



装备科技译著出版基金



高科技译丛

Machining of Metal Matrix Composites

# 金属基复合材料加工

【葡】 J. Paulo Davim 编 贾继红 孙晓雷 牛 群 译  
魏 智 许爱芬 主审



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译者出版基金

# 金属基复合材料加工

Machining of Metal Matrix Composites

[葡] J. Paulo Davim 编

贾继红 孙晓雷 牛群 译

魏智 许爱芬 主审

国防工业出版社

·北京·

# 著作权合同登记 图字:军-2013-070号

## 图书在版编目(CIP)数据

金属基复合材料加工/(葡)大卫姆(Davim J. P.)编;贾继红,孙晓雷,牛群译. —北京:国防工业出版社,2013.8

(高新科技译丛)

书名原文:Machining of metal matrix composites

ISBN 978-7-118-08911-0

I. ①金… II. ①大… ②贾… ③孙… ④牛… III. ①金属复合材料—加工—研究IV. ①TB331

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第168499号

Translation from English language edition:

*Machining of Metal Matrix Composites*

by J. Paulo Davim

Copyright © 2012 Springer London

Springer London is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer Science+Business Media 授权国防工业出版社独家出版发行。版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 880×1230 1/32 印张 6 $\frac{3}{8}$  字数 156千字

2013年8月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 48.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 译者序

*Machining of Metal Matrix Composites* 是一本介绍碳化硅颗粒增强型金属基复合材料加工为主的专著,为读者提供了金属基复合材料特别是铝基复合材料加工方面的知识。

这本专著的亮点有两个:一是许多章节由该领域权威专家亲自撰写;二是书中对金属基复合材料的加工过程给出了翔实的介绍并提供了丰富的数据资料。这些宝贵的加工经验与数据资料使本书具有很高的实践性和强有力的说服力,这些更是国内外同类图书无法比拟的。因此,我个人认为,无论对于高校和各科研院所的研究学者,还是工作于生产一线的工程师,这都是一本非常难得的好书!也因此决心把它翻译出来方便大家参阅。

和我共同完成这本译稿的有:河北工业大学的魏智教授,牛群、孙晓雷同志,和军事交通学院的许爱芬副教授。在译稿的过程中,我们尽量尊重原著,但由于中外语言习惯的不同,个别语句的语序和表达方式上还是做了调整;另外,有些前沿的加工术语目前

没有查到统一的中文译法,我们按照实际的加工经验译出,并给与解释。这也是本译稿欠缺和遗憾之处,请读者给与谅解。但无论怎样,大家为了这本译稿付出了很多辛苦,竭尽全力,目的只有一个:把此书送到急需那些加工经验和实验数据的研究者们手中,并扫清阅读障碍。

在这里,我要感谢总装备部拨款资助我们翻译出版该书;感谢国防工业出版社的编辑同志给与我们的大力支持!我谨代表所有译者向你们致敬!

贾继红  
2013.6

# 前 言

近些年,由于金属基复合材料(MMC)的特殊物理特性,使其在各种科技领域的使用得到提升。MMC,特别是铝基复合材料,具有高强度重量比、高硬度、更低的热膨胀率、高热导率,同时具有较高的耐腐蚀性和耐磨性,因此 MMC 有潜力替代如汽车、航空、航天以及其他先进工业领域所应用的传统材料。为了使金属基复合材料在各领域中得到广泛的应用,必须解决其加工问题。由于 MMC 具有不均匀性,并且增强体非常粗糙、变形复杂、较高的刀具磨损和表面粗糙度,所以 MMC 的加工是一个相当复杂的工作。

本书的第 1 章介绍了有关 MMC 加工中切屑的形成机制和建模;第 2 章致力于研究加工中金属基复合材料的表面质量;第 3 章主要描述了金属基复合材料的切削性;第 4 章包含了金属基复合材料的传统加工工艺;第 5 章致力于研究金属基复合材料的磨削加工;第 6 章介绍了碳化硅颗粒增强金属基复合材料的千切削;第 7 章是关于金属基复合材料加工的计算方法和优化。

