

RAL · NEU 研究报告 No.0014

高合金材料热加工图及 组织演变

GAOHEJIN CAILIAO REJIAGONGTU JI ZUZHI YANBIAN

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)

TG306
10



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

RAL · NEU 研究报告 No. 0014

高合金材料热加工图及 组织演变

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)



北 京

冶金工业出版社

2015

内 容 简 介

本研究报告介绍了东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室在高合金材料热加工图及组织演变研究方面的最新进展。报告中首先介绍了材料热加工研究方面的模型、加工图的应用分析方法,以及加工图理论与技术方面存在的问题。接着介绍了主要研究工作:基于 DMM 的稳定性的应用比较分析及相似性与统一性证明、基于 MATLAB GUI 的加工图软件的开发、基于 MATLAB GUI 的加工图软件在不同材料中适用性的验证和高合金材料热加工性能及组织演变。本研究报告为加工图失稳理论的选择提供了理论依据,同时还提供了精确、可靠、简单的加工图制作方法。

本报告可供材料加工工程和机械加工领域的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高合金材料热加工图及组织演变/轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学)著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 10
(RAL·NEU 研究报告)
ISBN 978-7-5024-7027-2

I. ①高… II. ①轧… III. ①合金—热加工 IV. ①TG306

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 237132 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

策 划 任静波 责任编辑 卢 敏 夏小雪 美术编辑 彭子赫

版式设计 孙跃红 责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7027-2

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2015 年 10 月第 1 版, 2015 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 7.75 印张; 121 千字; 107 页

46.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

研究项目概述

1. 研究项目背景与立题依据

材料的可加工性是机械加工的一个重要工程参数，它是材料在塑性变形过程中不发生破坏的变形能力。材料的可加工性分为两个独立的部分，即应力状态可加工性（State Of Stress workability, SOS workability）和内在可加工性（Intrinsic workability）。应力状态可加工性主要通过施加的应力与变形区的几何形状来控制。因此，它主要针对于机械加工过程，而与材料特性无关。内在可加工性则依赖于合金成分以及先前加工历史决定的微观组织和在加工过程中对温度、应变速率和应变等参数的响应。

加工图是一种描述材料可加工性好坏的图形，通过 T 和 $\dot{\epsilon}$ 为坐标轴绘制而成的加工图来显示材料塑性变形的稳定区域和失稳区域中的加工条件（工艺参数），最终目的是在制造环境中可重复的基础上生产出没有宏观和微观缺陷的具有特定组织和性能的部件。

加工图根据基于的数学模型主要分为三类：第一类是基于原子模型的加工图，例如 Ashby 和 Frost 的变形机制图（Ashby-Frost Deformation Map）和 Raj 图；第二类是基于动态材料模型和修正动态材料模型的加工图；第三类是基于极性交互模型的加工图。

加工图理论与技术的提出和发展是对材料热加工的传统研究方法的突破和创新，它在避免热加工缺陷的产生，改善和提高材料的可加工性能，控制材料热加工微观组织、性能和变形机理等方面不失为一种先进的理论研究方法，对实际零件的热加工工艺制定和优化，提高实际零件的产品质量和可靠性，降低产品不合格率，提高生产效率等方面具有重要的应用价值。

尽管如此，加工图理论与技术仍然存在不完善的地方，主要有以下两个方面：



(1) 加工图的理论研究方面。用于加工图的稳定判据和失稳判据有多种形式,且每种判据的有效性均在某些材料中得到了验证,但不同的判据在研究某一种材料的热加工时有时会出现不一致的结果。目前不存在一个适用于任何材料的判据,单单依靠某一种判据并不一定能够得出正确的预测结果。因此,研究某一个具体条件下的材料加工时,选择哪种判据形式需要慎重考虑。不少学者采用加工图技术研究材料可加工性时,往往需要采用多种判据进行比较分析,这个给研究带来一定的麻烦。因此,需要探究比较分析各类判据的适用性,探讨基于相同理论的判据之间存在的联系,为加工图失稳理论的选择提供理论依据。

(2) 加工图应用技术方面。目前,构建加工图的方法很多,国内外应用较多的是加工图的制作方法,多采用常规方法,即利用等温恒变形速率压缩试验数据计算出制作加工图的各类参数,然后把计算结果输入绘图软件(Origin 或者 Suffer)中,最终制作出所需要的加工图。而在实际的实验过程中获得的热模拟数据较少,必须通过插值计算获得中间温度、应变速率以及对应的应力值以满足计算精度。对于人工方法,要实现高阶插值计算,过程极为繁琐。此外,加工图理论中应用较广的 Murty 判据,公式中含有积分项,计算过程复杂,这也在一定程度上限制了 Murty 失稳判据的推广。不合理的数值计算方法对研究结果的准确性有较大的影响。因此,选择精确、可靠、简单的加工图制作方法将有助于加工图技术的推广和应用。

