

基于 DEFORM-3D 的深孔枪钻切屑成形机理分析

张小粉¹,张宪坤²,白瑀²

¹咸阳职业技术学院机电(技师)学院;²西安工业大学机电工程学院

摘要: 切屑形态对枪钻深孔加工中孔成型精度影响较大,利用 DEFORM-3D 有限元仿真软件模拟深孔加工中切屑的形成过程、形态和断屑方式,准确复现切屑的形成过程及形态,并计算切屑的曲率与厚度。模拟分析与记录轴向力、扭矩和切削过程温度等参数,揭示出力与扭矩的全过程变化规律,分析得出切削刃温度最高区域、相邻区域的温度分布规律,为切削过程工艺参数的控制提供理论依据。试验与仿真数据对比分析表明,采用有限元分析方法可为枪钻深孔切削过程工艺参数选取和优化提供基本可信的依据,并有效缩减切削试验次数。

关键词: 深孔加工;枪钻;切屑形态;仿真分析

中图分类号: TG713.1;TH16

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2020.03.013

Analysis of Chip Forming Mechanism of Deep Hole Gun Drill Based on DEFORM-3D

Zhang Xiaofen, Zhang Xiankun, Bai Yu

Abstract: The chip shape has a great influence on the forming accuracy of the middle hole in the gun drilling deep hole processing. DEFORM-3D finite element simulation method is used to simulate the chip formation process, shape and chip breaking mode in the deep hole processing to accurately reproduce the chip formation process and shape, and calculate the chip curvature and thickness. Simulation analysis and recording of axial force, torque, cutting process temperature and other process variables, revealing the torque output variation of the whole process, analysis of the cutting edge temperature maximum area, adjacent areas of the temperature distribution law, for cutting process parameters to provide a theoretical basis for the control. The comparison and analysis of the experimental and simulation data show that the finite element analysis method can provide a basic and reliable basis for selecting and optimizing the technological parameters of gun drilling deep hole cutting process, and effectively reduce the number of cutting experiments.

Keywords: deep hole processing; gun drill; chip morphology; simulation analysis

1 引言

枪钻深孔加工处于封闭或半封闭状态,排屑空间较小,孔加工质量不易保证,限制了其使用。枪钻加工中所形成的切屑形状与大小关系到排屑是否流畅,间接地表征其切削性能的优劣^[1,2],切屑伴随切削过程发生,便于观察,可作为现场调整工艺参数的依据^[3]。切削速度与进给量是影响深孔加工质量的关键因素^[4,5],高压冷却液和工艺系统刚性也会影响切屑形态^[6-8]。近年来,将有限元技术用于切削过程中轴向力研究^[9],已部分替代试验。切屑形态分析已经成为深孔加工过程的重要依据^[10-12]。

2 切屑形态

采用单因素分析法对枪钻深孔加工中产生的切屑形态进行试验观察,发现:①钻削过程中产生的切屑形态包括单元切屑、带状切屑、挤裂切屑和崩碎切

屑等,切削速度较低时主要产生带状切屑,切削速度较高时主要产生单元切屑;切削速度和进给量是影响切屑形态的两个关键要素:切削速度影响切屑硬化,进而改变切屑状态,进给量则通过改变切屑厚度影响切屑形态。②45钢硬度较高,产生的切屑易变形,在高压冷却液作用下与枪钻、工件内壁碰撞,产生断裂。切削速度较低时,产生的带状切屑容易堵塞,出现缠刀现象,导致枪钻振动,降低加工质量;较小的切屑虽易于排出,但更易堵塞孔壁与钻杆间隙,划伤被加工孔。③当切削速度保持不变时,随着进给量的增大,切屑的主要形状从长带状向单元切屑逐渐转变;当进给量保持不变时,随着切削速度的增大,切屑尺寸从大变小再重新变大;在加工效率相同的情况下,低切削速度、高进给量条件下的断屑效果往往优于高切削速度、低进给量条件下的断屑效果。