本书可以作为本科课程最后阶段的课本或研究生阶段关于制造业学术论文的参考,另外,本书可为大学教师、制造业和材料学研究员、制造商、材料学和力学工程师和复合材料及有关行业的专业人员提供有用的参考。本书对世界各地许多重要的研究、实验室和大学的科研利益是显而易见的,因此,希望本书能够激励和鼓舞加工科学技术这一领域的其他研究。编者感谢斯普林格给予我这个机会并且提供热情和专业的支持。最后,我想感谢所有章节的作者,是他们使这本书具有实用性。

J. Paulo Davim  
2011年3月

# 目 录

<b>第 1 章 MMC 加工中切屑的形成机制和建模</b> .....	1
1.1 简介 .....	1
1.2 颗粒增强金属基复合材料的加工 .....	2
1.2.1 切削速度的影响 .....	3
1.2.2 进给量的影响 .....	4
1.2.3 背吃刀量的影响 .....	5
1.2.4 增强体的影响 .....	5
1.2.5 刀具 .....	6
1.3 纤维增强金属基复合材料的加工 .....	6
1.4 MMC 的加工机制 .....	8
1.4.1 通过加工解析模型预测切削力 .....	8
1.4.2 MMC 加工中的切削温度 .....	12
1.4.3 颗粒增强 MMC 加工中的切屑形成 .....	15
1.4.4 纤维增强 MMC 加工中的切削力 .....	21
1.5 加工中的有限元建模(FEM) .....	25
1.5.1 FEM 简介和方法 .....	26
1.5.2 要素 .....	27
1.5.3 切屑分离准则 .....	30



1.5.4	刀具-切屑接触面的摩擦力 .....	31
1.6	MMC 加工建模 .....	32
1.6.1	颗粒增强 MMC 的建模加工 .....	33
1.6.2	纤维增强 MMC 的模拟加工 .....	49
1.7	结论 .....	54
	参考文献 .....	55
<b>第 2 章</b>	<b>加工中金属基复合材料的表面质量 .....</b>	<b>66</b>
2.1	简介 .....	66
2.2	表面完整性 .....	67
2.3	表面完整性的评估技术 .....	68
2.3.1	光学和扫描电子显微镜 .....	69
2.3.2	表面与次表面的塑性变形分析 .....	72
2.3.3	表面和次表面的残余应力分析 .....	72
2.3.4	表面形貌 .....	75
2.4	结论 .....	75
	参考文献 .....	76
<b>第 3 章</b>	<b>金属基复合材料的切削性 .....</b>	<b>78</b>
3.1	简介 .....	78
3.2	切削参数 .....	79
3.3	刀具磨损与刀具寿命 .....	81
3.3.1	刀具磨损 .....	81
3.4	表面和次表面完整性 .....	85
3.4.1	表面光洁度 .....	86

3.4.2	次表面损伤	87
3.4.3	残余应力	89
3.5	切削力	91
3.6	切屑的形成	92
3.7	结论	94
	致谢	95
	参考文献	95
<b>第4章</b>	<b>金属基复合材料的传统加工工艺</b>	<b>99</b>
4.1	简介	99
4.2	金属基复合材料的车削	100
4.2.1	切屑形成	101
4.2.2	磨损机理及刀具寿命	101
4.2.3	表面粗糙度的研究	108
4.2.4	超声振动车削	110
4.2.5	建模过程	111
4.2.6	数值模拟	111
4.3	钻削 MMC	115
4.4	铣削 MMC	118
4.5	结论	121
	参考文献	122
<b>第5章</b>	<b>金属基复合材料的磨削加工</b>	<b>126</b>
5.1	概述	126
5.1.1	传统材料和复合材料的加工区别	127

