

◎ 清/洁/生/产/技/术/系/列/丛/书

干切削加工 技术及应用

Dry Machining Technology and Application

刘志峰 张崇高 任家隆 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

清洁生产技术系列丛书

干切削加工技术及应用

Dry Machining Technology and Application

刘志峰 张崇高 任家隆 编著



机械工业出版社

本书全面系统地阐述了干切削加工技术，内容包括干切削技术的产生背景和基础理论、干切削加工的实施条件和基础研究、切削液的作用及其使用、干切削技术的应用、干切削加工的刀具、干切削加工机床及工艺装备和干磨削加工等。本书内容丰富新颖，既包含对于切削的概念、理论及方法的探讨，又有大量的应用实例，对于干切削加工技术的研究和应用有很好的指导意义。

本书既可供机械加工企业的工程技术人员参考，也可供相关专业的研究人员及在校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

干切削加工技术及应用/刘志峰等编著. —北京: 机械工业出版社, 2005.3

(清洁生产系列丛书)

ISBN 7-111-16105-X

I. 干… II. 刘… III. 金属切削-加工工艺 IV. TC506

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 008872 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 陈保华 版式设计: 张世琴 责任校对: 樊钟英

封面设计: 陈 沛 责任印制: 洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷

2005 年 9 月第 1 版第 2 次印刷

890mm×1240mm A5·8.375 印张·247 千字

4 001 000 册

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68326294
封面无防伪标均为盗版

序

切削加工是制造业的主要加工方法，也是当前环境污染的主要源头之一。干切削加工技术是实现绿色制造的关键技术，是一种先进的制造技术。21 世纪，制造业必将持续发展，要求产品的制造过程应当在保证高生产效率和优良质量的同时，又能维护生态良性循环。干切削加工技术就是在切削过程中不用（或少用）切削液的加工工艺方法，是一种绿色制造工艺，对保护环境、节省能源和资源，降低制造成本具有重要意义。随着机床、刀具和相关工艺研究的深入，干切削技术必将成为切削加工技术的主要发展方向。

干切削加工早已得到重视，作为一门新兴技术进行研究和应用始于 20 世纪 80 年代中期。在 20 世纪 90 年代，德国、美国、日本等工业发达国家已将干切削加工列为工艺研究的重点。目前有些干切削和准干切削技术已进入推广和应用阶段。我国一些高校和科研院所也进行了干切削加工技术的研究和探讨，并取得了一定的成果。随着加工精度和表面质量要求的不断提高以及各种难加工材料的不断涌现，实现干切削过程的难度不断加大。干切削加工技术的发展和运用，必须与与之相关的机床结构设计与材料、高性能刀具技术、高效高精度测试技术、加工工艺方法等诸多方面开展深入研究。由此可见，干切削技术是一门综合性技术。

本书系统地阐述了干切削技术的产生背景和基础理论；介绍了切削液的作用和对环境的影响；列举了大量的国内外干切削技术应用的实例；从实施条件出发介绍了干切削加工的刀具、干切削加工机床及工艺装备以及干磨削加工等。作者参阅了国内外的最新文献和专著，结合了自己的研究成果，收集了应用中的经验和问题，内容丰富，兼

顾了理论与实践两方面，具有很好的先进性、科学性、系统性和实用价值。本书的问世，必将在制造业中产生巨大影响，对我国绿色制造和干切削加工技术的研究和应用起到有力的推动作用。

于启勋

前 言

资源、环境和人口是人类社会发展所面临的三大问题。20 世纪后半叶，经济高速发展、资源的无节制消耗、工业污染物的过量排放以及人口“爆炸”，是其直接和主要原因。我国的环境和资源问题也很突出，以资源、环境为代价，换取眼前局部利益的短期行为所造成的后果已经并继续威胁我国人民的生存和经济、社会的健康发展。鉴于制造业对生态、环保和资源等起直接和主要影响，故如何使企业进行环境友善生产和资源最佳配置，是 21 世纪经济、社会发展的关键之一。

制造业是工业的基础，而切削加工又是制造过程中的重要组成部分。在传统的切削加工中，切削液占有重要的地位，因为它具有冷却、润滑、清洗、降低切削力和改善工件表面质量等功效，是大多数加工过程不可缺少的生产要素之一。但是它的使用也带来了越来越多的问题，如增加了产品成本、造成环境污染等。如何在保证加工质量的前提下，减少或消除切削液的负面影响已经成为切削加工研究及应用的主要问题。