3 DEFORM-3D 深孔加工仿真模型

由于深孔加工过程通常处于封闭或半封闭的环境中,难以实时监测刀具的加工状态、切屑形成及其变形过程。因此,运用 DEFORM-3D 有限元软件对

枪钻钻削过程进行仿真分析,模拟切屑的形成,观察并分析切削过程稳定性。

3.1 模型建立

在模拟仿真中应首先建立材料本构模型,分析材料应力和应变之间的关系。在仿真软件中定义刀具材料模型为刚性体(Rigid),忽略其变形量以提高计算效率。被加工工件定义为刚塑性体(Plastic),获取其应力、应变和温度等参数。DEFORM-3D中设定材料模型为AISI-1045,即国标普通45钢,泊松比为0.3,杨氏模量随温度的变化而改变,力学性能见表1。仿真软件材料库中提供了AISI-1045的应力应变数据,可帮助提升仿真效率。

表1 工件材料的力学性能

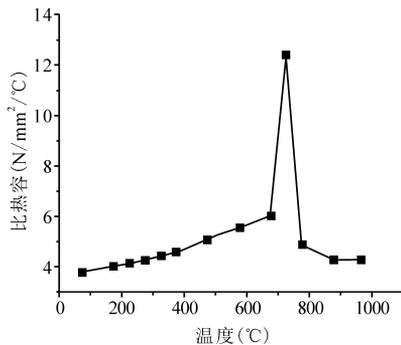
材料	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 σ_s (MPa)	伸长率 δ_5 (%)	断面收缩率 ψ (%)
45 钢	≥ 600	≥ 355	≥ 16	≥ 40
材料	冲击功 A_{kv} (J)	冲击韧性值 α_{kv} (J/cm ²)	未热处理	
45 钢	≥ 39	≥ 49	$\leq 229\text{HB}$	

工件材料本构模型选择 Oxley 模型。在有限元 DEFORM-3D 仿真中,45 钢的材料本构模型可表示为

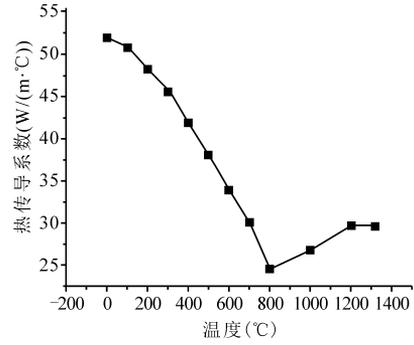
$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \quad (1)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 为流动应力(MPa); $\bar{\epsilon}$ 为塑性应变; $\dot{\bar{\epsilon}}$ 为应变率; T 为温度(°C)。

工件材料选择刚塑性材料模型,不考虑热胀系数、杨氏模量及材料的泊松比。枪钻为刚性体,需进行热传导计算分析,并对刀具和工件的比热容及热传导系数进行定义。AISI-1045 的热传导系数和比热容随温度变化规律见图1。仿真工件为 $\Phi 50\text{mm} \times 750\text{mm}$ 的45钢棒料,其模型为圆柱体。由于模拟加工设置长度过长会使仿真时间成倍增加,为提高仿真效率,只对钻头仿真切削区域进行建模,因此将45钢棒料工件简化为直径为40mm、厚度为12mm的圆柱体。



(a)45 钢的比热容



(b)45 钢的热传导系数

图1 AISI-1045 的比热容与热传导系数

由于枪钻钻杆较长(1200mm),刀具网格数量多,对计算机性能要求高。为提高仿真计算效率,对枪钻的钻削部分进行简化建模。选用YG8硬质合金钻头,其物理性能见表2,机械性能及化学成分见表3。

表2 YG8 硬质合金钻头的物理性能

泊松比	杨氏模量 (GPa)	导热系数 (W/(m·°C))	线膨胀系数 (10 ⁻⁶ /°C)	比热容 (N/mm ² /°C)
0.22	640	75.4	4.5	15

表3 YG8 机械性能及化学成分

化学成分 (%)	硬度 (HRC)	耐热性 (°C)	冲击韧性 (kJ/m ³)	抗弯强度 (GPa)
WC(92),Co(8)	89.0	800~1000	25~60	1.47

3.2 网格划分

网格划分是切削仿真中的关键步骤。为保证钻削仿真的准确性,防止出现不合格的网格单元,采用自适应网格划分技术(AMG),程序将在工件形变量超过设定变量数值时对工件进行网格重划分。在钻削仿真过程中,钻削力和温度主要集中于钻头与工件的接触区域,所以对钻头与工件接触的中心部分进行网格重划分,不仅能提高仿真精度,还能减少运算量,提升仿真效率。通常在网格重划分时,需进行权重设置,在保证影响切削深度实际值和进给量的关键因素的同时,最大限度减少几何失真。工件和刀具网格划分结果如图2所示。