2. 研究进展与成果

(1) 对基于 DMM 的失稳判据和稳定判据以及 Montheillet 判据在不同材料中的应用进行了比较与分析;对基于 Ziegler 塑性流变理论的 Prasad 失稳判据和 Murty 失稳判据进行了相似性证明,并指出和分析了两种判据存在差异的原因;对基于 Lyapunov 函数稳定性准则 Gegel 稳定判据和 Malas 失稳判据进行了统一性证明。得出结论如下:

1) 推导出基于 Ziegler 塑性流变理论的 Prasad 失稳判据的另一种形式:

$$\xi(\dot{\varepsilon}, T) = \frac{\partial m}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m^2 + m^3 < 0$$

2) 通过详细的推导证明了 Prasad 失稳判据和 Murty 失稳判据的相似性,

并采用 IN718 合金的实验数据验证了这一结论。结论指出基于两种失稳判据表达式中的参数 η_{MDMM} 和 m 是产生失稳图上移现象的根本原因。

3) 基于 Lyapunov 函数稳定性准则 Gegal 稳定判据和 Malas 失稳判据是统一的。

(2) 简单介绍了国外两套用于加工图研究的软件系统, 详细介绍了制作加工图的解析法和数值计算法的具体思路和优缺点。介绍了基于 MTALAB GUI 的加工图软件 Processing Map Software 的理论基础、软件模块、软件功能, 并基于 PMS 采用 6061 铝合金的应力-应变速率对软件的部分功能进行了展示。

(3) 验证了基于 MATLAB GUI 加工图软件在高温合金、粉末冶金材料、镁合金、双相不锈钢、金属基复合材料、铝合金、钛合金以及棒材热轧工艺中的适用性, 同时也验证了基于 Prasad 失稳判据和 Murty 失稳判据相似性证明的正确性, 并针对部分文献中加工图的构建与分析存在的问题进行进一步的分析和讨论。通过高温镍基合金 IN600、Nimonic AP-1 高温合金、Mg-11.5Li-Al 合金、双相不锈钢 00Cr22Ni1Mo017N、粉末冶金 2124 Al-20 Vol. % SiC_p 金属基复合材料、铝合金 Al-Mg-Si 和钛合金 Ti53311S 等不同类型材料中的验证, 基于 MATLAB GUI 加工图软件的加工图能准确直观地反映出材料在不同变形条件下的组织演变规律, 为研究材料的热变形工艺提供了更为便捷有效的方法。和文献中的加工图相比, 加工图软件具有精确的预测效果和广泛的适用性。第 2 章中推导的基于 Prasad 失稳判据和 Murty 失稳判据相似性证明是正确的, 与所应用的材料无关。

(4) 以 AISI 420 马氏体不锈钢和 800H 铁镍基耐蚀合金的热模拟实验得到的真应力-真应变曲线数据为基础, 建立了基于 DMM 模型的热加工图。通过热加工图, 确定了在不同应变下的加工安全区和失稳区, 并结合微观组织的观察和分析, 主要结论如下:

1) 通过基于动态材料模型的理论, 建立了 AISI 420 钢在应变量为 0.3、0.4、0.5 和 0.6 的热加工图, 该加工图给出了最佳的热连轧变形参数范围, 同时也给出了热加工的失稳变形区范围。分析了钢在真应变为 0.6 时, 热加工图中最佳变形区域, 该区域主要处在高温低应变速率下, 容易发生动态再结晶; 同时应用金相组织照片, 分析了加工图中不适合变形的区域及该区域主要存在的一些组织缺陷。

2) 在温度为 $975 \sim 1100^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 $0.01 \sim 0.3\text{s}^{-1}$ 的区域内, 800H 合金发生了 DRX。在该变形条件区域内, 功率耗散系数值在 $35\% \sim 48\%$ 之间, 热变形后的组织细小且均匀。因此, 该区域内的热变形条件可用于指导 800H 合金热加工工艺参数的制定。

3. 论文

(1) Cao Yu, Di Hongshuang, Zhang Jiecen, Yang Yaohua. Dynamic behavior and microstructural evolution during moderate to high strain rate hot deformation of a Fe-Ni-Cr alloy (alloy 800H) [J]. Journal of Nuclear Materials, 2015 (456): 133 ~ 141.

(2) Cao Y, Di H S, Misra R D K, Zhang Jiecen. Hot Deformation Behavior of Alloy 800H at Intermediate Temperatures: Constitutive Models and Microstructure Analysis [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014.