5.1.2	磨削需要的条件 .....	127
5.1.3	金属基复合材料的磨削加工中的挑战 .....	128
5.1.4	砂轮的选择 .....	128
5.1.5	磨削评估的标准 .....	129
5.2	金属基复合材料的可磨性研究 .....	129
5.2.1	磨削力:参数的影响 .....	130
5.2.2	磨削温度的观测 .....	132
5.2.3	材料反应:切屑的形态 .....	135
5.2.4	声发射监测 .....	137
5.2.5	表面完整性的观测 .....	141
5.2.6	表面纹理:宏观图 .....	144
5.3	结论 .....	148
	参考文献 .....	148
<b>第 6 章</b>	<b>SiC 颗粒增强金属基复合材料的干切削 .....</b>	<b>150</b>
6.1	简介 .....	150
6.2	刀具材料的选择 .....	152
6.2.1	CVD 金刚石刀具 .....	152
6.2.2	PCD 刀具 .....	154
6.3	试验步骤 .....	155
6.4	机械加工特性 .....	155
6.4.1	切削力 .....	156
6.4.2	刀具磨损 .....	157
6.5	刀具的性能 .....	159

6.5.1	刀具的耐磨性 .....	160
6.5.2	纳米复合涂层对刀具寿命的影响 .....	160
6.5.3	刀具寿命测试 .....	164
6.6	对加工的环境影响 .....	165
6.6.1	剪切带上粉尘的生成 .....	167
6.6.2	刀具-切屑接触面的摩擦 .....	170
6.6.3	刀具耐磨性的影响 .....	176
6.7	结论 .....	179
	参考文献 .....	180
<b>第7章</b>	<b>金属基复合材料加工的计算方法和优化</b> .....	<b>183</b>
7.1	简介 .....	183
7.1.1	数学建模的重要性 .....	183
7.1.2	优化的需要 .....	184
7.2	建模方法 .....	185
7.2.1	基于响应面法建模 .....	185
7.2.2	基于人工神经网络的建模 .....	191
7.3	优化方法 .....	195
7.3.1	Taguchi 稳健性设计 .....	196
7.3.2	启发式搜索算法 .....	199
7.4	结论 .....	204
	致谢 .....	205
	参考文献 .....	205

# 第 1 章

## MMC 加工中切屑的形成机制和建模

**摘要** 在广泛的工作条件下金属基复合材料(MMC)能提供较高的强度重量比、刚性和良好的抗破坏性,有潜力取代许多工程应用中的传统材料。通常情况下,MMC 的金属基体材料是铝合金、钛合金、铜合金和镁合金,而增强材料是纤维、晶须和颗粒形式的碳化硅、氧化铝、碳化硼和石墨等。本章内容包括 MMC 在加工过程中切屑的成形机制及各种建模技术。特别是关于切削力、切屑形态、温度和表面损伤在内的建模技术。

### 1.1 简介

在广泛的工作条件下金属基复合材料(MMC)能提供高的强度重量比、刚性和良好的抗破坏性,有潜力取代许多工程应用中的传统材料。通常情况下,MMC 的金属基体材料是铝合金、钛合金、铜合金和镁合金,而增强材料是纤维、晶须和颗粒形式的碳化硅、氧化铝、碳化硼和石墨等。纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料以及传统金属材料间的一个最重要的区别是方向性的特性,颗粒增强复合材料和传统金属材料是各向同性的,而纤维增强复合材料通常是各向异性的。颗粒增强复合材料具有更高的延展性和相对于纤维增强复合材料的各向同性的性质,使其更具吸引力。

在过去,颗粒增强 MMC 的加工已经得到了广泛的试验研究,

而纤维增强 MMC 的加工研究是有限的。加工 MMC 会造成过度的刀具磨损,并直接诱导在纤维或颗粒和基体接触面中出现纤维拉出、颗粒断裂、分层和剥离等损坏现象。增强类型、刀具的类型和几何形状以及加工参数都会影响这些复合材料的切削加工。尽管 MMC 的加工通常是近净成形,但后续的加工操作还是不可缺少的。