4 仿真结果分析

4.1 切屑形成分析

图3a为钻头进给时切屑形态的变化情况($v_c = 40\text{m/min}$, $f = 0.025\text{mm/r}$)。可以看出:枪钻加工时,内刃生成切屑的速度远小于外刃,生成切屑的形态也有区别。由于内外刃夹角的存在,会导致外刃切屑向钻头中心集聚的过程中受到内刃切屑的阻力,在加工孔和高压切屑液的共同作用下形成螺旋卷

屑。切屑形成机理见图3b。

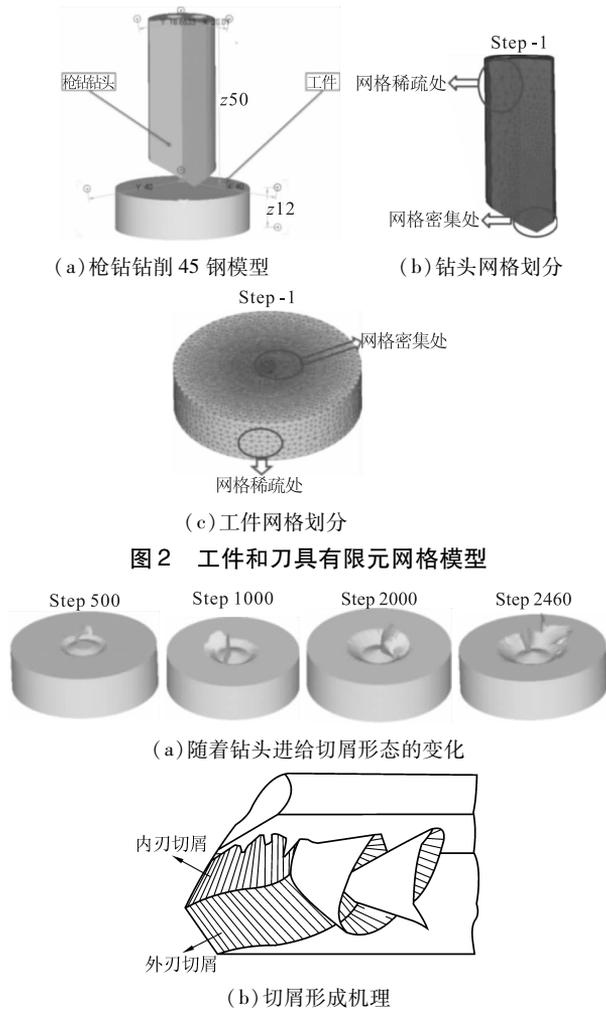


图2 工件和刀具有限元网格模型

4.2 切屑断裂分析

在有限元仿真过程中,通过网格重划分模拟连续切屑的形成,通过设置断裂准则实现切屑断裂,当达到一定压力和变形时,相关联的网格单元会被删除,从而实现切屑断裂。钻削过程中,切屑折断沿网格边界发生,所以网格划分越细,与实际工件材料的晶界越接近,模拟仿真的精度也会越高。但在实际仿真中,网格尺寸与工件材料的晶粒大小相差很大,所以仿真中产生的切屑效果与实际钻削加工产生的切屑仍存在较大差距。

4.3 切屑形态分析

刀具内刃产生的切屑为左旋,外刃产生的切屑为右旋连续卷曲,切屑的曲率直径可达7.26mm,深度约4.44mm。钻头产生的切屑呈向上卷曲状态,这是由于底层与表层金属切屑的流出速度存在区别而导致弯曲变形,且切屑在底层流出时与刀具前刀面存在阻力,在摩擦作用下产生热量,导致二次塑性变形,使切屑卷曲。在切屑宽度方向上,主切削刃上

各点的速度存在差异,导致切屑在宽度方向呈现侧向卷曲。

4.4 轴向力与扭矩分析

图4为径向力曲线图,钻头在 x 、 y 、 z 三个方向的分力分别为 F_x 、 F_y 、 F_z ,其中 F_z 为轴向钻削力。 F_x 和 F_y 为径向力, F_x 和 F_y 的合力为 F_p ,径向合力 F_p 不为零,模的大小与方向随时发生变化,径向力随时间推移逐渐增大,并趋于稳定。