继高速加工在 20 世纪 80 年代中期取得突破和应用领域不断扩大之后，工业发达国家在 20 世纪 90 年代中期把切削工艺研究和开发的重点转向了干加工。例如，在德国，联邦教育、科学、研究和技术部在 1995 年制定和启动了研究和开发称之为“21 世纪工业生产战略”的干加工工艺科研框架项目“生产 2000”，并为此提供了 4.5 亿马克的研究开发经费，组织了包括机床厂、刀具厂和汽车厂在内的 18 家企业和 9 个高校研究所协同攻关。经过 4~5 年的开发，干切削加工在工业生产中已获得了成功应用，表明不用切削液或采用微量切削液的切削加工（准干切削加工）技术已进入推广应用阶段。据统计，现在已有 20% 左右的德国企业采用了干切削技术。

干切削加工是绿色制造战略实施的具体体现，目前已成为切削加工领域的研究热点之一。随着制造业的发展，严格的环境立法和激烈

的市场竞争,干切削加工必将在所有的切削加工方法中得到应用。

我国干切削加工的研究和应用与工业发达国家还有一定的距离,但已经引起了政府、企业和研究人员的广泛重视,也发表了一定数量的介绍性或研究性的论文。为了更系统的阐述干切削加工的原理、方法,把成功的应用实例和经验介绍给有关研究人员和工程技术人员,作者以自己的研究成果和研究经验为基础,并结合大量的国内外应用实例写成了本书。

本书共分为7章,系统地阐述了干切削技术的产生背景和基础理论;介绍了切削液的作用及其使用;列举了大量的国内外干切削技术应用的实例;从实施条件出发介绍了干切削加工的工具、干切削加工机床及工艺装备以及干磨削加工等。全书由刘志峰教授策划,张崇高教授完成了第3章的编写,任家隆教授承担了第2章和第4章部分内容的初稿编写,其余内容由刘志峰教授完成编写并统稿。在编写过程中张崇高教授对全书提出了许多宝贵的建议并审阅了全书,研究生倪楠参与了有关资料的收集和整理工作。

北京理工大学的于启勋教授在百忙之中为本书写了序,并对全书写作过程给予了极大地关怀,在此表示衷心感谢。还要特别感谢机械工业出版社的陈保华编辑,在他的支持和帮助下,才使本书的出版成为可能。

本书既包含对于切削的概念、理论及方法的探讨,又有大量的应用实例;既可作为机械加工企业的工程技术人员进行技术改造、更新知识、继续教育的辅助资料,也可作为大专院校机械设计制造及自动化等有关专业的本科生和研究生的教材或教学参考书,还可作为高校教师及科研人员的参考资料。

绿色清洁生产是21世纪工业生产的发展趋势,国内外对于切削加工技术的关注和研究,必将推动其在实际生产中的有效应用。本书作为“清洁生产技术系列丛书”之一,将为推广干切削加工技术的研究和应用做出贡献。

由于干切削加工技术尚处在发展之中,也由于作者的水平和实践经验有限,书中错误在所难免,恳请各位读者提出宝贵意见,以便于进一步完善。

目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 干切削加工的产生背景	1
1.1.1 制造业对环境的影响	1
1.1.2 可持续发展对制造业的约束	3
1.1.3 绿色制造是可持续发展的必由之路	4
1.2 干切削加工的内涵及特点	6
1.2.1 对干切削加工的认识	6
1.2.2 干切削加工的内涵	7
1.2.3 干切削加工的特点	9
1.3 干切削加工技术的国内外研究和应用现状	10
1.4 干切削加工的研究体系和关键技术	12
1.4.1 干切削加工的研究体系	12
1.4.2 干切削加工的关键技术	14
第 2 章 干切削加工的实施条件和基础研究	17
2.1 干切削加工实施条件分析	17
2.1.1 现有切削条件分析和实施干切削的主要难点	17
2.1.2 干切削实施条件分析	17
2.2 干切削加工的研究内容	23
2.2.1 干切削方法的研究	23
2.2.2 干切削条件的基础研究	29
2.3 干切削加工的理论综述	33
2.4 准(亚)干切削加工	37
2.4.1 准(亚)干切削加工的原理	37
2.4.2 其他准(亚)干切削加工方法	42

