↑ 增大 ↓ 减小 ↑↓ 先增大后减小 ↓↑ 先减小后增大 — 不变

此外, 刀具的材料、参数和安装方式也与噪声声压大小有关[15]。通过使用阻尼刀杆制成的刀具可降低车削噪声[10]; 在铣削刚性差的薄壁工件时, 应选小螺旋角、齿数少、圆角半径为零的刀具[15-29]。合理的刀具安装方式可消除单调噪声, 在主切削力方向, 刀具系统的固有频率 f_0 可依照下式得到[10], $f_n = \frac{A}{2m} \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$, 其中 A 为夹紧系数, m 、 L 、 E 、 I 分别为刀具单位长度的质量、刀具悬臂长度、弹性模量和惯性矩。在车削刚度较差的工件时, 刀具悬伸量缩短可以使刀具固有频率升高, 消除刀具-工件共振产生的单调噪声[10]。有研究显示, 当车刀杆悬臂长度由 68mm 缩短至 49mm, 切削噪声可由 93.5dB 降低至 79.5dB[30]。

3.2 工装夹具

工件的刚度大小直接影响加工过程噪声与加工精

度,因此为了提高工件刚度,可适当地增加支承或改变夹具结构。庞怀玉等^[14]为了减少弹体在车削过程中的摩擦型颤振,在壁厚最小、刚度最薄弱的变截面处增加辅助支承,因而改变了系统的固有频率,消除了125dB的高频噪声;对于薄壁回转体零件的外圆加工,肖彬等^[31]采用具有膨胀夹持胎或膨胀心轴结构的工装,将三爪夹持的集中荷载转换为径向圆周分布的载荷,提高了加工精度;陈雪芳^[27]和王娅等^[32]分别利用锥形圆盘顶尖和上下压板工装,有效克服了弱刚性工件的加工变形问题;王壮^[33]使用双排环形分布的辅助支撑钉对弱刚性薄壁环形工件的振动进行有效控制,工件刚度最小值从 $1.42 \times 10^6 \text{N/m}$ 增加到 $2.59 \times 10^6 \text{N/m}$,最大变形量由0.07067mm降低到0.0386mm,一阶固有频率从1451Hz增加到2308Hz。对大型薄壁壳体的加工,还有研究者通过使用外侧固定架有效提高结构刚性^[34],此外油泥填充等方法也被用于小型弱刚性构件的减震降噪^[35]。

3.3 吸声和隔声

吸声降噪只对混响声有效,而在直达声占主要地位的噪声声源旁,吸声处理的效果就会大大减弱。对于工程上应用广泛的多孔性吸声材料(例如超细玻璃棉、矿棉、毛毡、微孔板、膨胀珍珠岩^[36]),吸声系数受材料空隙率、材料厚度、材料饰面、环境温度湿度等因素的影响^[37-38]且通常多孔性吸声材料在低频范围(100~800Hz)^[36]内的降噪效果不显著(5~12dB)^[37]。

隔声材料和隔声构件能阻挡声能的传播,并把噪声源控制在局部范围内。常用的隔声装置有隔声室、隔声屏、隔声罩、隔声门窗等^[5],其中隔声室的隔声量为20~40dB;隔声屏对高频隔声量为10~15dB,对低频作用较小;固定式密封隔声罩的隔声值可达20~30dB;半封闭隔声罩为10~20dB^[38]。隔声结构的隔声性能受到许多因素的影响,入射声波的方向和频率、隔声构件的面密度和阻尼、有无吸声材料、有无孔和缝隙等因素均会影响隔声效果^[38],例如双层夹空腔板的隔声量(30~46dB)相比于单层板的值(21~33dB)更大。

3.4 切削液

在切削工件时,切削液可以有效减少切削阻力(15%~30%)并降低温度(100~150℃)^[15]。研究表明,在硬质合金刀具切削铝合金时,使用水基类高效乳化切削液可以起到良好的冷却和润滑效果,利于抑制摩擦型颤振的发生。罗玉军等^[20]利用涂抹过极压切削油的刀具对35钢正火(155HB)的薄壁圆筒进行切

削,声压级由93dB下降至75dB且抑制了尖啸噪声的出现。对于复合材料的切削,国外企业常用Synti109、Boelube100A、LB-4000和鲸蜡醇作为切削液;国内航空企业一般用蒸馏水或鲸蜡醇作为切削液^[39]。除了降低切削噪声,切削液的使用还可有效保护刀具并提高切削质量^[39]。

4 结束语

本文综述了机械加工噪声的产生原因和防治方法,发现已有的研究大多集中在金属材料的机械加工噪声,针对航天领域应用广泛的复合材料的噪声研究还比较少,需要进一步进行拓展;此外,已有一些研究利用声发射技术监测机械加工的过程从而判断刀具磨损情况等,对于机械加工噪声治理的研究还不够充分,尤其是磨削噪声的产生和防治;另外研究者常关注弱刚性构件在循环荷载作用下的加工稳定性,对噪声的系统性研究还不足,尤其是在工装降噪方面多聚焦于振动的抑制,对降噪量的研究还不够充分。