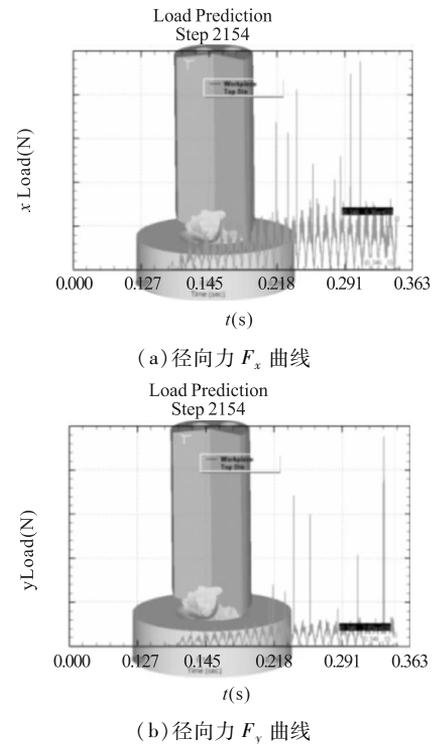


图4 径向力曲线($v_c=40\text{m/min}$, $f=0.025\text{mm/r}$)

图5为钻削力与扭矩曲线图。可以看出:轴向力和扭矩随着钻头切削深度的增大不断上升,当钻削到一定深度后保持稳定。呈现这种趋势的原因是:开始阶段参与切削的内刃、外刃与工件接触宽度逐渐增大,当钻头切削刃都参与切削后,钻削力在一定范围内保持不变。同时,还能从图5a轴向力曲线看出在钻削过程存在变形,当钻头开始接触加工工件时,切削力快速增大到一定值,然后在一定的范围内不波动。原因是钻头初期接触工件时,工件因受到钻头上切削刃的作用而产生强烈的塑性变形,切削力为抵消产生的塑性变形开始增大。在枪钻钻削45钢时产生切屑,网格发生破裂失效,此时切削力减小。

4.5 切削温度分析

由图6可知:随着枪钻切削加工的进行,工件温度逐渐上升,工件待加工表面的温度在一定时间内基本呈线性上升。分别提取5个距工件由远到近以

及刀具附近和切屑部位的特征点(见图6a),将特征点的温度变化绘制成曲线进行分析,得出:特征点3离钻头最近,温度上升最快,数值相对最高;特征点1、2离钻头由远到近,温度变化由慢到快;特征点1、4、5的温度波动较大,分析原因是钻孔过程中摩擦、挤压产生的热是工件、切屑、空气热交换共同作用的结果。贴近钻头的部分材料温度也会随刀具钻头的旋转呈现周期性增加,且整体呈不断上升的趋势。这是因为钻头在转动过程中与部分点周期性接触,呈现波浪线形态。

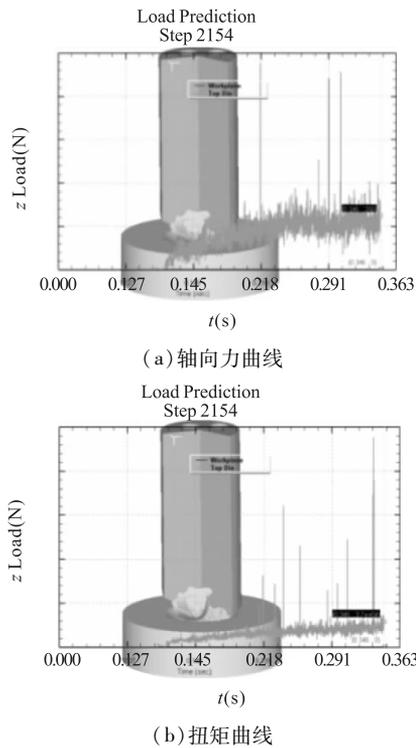
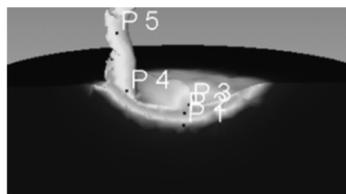
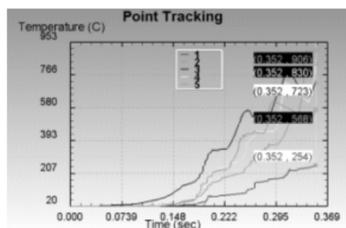