在研究加工复合材料时所用的方法是不同的,大致可以分为 3 类,即:①试验性研究。侧重于复合材料的宏观/微观切削加工性能。②简单的建模。采用传统的切削机制。③数值模拟。把复合材料当做宏观的各向异性的材料或者致力于从微观上模拟增强体与基体间接触面。宏观建模通常忽略了复合材料在被切削时的许多基本特征,并且通常不能很好地结合切削机制,而那些致力于微观效果的建模(包括有限元分析),实施起来很复杂。应结合宏观与微观建模的优点,制定出一个合理的方法来提高实际建模水平,不仅能够描述材料的切削进程,还能在应用中提供简单的分析解法。

本章涉及加工 MMC 中切屑的形成机制。为获得更好的表面处理、最低的损伤程度和最大的刀具寿命,加工参数优化是非常重要的。了解切削机制,将有助于选择最佳的加工参数,以改善这些复合材料的可切削性。

## 1.2 颗粒增强金属基复合材料的加工

与加工颗粒增强 MMC 相关的研究大多集中在切削力、切削温度、刀具磨损、表面粗糙度和次表面损伤等方面。从关于加工 MMC 的现有文献中可以明显看出增强体材料、增强类型(颗粒或晶须)、增强体的体积分数、基体的性质以及这些颗粒在基体中分

布都是影响这些复合材料切削加工性的因素。虽然立方氮化硼(CBN)、氧化铝、氮化硅、碳化钨(WC)被用来作为切削刀具材料,但最常用的刀具材料是多晶金刚石(PCD)<sup>[1-7]</sup>。加工颗粒增强MMC时,切削速度、进给量和背吃刀量对刀具寿命和被加工金属的表面粗糙度有着相似的影响,但也注意到陶瓷增强颗粒会从基体中剥离,滚移到切削刀具前面,从而通过已加工表面时压划出沟槽。

### 1.2.1 切削速度的影响

在大多数情况下,切削速度对切削力没有显著的影响<sup>[10]</sup>,但还是有些关于切削速度对切削力有影响的报告。在加工 MMC 的过程中,当低速切削这些复合材料时,许多研究人员已经观察到了积屑瘤(BUE)的存在<sup>[9,11,12]</sup>。由于积屑瘤的存在,在低速切削时的切削力低于观察到的在较高切削速度时的切削力,这种现象可以归结为在高速切削时具有更高的刀具磨损或积屑瘤的存在。积屑瘤的存在增加了刀具的实际前角,从而导致了一个较低的切削力。也有一些研究已经指出通过增加切削速度来减小切削力<sup>[13,14]</sup>。在 Manna 和 Bhattacharya<sup>[14]</sup>所进行的研究中显示出,在切削 Al/SiC 复合材料的过程中,切削速度对进刀力和切削力的影响是有规律的。试验结果表明,随着切削速度增加,进刀力和切削力会减小。

虽然增加切削速度会轻微的减小表面粗糙度,但会降低刀具寿命,因为刀具的温度会随切削速度的增加而增加,从而使刀具材料软化,加快磨损<sup>[3,15,16]</sup>。总体而言,切削速度对表面粗糙度的影响是不明显的,因为表面粗糙度主要由增强体的尺寸和进给量所决定<sup>[3,16,17]</sup>。在刀具寿命方面,通过 Manna 和 Bhattacharya<sup>[9,11]</sup>的研究发现,在使用硬质合金刀具对 Al / SiC

复合材料进行加工过程中,当切削速度从 60m/min 增加到 180m/min 时,刀具的后刀面磨损增加了 2.5~3 倍。另一种关于后刀面磨损随切削速度而变化的看法是:当切削速度高于 100m/min 时,后刀面的磨损会快速增加,因此在加工复合材料时,建议把切削速度控制在 60~100m/min 的范围内。Ozben<sup>[12]</sup>和 Joshi<sup>[18]</sup>等人在加工 SiC 颗粒增强铝基复合材料的过程中发现切削速度是限制复合材料切削性的主导因素之一。