第 3 章 切削液的作用及其使用	46
3.1 切削液的作用	46
3.1.1 切削液的冷却作用	46
3.1.2 切削液的润滑作用	47
3.1.3 切削液的其他作用	48
3.2 切削液的分类和添加剂	49
3.2.1 切削液的分类	49
3.2.2 添加剂	52
3.3 切削液的评价	54
3.3.1 切削液的副作用	54
3.3.2 切削液的环境分析	55
3.3.3 切削液的性能分析	55
3.4 切削液的使用和发展趋势	57
3.4.1 切削液的使用模型	57
3.4.2 切削液的选用	58
3.4.3 切削液的使用方法	59
3.4.4 切削液的发展趋势	60
3.5 切削液的处理	64
3.5.1 切削液的净化	64
3.5.2 切削液的处理方法	68
第 4 章 干切削技术的应用	70
4.1 干车削加工	70
4.1.1 硬车削	70
4.1.2 低温冷却车削加工	86
4.1.3 激光辅助干车削加工	96
4.2 干铣削加工	97
4.2.1 干铣削加工及特点	97
4.2.2 干铣削加工的应用	98
4.3 干钻削加工	103
4.3.1 干钻削加工及特点	103
4.3.2 干钻削加工的应用	109

4.4 干式齿轮加工	113
4.4.1 干式滚齿加工	113
4.4.2 干式插齿加工	118
4.4.3 干式齿轮加工应用实例	120
4.5 其他干切削加工方法	121
4.5.1 干式螺纹加工	121
4.5.2 螺纹旋风硬铣削	125
4.5.3 超声振动镗削	129
4.5.4 静电冷却干切削技术	132
4.6 干切削工艺的综合应用	135
第5章 干切削加工的刀具	138
5.1 干切削加工对刀具的要求	138
5.2 干切削加工刀具材料的选择	140
5.2.1 刀具材料的发展	140
5.2.2 干切削刀具材料	141
5.3 涂层刀具	158
5.3.1 涂层硬质合金刀具的发展	158
5.3.2 常用涂层及其性能	160
5.3.3 超硬材料涂层	173
5.3.4 软硬组合涂层	181
5.3.5 纳米涂层刀具	185
5.3.6 刀具涂层对加工表面质量的影响	187
5.4 干切削刀具结构设计	188
5.4.1 干切削刀具结构的设计准则	188
5.4.2 干车(铣)刀具设计要点	190
5.4.3 干螺纹加工刀具设计要点	194
5.4.4 其他干切削刀具的设计	195
第6章 干切削加工机床及工艺装备	198
6.1 干切削对机床的要求	198
6.2 干切削机床机械结构设计	199
6.2.1 干切削机床支承件的设计	200

6.2.2 主轴组件的设计	202
6.2.3 进给传动机构与导轨的设计	206
6.2.4 排屑机构的设计	207
6.2.5 MQL 装置的设计	208
6.3 干切削机床研发	212
6.4 干切削加工的夹具和工具系统	220
6.4.1 干切削机床夹具	220
6.4.2 干切削刀具的刀柄结构	222
第 7 章 干磨削加工	225
7.1 磨削及其环境问题	225
7.1.1 磨削的特点	225
7.1.2 磨削加工的环境问题	226
7.1.3 磨削液的净化处理与管理	227
7.1.4 环保型磨削加工技术	230
7.2 干磨削	231
7.2.1 干磨削的可能性分析	232
7.2.2 强冷风干磨削	233
7.2.3 低温 CO ₂ 干磨削	241
7.2.4 点磨削技术	244
7.3 准干磨削	248
参考文献	251

第 1 章 概 述

当前，一个以降耗、节能、节材、减废、有利于环境保护和人的身心健康的、实行清洁安全生产的“绿色工程”已在工业发达国家兴起。实行“绿色工程”，开发“绿色制造技术”是新世纪切削加工发展的重要课题。切削加工中的切削液对环境的污染、对操作者健康的伤害，成为当前治理的重点，但是对切削液所造成危害的治理却使制造成本显著增加，从而导致了干切削新技术的开发，并出现了微量润滑切削、冷风切削等准干切削新工艺。干切削加工是绿色制造实施的具体体现，目前已成为切削加工领域的研究热点之一。随着制造业的发展，严格的环境立法和激烈的市场竞争，干切削加工必将在所有的切削加工方法中得到应用。