参考文献

- Basner M, Babisch W, Davis A, et al. Auditory and non-auditory effects of noise on health[J]. Lancet, 2014, 383:1325~1332
- Muzet A. Environmental noise, sleep and health[J]. Sleep Med. Rev., 2007, 11: 135~42
- Miedema H M, Oudshoorn C G. Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals[J]. Environ. Health Perspect., 2001, 109: 409~416
- Bley H, Günther K G, Haeusler J, et al. Machine Concentration and Noise Annoyance in the Workshop[J]. CIRP Annals, 1980, 29(1): 269~273
- 刘茜, 史聪灵, 伍彬彬, 等. 某大型机加车间数控机床减噪工程测试与分析研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(11): 164~169
- 李美琴, 唐壮娜. 国防企业典型噪声设备工人接触水平及防护措施分析[J]. 职业与健康, 2020, 36(22): 3148~3149
- Wegener K, Bleicher F, Heisel U, et al. Noise and vibrations in machine tools[J]. CIRP Annals, 2021, 70(2): 611~633
- 吕九九, 白景彬, 侯东旭, 等. 运载火箭超大直径舱段铆接装配研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(3): 95~99
- 姚继铭. 薄壁构件铣削加工过程力学建模及其稳定性分析[D]. 天津: 天津大学, 2017
- 余旅滨. 切削噪声的控制[J]. 工业技术经济, 1995, 14(1): 58~61
- Sinay J, Baláziková M, Dulebová M, et al. Measurement of low-frequency noise during CNC machining and its assessment[J]. Measurement, 2018,

- 119: 190~195
- 12 王太勇, 郭红旗, 赵国立, 等. 车削加工噪声的产生及其控制研究[J]. 噪声与振动控制, 1998(2): 31~32
- 13 Tekiner Z, Yeşilyurt S. Investigation of the cutting parameters depending on process sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel[J]. Materials & Design, 2004, 25(6): 507~513
- 14 庞怀玉, 曾荣芳, 王志信. 弹体车削加工噪声治理的研究[J]. 太原机械学院学报, 1989, 10(3): 41~46
- 15 潘斌, 袁军堂, 胡小秋, 等. 铝合金薄壁整体构件的高速铣削试验研究[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(5): 42~44
- 16 Sadat A B, Raman S. Detection of tool flank wear using acoustic signature analysis[J]. Wear, 1987(115): 265~272
- 17 郭鹏. 切削加工过程中声音信号的实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2007
- 18 Grbec I, Leskovar P. Acoustic emission of a cutting process[J]. Ultrasonics, 1977(1): 17~20
- 19 庞怀玉, 曾荣芳, 纪勇. 车削噪声的再现实验系统与工程应用[J]. 噪声与振动控制, 1993(2): 29~32
- 20 罗玉军, 高中庸, 李宝灵. 摩擦因数对切削尖啸噪声形成的影响[J]. 润滑与密封, 2011, 36(9): 82~85
- 21 Stupakov A, Neslušán M, Perevertov O. Detection of a milling-induced surface damage by the magnetic Barkhausen noise[J]. J. Magn. Magn. Mater., 2016(410): 198~209
- 22 Rech J, Dumont F, Le Bot A, et al. Reduction of noise during milling operations[J]. CIRP J. Manuf. Sci. Tec., 2017(18): 39~44
- 23 康鲁迪. 中空结构铝合金高速铣削噪声产生机理与试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014
- 24 刘蒲生, 严文浩. 磨削力[J]. 磨料磨具与磨削, 1983(3): 41~47
- 25 杨杨. 纤维增强复合材料的磨削及基于声发射信号砂轮磨损状态识别研究[D]. 天津: 天津大学, 2011
- 26 丁建设. 磨削回转薄壁类零件的工装设计[J]. 金属加工, 2019(2): 50~51
- 27 陈雪芳, 崔凤有. 薄壁类风筒工件的加工方法优化[J]. 制造技术与机床, 2018(7): 108~109
- 28 黄信, 刘莉, 赵立. 数控加工的铣削噪声建模[J]. 机床与液压, 2010, 38(19): 36~39
- 29 戴斌华. 超薄零件数控高速切削工艺的应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002
- 30 张立华. 面向绿色制造的机床——车间系统降噪研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2005
- 31 肖彬, 许峰国, 沈勇, 等. 典型薄壁回转体零件加工分析及工装设计[J]. 机械工程师, 2015(9): 228~229
- 32 王娅. 精密薄壁零件变形分析与工装优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2014
- 33 王壮. 弱刚性薄壁环形工件装夹布局优化与振动控制[D]. 大连: 大连理工大学, 2020
- 34 李治斌. 大型薄壁壳体机械加工[J]. 航天工艺, 1992(3): 47~49
- 35 杜海清, 李洁松, 盛国栋. 弱刚性薄壁工件车削工艺方案的研究[J]. 制造技术与机床, 2020(4): 90~93
- 36 Tao Y P, Ren M S, Zhang H, et al. Recent progress in acoustic materials and noise control strategies-A review[J]. Appl. Mater. Today, 2021, 24(238): 101~141
- 37 盛美萍, 王敏庆, 孙进才. 噪声与振动控制技术基础[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2007
- 38 吕玉恒, 王庭佛. 噪声与振动控制设备及材料选用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 39 邱建平, 杨旭, 周莹, 等. 复合材料钻削用切削液润滑质量对比研究[C]. 见: 第九届中国航空学会青年科技论文集. 第九届中国航空学会青年科技论坛, 西安: 中航出版传媒有限责任公司, 2020