(3) Jiang Guangwei, Zhang Jiecen, Cao Yu, Di Hongshuang. The Precipitation Behavior of Ferritic-rolled and Batch-annealed High Strength Interstitial Free Steel (Keynote) [C]. The 11th Asia-Pacific Conference on Materials Processing, Auckland New Zealand, July 6 ~ 9, 2014.

(4) Di Hongshuang, Cao Yu, Zhang Jiecen, Yang Yaohua. Dynamic behavior and constitutive modeling of AISI 420 stainless steel at elevated temperature [C]. The 11th Asia-Pacific Conference on Materials Processing, Auckland New Zealand, July 6 ~ 9, 2014.

(5) 张洁岑, 邸洪双, 蒋光炜, 曹宇. 退火温度对含磷高强 IF 钢 FeTiP 析出行为的影响 [J]. 东北大学学报, 2014, (35) 10: 1404 ~ 1407.

(6) 蒋光炜, 王春柳, 曹宇, 邸洪双. 连续退火工艺对 250P 钢组织性能的影响 [J]. 东北大学学报, 2014, (35) 10: 1408 ~ 1411, 1472.

(7) Cao Y, Di H S, Misra R D K. Dynamic Recrystallization Behavior of AISI 420 Stainless Steel under Hot Compression [J]. High Temp. Mater. Proc, 2014.

(8) Zhang Jiecen, Cao Yu, Jiang Guangwei, Di Hongshuang. Effect of Annealing Temperature on the Precipitation Behavior and Texture Evolution in a Warm-

Rolled P-Containing Interstitial-Free High Strength Steel[J]. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.), 2014, 27(3):395 ~ 400.

(9) Pan Enbao, Di Hongshuang, Jiang Guangwei, Bao Chengren. Effect of Heat Treatment on Microstructures and Mechanical Properties of Hot-Dip Galvanized DP Steels[J]. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.), 2014, 27(3):496 ~ 475.

(10) Cao Yu, Di Hongshuang, Misra R D K. The impact of aging pre-treatment on the hot deformation behavior of alloy 800H at 750°C [J]. Journal of Nuclear Materials, 2014(452):77 ~ 86.

(11) Cao Yu, Di Hongshuang, Misra R D K, Yi Xiao, Zhang Jiecen, Ma Tianjun. On the hot deformation behavior of AISI 420 stainless steel based on constitutive analysis and CSL model [J]. Materials Science & Engineering A, 2014 (593):111 ~ 119.

(12) Zhang Jingqi, Di Hongshuang, Mao Kun, Wang Xiaoyu, Han Zhijie, Ma Tianjun. Processing maps for hot deformation of a high-Mn TWIP steel: A comparative study of various criteria based on dynamic materials model [J]. Materials Science & Engineering A, 2013(587):110 ~ 122.

(13) Cao Yu, Di Hongshuang, Zhang Jingqi, Zhang Jiecen, Ma Tianjun, Misra R D K. An electron backscattered diffraction study on the dynamic recrystallization behavior of a nickel-chromium alloy (800H) during hot deformation[J]. Materials Science & Engineering A, 2013(585):71 ~ 85.

(14) Jiang Guangwei, Di Hongshuang, Cao Yu, Zhang Zhongwei, Wang Yafei. Flow stress prediction for B210P steel at hot working conditions[C]. The 11th international conference on numerical methods in industrial forming processes[A], AIP Conf. Proc., 630 ~ 636.

(15) Zhang Jingqi, Di Hongshuang, Wang Xiaoyu, Deformation Heating and Its Effect on the Processing Maps of Ti-15-3 Titanium Alloy[C]. 4th International conference on Manufacturing Science and Engineering (ICMSE 2013)[A], 58 ~ 64 (Advanced Materials Research, 2013(712 ~ 715):58 ~ 64).

(16) Zhang Jingqi, Di Hongshuang, Wang Xiaoyu, Cao Yu, Zhang Jiecen, Ma Tianjun. Constitutive analysis of the hot deformation behavior of Fe-23Mn-2Al-

0. 2C twinning induced plasticity steel in consideration of strain[J]. Materials and Design, 2013(44):354 ~ 364.

(17) 曹宇, 邸洪双, 张敬奇, 马天军, 张洁岑. 800H 合金热变形行为及热加工性能研究[J]. 金属学报, 2013, 49(7):811 ~ 821.

(18) Di Hongshuang, Zhang Jingqi, Wang Xiaoyu. On the constitutive modeling of the hot deformation behavior of a high-Mn twinning-induced plasticity steel [C]. The 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing, Waikoloa Hawaii USA, August 4 ~ 9, 2013: 2893 ~ 2900.