1.1 干切削加工的产生背景

1.1.1 制造业对环境的影响

制造业是将可用资源（包括能源）通过制造过程，转化为可供人们使用和利用的工业品或生活消费品的产业。它涉及到国民经济的大量行业，如机械、电子、化工、食品、军工等。制造业的发展有力地促进了社会经济的发展，极大地丰富了人类的物质文明，但同时又是当前环境污染的主要源头之一。图 1-1 表示了制造业与环境之间的

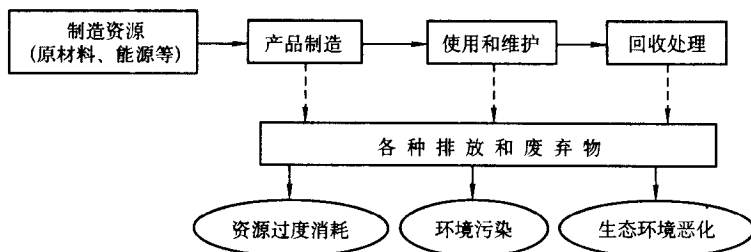


图 1-1 制造业对环境的影响

关系。其中虚线表示产品制造过程和使用过程对环境直接产生的污染。制造业对环境的影响主要表现在以下几个方面：

(1) 资源过度消耗。随着技术发展和人们物质文化水平的提高，无论是机电产品还是人们的日常生活用品都越来越追求高性能化和高附加值化，伴随而来的是这些产品和材料的大量生产、大量消费和大量废弃，从而导致地球上的有限资源锐减，资源过度消耗。据有关部门统计，我国从 1952 年到 1987 年间国民经济增长了 8.9 倍，而能源消耗增长了 14.9 倍，有色金属消耗增长了 23 倍，铁矿石消耗量增长了 24 倍。现在我国许多矿产的后备资源已明显不足。

(2) 环境污染严重。制造业是人类社会的传统产业，它的历史可以追溯到远古时代，人们磨制石器、铜器和铁器用来农业生产和捕猎。制造业是最大的资源使用者，它在给我们创造巨额财富的同时，也给社会带来了大量的资源消耗和环境污染，对经济和社会的可持续发展构成十分严峻的威胁。据美国工业有害物来源统计表明：金属加工业占工业废物来源的 5%，排位第 4。制造业在将制造资源转变为产品的过程中同时产生废弃物，制造业每年排出的三废（废气、废水、废渣）造成严重的大气污染、水体污染、土壤污染和生物污染。工业烟尘和粉尘排放量占大气排放总量的 75%。我国工业废水排放量占有水排放量的 70%，其中 80% 以上未经任何处理直接排放到江河湖海。随着用水量增大和水污染加剧，“净水”在减少，水荒在困扰着许多城市和农业的发展；固体废弃物堆存量越来越大，目前我国工业废弃物排放量（5.8 亿 t）占固体废弃物排放量的 87%，存在着严重的威胁。据有关资料报道，世界银行估算我国大气污染和水体污染对人体健康造成的影响所相当的经济损失是每年 2422.8 亿元，占我国国民经济生产总值的 3% 左右。切削加工中产生的切屑和使用的切削液也是造成大气、水体、土壤等污染的因素。全球每年消耗的切削液的总量大约在 700 000 ~ 850 000t/a，对环境是一个巨大的负担。

(3) 生态环境日益恶化。目前的经济增长方式，主要是以自然资源的高投入、高消费为主要特征。由于制造业的发展对资源、能源的需求不断增加，环境污染不断加剧，因而制造业发展带来的生态环境

破坏亦日趋严重。

1.1.2 可持续发展对制造业的约束

面对工业社会所带来的严峻问题，人们在深刻地反思传统的发展观、价值观、环境观和资源观。发展是人类社会不断进步的永恒主题，但是种种始料不及的环境问题击破了单纯追求经济增长方式的经济发展模式，全世界都在理性地探索新世纪的发展模式和发展战略，寻求一条既能保证经济增长和社会发展，又能维护生态良性循环的全新发展道路，可持续发展就是在这一背景下提出来的。