图5 轴向力与扭矩曲线
($v_c = 40\text{m/min}$, $f = 0.025\text{mm/r}$)



(a) 节点温度图像



(b) 节点数据

图6 剖切面部分节点的温度图像
($v_c = 40\text{m/min}$, $f = 0.025\text{mm/r}$)

表4为 $v = 40\text{m/min}$, $f = 0.035\text{mm/r}$ 时,仿真步数所对应的最高温度数值。可以看出:在钻头开始钻削阶段,其最高温度随着仿真步数的增大而提高,当钻削达到稳定阶段,最高温度也趋于稳定,基本与实际加工规律相吻合;深孔枪钻加工中,切削温度与进给量和切削速度都成正比。

表4 切削温度随仿真步数的变化

钻削步数	500	1000	1500	2000	2500	3000
温度(°C)	86	145	321	612	917	1245
钻削步数	3500	4000	4500	5000	5500	
温度(°C)	1386	1450	1480	1490	1490	

5 试验与仿真技术对比分析

采用试验方案验证,配合检测技术,应用仿真技术对切削过程进行模拟,通过数值分析以量化描述切削中的物理量,两种技术手段的配合方式见图7。

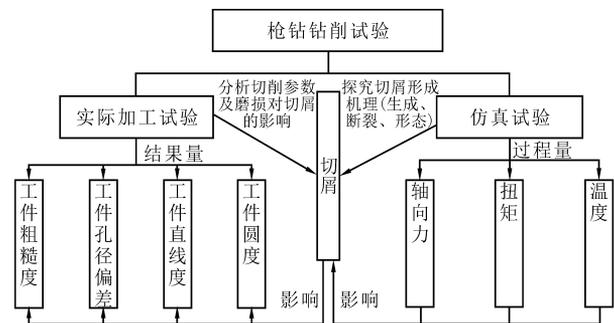


图7 枪钻切削实例试验与仿真试验分析联系

由于深孔加工处于封闭或半封闭状态,无法实时观察切屑的形成过程以及测量尺寸,通过仿真技术能够探究切屑的形成机理,便于更深入的切屑形成过程分析,对试验结果进行部分的解释与推理。

6 结语

通过制定枪钻加工45钢棒料试验,观察切削过程中的切屑形态,对切屑的形成过程进行理论研讨、仿真分析与数值模拟计算,得出以下结论:

(1)有限元网格划分的尺寸对仿真计算结果精度有直接影响,能够对切屑形态、断屑方式、轴向力与扭矩、切削过程温度变化等进行模拟与分析,反映实际的基本规律,结论基本符合试验结果。但对切屑的断裂计算难以取得可靠结果,需要更加精细的网格划分结果和计算能力提升。

(2)深孔切削是典型的热-力耦合过程,切屑形态生成的过程与形态作为观察对象,可以判断切削过程质量的优劣,通过切屑形态可以推测出轴向力与扭矩、切削温度等关键物理量,从而对工艺参数

中的进给量、切削速度进行实时控制,为制定合理的工艺方案提供依据。

(3)采用有限元仿真方法模拟深孔加工过程,不仅形象地演示出切屑的形态与生成过程,还能计算对应的力、扭矩、温度等物理量,对于切削质量评价、切削效率提升与刀具的磨损机理有重要的参考价值。

参考文献

- [1] Wang Y, Yan X, Bin L I, et al. The study on the chip formation and wear behavior for drilling forged steel S48CS1V with TiAlN-coated gun drill[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2012, 30(1): 200 - 207.
- [2] Wang Y, Jia W, Zhang J. The force system and performance of the welding carbide gun drill to cut AISI 1045 steel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(9 - 12): 1431 - 1443.
- [3] 武鹏, 张柱银, 许宁, 等. 枪钻切屑变形对孔表面质量影响研究[J]. 工具技术, 2017, 51(10): 58 - 61.
- [4] 胡江林, 焦剑, 张伟. 加工银铜合金枪钻切削参数优化[J]. 工具技术, 2012, 46(3): 28 - 31.