### 1.2.2 进给量的影响

进给量对切削力具有明显的影响,当进给量增加时,切削力会大幅上升<sup>[10, 19]</sup>。在文献中有许多关于加工 MMC 的切削力预测模型,比如 Kishawy 等人<sup>[20]</sup>在用陶瓷刀具低速正交切削 MMC 的情况下,开发了基于能量的分析模型来预测切削力,而 Pramanik 等<sup>[19]</sup>在切屑成形机制和基体与颗粒存在的基础上,开发了基于力学的模型来预测切削力。另一方面,进给量会对表面粗糙度产生不利影响,随着进给量的增加,表面粗糙度会增加<sup>[3, 21]</sup>。此外,进给量对次表面的损伤具有巨大的影响<sup>[8, 22, 23]</sup>,较大的进给量会在材料上产生更多的损伤并且损伤深度也更深。El-Gallab 和 Sklad<sup>[8, 23]</sup>认为因为在较高的进给量下产生了很大的切削力,使得在 SiC 颗粒周围产生的空隙,导致复合材料产生加工失效。这些空隙连接起来形成微裂缝,并且随后沿着剪切带断裂。另一方面,进给量会对刀具的磨损产生较小的影响。较大的进给量可以减小刀具的磨损率,因为可以改善热量从切削区到工件上的传导<sup>[15]</sup>。进给量会增加后刀面的磨损,但相对于切削速度,增加的磨损是极小的。在 60m/min 的切削速度下,把进给量增大 3 倍,后刀面的磨损量会增加 1.6 倍,而在 0.35mm/rev 的进给量下,把切削速度增加 3 倍,后刀面的磨损量会增加 3 倍<sup>[9, 24]</sup>。



### 1.2.3 背吃刀量的影响

背吃刀量对表面粗糙度和次表层损伤具有负面影响。增加背吃刀量会增加表面粗糙度并且加重次表层损伤,从而降低加工表面的质量。Chambers<sup>[25]</sup>对加工 15% 体积分数 SiC 颗粒增强 A356 铝合金进行了研究,并得出结论:背吃刀量并没有明显改变刀具寿命。虽然背吃刀量对刀具的磨损没有明显的影响,但在用不加涂层的硬质合金刀具加工 Al/SiC 颗粒(体积分数 15%)复合材料时,发现相对于进给量,背吃刀量对刀具磨损的影响更大<sup>[9,15]</sup>。此外,在加工 MMC 时,增加背吃刀量会加大切削力。

### 1.2.4 增强体的影响

在加工匀质材料时,增强体的存在会很大程度上影响复合材料的可加工性。基体中的硬质陶瓷颗粒会导致很多问题,特别是过度的刀具磨损。增强体的尺寸和体积分数都会对复合材料的可加工性具有明显的影响。一个预期的结果是:刀具的磨损程度和表面粗糙度都高度依赖于颗粒的平均尺寸和体积分数。Ciftci 等<sup>[26]</sup>分别用加涂层和不加涂层的硬质合金刀具加工尺寸为 30、45 和 110 $\mu\text{m}$  SiC 颗粒增强的 Al/SiC 颗粒复合材料(其中增强体的体积分数为 16%),发现颗粒的尺寸对刀具的磨损和表面粗糙度具有不利影响。Kannan 等<sup>[15]</sup>通过加工平均尺寸为 9.5 $\mu\text{m}$ 、17 $\mu\text{m}$ 、20 $\mu\text{m}$  和 25 $\mu\text{m}$  氧化铝颗粒增强 Al 6061 基体(其中增强体的体积分数为 10%),进一步证实了这一结论。颗粒体积分数的增加也导致了刀具磨损的增加,并且同时影响了加工工件的表面粗糙度,更大的刀具磨损是因为在一个较高的频率下硬质陶瓷颗粒划伤刀具<sup>[3,15,26]</sup>。

同样,Ozben 等<sup>[12]</sup>在加工体积分数分别为 5%、10% 和 15%