可持续发展具有两个最基本的要点：一是强调人类享有追求健康而富有生产成果的生活权利，但应该坚持与自然相和谐，而不应是凭借人们手中的技术和投资，采取耗竭资源、破坏生态和污染环境的方式来追求这种发展权利的实现；二是强调当代人在创造和追求今世发展与消费的时候，应当承认并努力做到使自己的机会与后代人的机会相平等，不能允许当代人一味地、片面地、自私地为了追求今世人的发展与消费，而毫不留情地剥夺后代人本应享有的同等发展与消费的机会。

制造业是工业的基础，而切削加工又是制造过程中的重要组成部分。在传统的切削加工中，切削液占有重要的地位，因为它具有冷却、润滑、清洗、降低切削力和改善工件表面质量等功效，是大多数加工过程不可缺少的生产要素之一。但是它的使用也带来了越来越多的问题，如增加了产品成本、造成环境污染等。使用过的废切削液中，有的含有有害成分（如 Cl 和 S），有的含有大量的矿物油及乳化剂。乳化剂易被植物吸收，不少乳化剂有增加致癌物的作用。在我国，多年来工厂的废切削液是不经过任何处理而直接向下水道排放的。一个大型的轴承厂每年耗用的乳化溶解油约 150t，排放的废液约达 7000 ~ 10000t；一个中型的轴承厂每年耗用的乳化溶解油约 15 ~ 20t，排放的废液约达 1000 ~ 1500t。其中含有亚硝酸钠、硝酸钠等腐蚀剂和表面活性剂等，严重地污染了水资源和环境。

针对切削液的环境污染，各国都制定了相关的法律。我国 GB 8978—1996《污水综合排放标准》规定了工业污水排放的标准。切削液在生产成本中所占的比例已经达到了 13% ~ 17%，而且切削液的

排放严重污染了土壤、大气和水资源，使人们的生活环境质量下降并危害身心健康。在德国，对废液、废屑的处理作了严格的规定，所涉及的法律文件从 1950 年仅两个到 1993 年增加到了 28 个，而且还有进一步增加的趋势。1996 年，国际标准化组织公布了 ISO 14001 环境管理系统标准，在工业发达国家的制造业掀起了对这项标准的认证活动，治理切削液对环境造成的污染和对操作者身心健康带来的危害，成为此次取证活动的一项共同内容。

我国的工业污染负荷占全国污染负荷的 70% 以上。多年来，工业污染一直是我国环境保护工作的重点。在“预防为主，防治结合，综合治理”、“谁污染，谁治理”和“强化环境管理”三大对策以及各项环境管理制度的推动下，工业污染防治工作取得了很大的进展，对遏制工业污染的迅速扩展发挥了历史作用。但是，另一方面，长期以来把保护环境的人力、物力、财力重点放在了生产末端污染排放的处理上，实行以排放标准为依据的排污收费制度和相应的污染控制政策，没有从根本上解决生产污染的问题。

因此，虽然人类消耗巨资进行环境管理和污染控制，但是人类赖以生存的环境并没有得到好转，而且还不断地向人类发出警告，新的环境问题又在不断地接踵而来。反思过去的战略及技术路线时发现，忽略“全过程控制”、“从源头抓起”，而只注重末端治理，是一个重要原因。按照可持续发展的要求，改变传统的发展战略和生产模式，协调社会和自然的相互关系主要应着眼于消除造成污染的根源，而不仅仅是消除污染的后果，这既是战略方向，又是主要手段。切削液的污染治理问题，也应该从源头抓起，在切削过程中尽量少用或者不用切削液，实施干切削，从源头切断污染源。

1.1.3 绿色制造是可持续发展的必由之路

如何使制造业在生产出不断满足人们物质和文化需求的产品的时候，有效地利用资源和能源，尽可能少地产生环境污染已经成为当前制造科学方面面临解决的重大问题。为此，经过人们不断地努力，涌现出了许多新的生产方式、生产技术。例如，从 20 世纪 90 年代以来，制造业的生产方式已经由高效大量生产型向低环境负荷的方式发展，如图 1-2 所示。