- [5] 赵丽琴, 王彪, 何谨恒, 等. 准干式深孔镗削中切屑运动的仿真分析[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(2): 84 - 87.
 - [6] 胡宽辉, 沈兴全, 马腾, 等. BTA 深孔钻削 EA4T 钢的屑形研究[J]. 工具技术, 2017, 51(2): 49 - 51.
 - [7] 荀琪, 李云芳. 枪钻低频振动钻孔断屑的研究[J]. 工具技术, 1997(7): 7 - 11.
 - [8] 房嘉赓, 苗鸿宾, 沈兴全. 枪钻低频轴向振动钻孔的有限元分析[J]. 机床与液压, 2016, 44(1): 143 - 146.
 - [9] Guo H, Yang W, Liu L, et al. Simulation analysis of RuT450 drilling force based on LS-DYNA gun drilling[J]. Key Engineering Materials, 2018, 764: 271 - 278.
 - [10] 李琦, 裴宏伟, 于勇波, 等. BTA 深孔钻切削过程试验研究[J]. 机械设计与制造, 2004(1): 105 - 106.
 - [11] 李健, 沈兴全, 王唯, 等. 基于 BP 神经网络的深孔切屑形态预测模型[J]. 工具技术, 2017, 51(3): 39 - 43.
 - [12] 马龙, 沈兴全, 任晓敏. 高速小直径深孔钻削过程中的切屑形态分析[J]. 制造技术与机床, 2014(2): 122 - 125.
- 第一作者: 张小粉, 硕士, 讲师, 咸阳职业技术学院机电(技师)学院, 712000 陕西省咸阳市

First Author: Zhang Xiaofen, Master, Lecturer, Department of Mechatronic Engineering (Technician), Xianyang Vocational Technical College, Xianyang, Shaanxi 712000, China

新书推荐——《工具热处理技术与实践》



由成都工具研究所教授级高级工程师李惠友编著的“工具热处理技术与实践”一书近日由机械工业出版社在京出版。该书收集了半个世纪以来中、俄、英、日 4 种文字与工具钢和工具热处理有关的期刊杂志和专著的文献资料,并结合作者自己的研究成果和文章、著作,历经 10 多年的整理加工,编著成书。

该书作者在成都工具研究所从事工具热处理技术的研究工作已经 50 余年,先后荣获四川省科技进步一等奖,国家科技进步二等奖;曾主持和参与召开了 7 届全国工具钢和工具热处理学术会议;深入调研过全国主要专业工具厂的热处理车间;编写过全国热处理学会主编的热处理手册中“工具热处理”一章的第 1 版到第 4 版;发表过数十篇专业学术文章,著有“QPQ 技术的原理与应用”等专著;该书作者了解我国工具热处理的情况和需求,书中的内容很有针对性。

该书有以下特点:

1. 叙述全面,该书共 40 多万字,从工具钢的相变理论、工具的选材、热处理工艺、热处理质量检测及缺陷分析、典型工具的热处理、高速钢的表面强化到工具热处理的加热技术,对工具热处理进行了全面论述。
2. 内容实用:该书紧密结合工具厂的生产实际,可操作性强。书中包括大量国内外成功的经验和试验数据,很多资料对改进现有的生产工艺很有参考价值。
3. 资料鲜有:书中很多资料属国内鲜见或未见,很多内容直接引用尚未翻译的原文专著或原文期刊文献。
4. 有一定的理论叙述:该书全面、精简、扼要地介绍了工具钢热处理时的相变过程,其资料来源多为有关工具钢的经典著作或较为新新颖的试验资料。加热相变时奥氏体形成过程的图片显示方法,国内鲜见。
5. 专门开辟一章全面叙述工具钢中的碳化物和晶粒度等微观组织和力学性能,并且与工具寿命联系起来,在以往的著作中尚未见到。
6. 该书涵盖作者多年来的试验成果和专业论文的内容,其中有高速钢分级淬火、高速钢真空淬火、高速钢 QPQ 处理、高速钢工具氮化、高速钢工具刃磨烧伤、高速钢碳化物偏析、高速钢深冷处理等方面的内容。
7. 该书还介绍了一些尚未大量推广应用的技术,例如工具的激光热处理、工具的离子注入等,可以更全面了解世界范围内工具热处理技术发展的过程和路径,从中得到启发。

该书对我国工具热处理工作者具有参考价值,并有一定的学术水平,特此向与工具热处理技术相关的读者推荐此书。