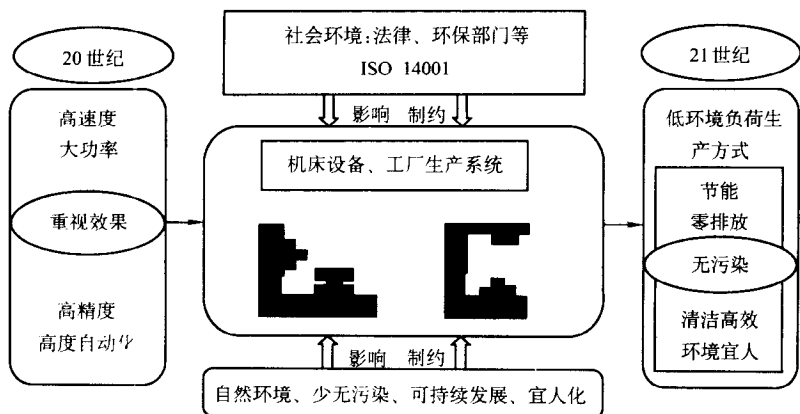


图 1-2 生产方式指导思想的变迁

面对竞争激烈的国际市场,企业需要通过绿色制造的实施来获取更大的经济效益。经济全球化和国际商品市场的逐渐形成,使得制造业面临的竞争更加激烈,如何获得更大的经济效益,求得生存,是制造业所面临的最大挑战。绿色制造可以使制造业通过有效地配置资源,合理利用资源,最终赢得市场竞争,获得更大的经济效益。

发展生产和保护环境已经成为一对相互对立的矛盾,经过人们多年探讨和大量实践,逐步认识到解决这一矛盾的唯一途径就是转换经济增长模式。就制造业来说,就是从传统制造模式向可持续发展模式转变,即从高投入、高消耗、高污染的粗放型发展模式转变为集约型发展模式——提高生产效率、最大限度地利用和减少废弃物。这样的发展模式需要通过绿色制造技术来实现。研究和绿色制造技术是解决环境问题,实现可持续发展的关键。

与环境有关的法律及国际标准对制造过程及其相关活动的要求越来越严格。为了改善环境质量,防止环境污染的进一步产生,世界各国的政府部门和一些国际性组织制定了许多法律法规来约束产品的制造过程及其相关活动,而且标准的要求有越来越严格的趋势。因此,制造业必须通过应用各种技术方法来满足相关法律法规的要求。

保护环境已经成为国际贸易中的主要准则,国际标准化组织也正式颁布了 ISO 14000 系列环境管理标准。发达国家根据自己技术上和

经济上的优势，不断设置严格的进出口标准，形成了“绿色贸易壁垒”。据统计，我国每年因不符合环境标准要求而造成的出口损失高达 40 亿美元，实施绿色制造是打破“绿色贸易壁垒”的有效手段。

作为绿色制造的具体体现之一，干切削加工是一种先进的制造技术。它摒弃了传统切削加工中使用的切削液，可完全消除切削液带来的负面影响，适应了 21 世纪清洁生产和降低成本的要求，较好地解决了生态环境、技术与经济间的协调关系与可持续发展。

1.2 干切削加工的内涵及特点

1.2.1 对干切削加工的认识

在切削加工中加注切削液，为降低切削温度，断屑与排屑起到了很好的作用，但也存在着许多弊端。例如，维持一个大型的切削液系统需化费很多资金。同时需要定期添加防腐剂，更换切削液等，因而增加了许多费用。加之由于切削液中的有害物质，对工人的健康造成危害，也使切削液使用受到限制。为此，干切削则应运而生。干切削作为一门新技术，有一些新的问题，并要澄清许多模糊的认识。为此，美国 Michigan 技术大学（MTU）进行了大量的调查研究 and 比较性的切削试验，深入地分析研究了使用切削液对工人的健康、刀具使用寿命、切削力和力矩及加工质量等多方面的影响。以提高人们对干切削新技术的认识。

（1）工人的健康。MTU 所作的大量调查研究认为，切削液的使用，会使生产环境恶化，长期接触，可感染皮肤病与气管炎等，给工人健康与安全造成威胁。所以许多国家规定出严格的环卫标准，例如，由美国环境保护局（EPA）规定，要求空气中有害物质的允许含量，由原来的 $5.0\text{mg}/\text{m}^3$ 降低到 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 。且空气中的有害物质允许的颗粒（PM）（直径大小）由原来的 $10\mu\text{m}$ 下降至 $2.5\mu\text{m}$ 。而要达到这样的标准，需要高精度的切削液过滤装置、空气净化设备等，大大增加了制造成本，就这一点而言，已远远超过了使用切削液带来的优点。

（2）刀具的使用寿命。通常认为，加注切削液可以提高刀具使用寿命。然而从 MTU 在切削速度为 $v = 130\text{m}/\text{min}$ 条件下，所作的切削