(19) 曹宇, 邸洪双, 张敬奇, 马天军. 800H 合金静态软化行为及其亚结构演变[J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(3):95 ~ 104.

(20) 张洁岑, 邸洪双, 蒋光炜, 曹宇, 杨耀华, 王晓瑜. 高强 IF 铁素体区热轧退火板的织构演变[C]. 第十三届机械工程学会塑性工程分会年会论文集. 武汉, 2013: 385 ~ 388.

(21) 张中炜, 邸洪双, 曹宇, 蒋光炜. 铁素体区开轧温度对含磷高强 IF 钢组织性能影响[C]. 第十三届机械工程学会塑性工程分会年会论文集. 武汉, 2013: 389 ~ 392.

(22) 蒋光炜, 邸洪双, 曹宇, 王春柳, 王亚飞. B250P 钢冷轧变形抗力模型[C]. 第十三届机械工程学会塑性工程分会年会论文集. 武汉, 2013: 381 ~ 384.

(23) 曹宇, 邸洪双, 易啸, 杨耀华, 张洁岑. 2Cr13 马氏体耐热钢时效处理中碳化物析出行为[C]. 第十三届机械工程学会塑性工程分会年会论文集. 武汉, 2013: 53 ~ 56.

(24) 曹宇, 邸洪双, 张洁岑, 张敬. 800H 合金再结晶行为研究[J]. 金属学报, 2012, 48(10):1175 ~ 1185.

(25) 曹宇, 邸洪双, 马天军, 张敬奇. 800H 合金热变形研究[J]. 东北大学学报, 2012, 33(2):213 ~ 217.

(26) 秦小梅, 邸洪双, 陈礼清, 邓伟. TWIP 钢 Fe-23Mn-2Al-0. 2C 的组织及拉伸变形机制[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(1):94 ~ 98.

(27) Zhang Jingqi, Di Hongshuang, Wang Hongtao, Mao Kun, Ma Tianjun, Cao Yu. Hot deformation behavior of Ti-15-3 titanium alloy: a study using

processing maps, activation energy map, and Zener-Hollomon parameter map[J]. J Mater Sci, 2012.

(28) Wang Donghong, Zhang Xiaoming, Di Hongshuang. Synthetic Control of Strip Shape Defects for UCM Tandem Mill [J]. Advanced Materials science, 2012(05):22 ~24, 29.

(29) 秦小梅, 陈礼清, 邸洪双, 邓伟. 变形温度对 Fe-23Mn-2Al-0.2C TWIP 钢变形机制的影响[J]. 金属学报, 2011, 47(9):1117 ~ 1122.

(30) 秦小梅, 陈礼清, 邸洪双, 邓伟. 应变速率对 TWIP 钢 Fe-23Mn-2Al-0.2C 组织和性能的影响[J]. 材料研究学报, (排版).

(31) 秦小梅, 陈礼清, 邓伟, 邸洪双. 30Mn20Al3 无磁钢加工硬化行为和 组织变化[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2011, 32(5):662 ~ 666.

(32) Qin Xiaomei, Chen Liqing, Di Hongshuang. Effect of Process Parameters on Microstructures of 30Mn20Al3 Steel [J]. Advanced Materials Research, 2010(97 ~ 101):378 ~ 381.

4. 项目完成人员

主要完成人员	职 称	单 位
邸洪双	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
张敬奇	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
曹宇	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
张洁岑	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
马天军	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
王晓瑜	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室

5. 报告执笔人

邸洪双、张敬奇、曹宇。

6. 致谢

本研究得到了国家重点基础研究发展规划“973 计划”的资助，项目名

称：高性能金属材料控制凝固与控制成型的科学基础，课题名称：金属材料智能制备成型技术的基础研究，专题名称：高合金材料轧制过程中组织性能智能化预测理论与技术，专题编号：2011CB606306-2。在研究工作中得到了项目首席谢建新教授和课题负责人曲选辉教授的大力支持，在此深表感谢。在实验材料方面得到了宝钢特钢公司的大力资助，研究过程中得到东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室相关人员的帮助和指导，在此表示感谢。

目 录

摘要	1
1 绪论	3
1.1 材料的可加工性	3
1.2 材料热加工模型	4
1.2.1 原子模型	4
1.2.2 动态材料模型与修正动态材料模型	5
1.2.3 极性交互模型	12
1.2.4 Montheillet 判据	14
1.2.5 基于 Ziegler 塑性流变理论的讨论	15
1.3 加工图的应用分析方法	15
1.4 目前加工图理论与技术存在的问题	16
1.5 研究背景及研究内容	17
1.5.1 研究背景	17
1.5.2 研究内容	18
2 基于 DMM 的稳定性的应用比较分析及相似性与统一性证明	19
2.1 引言	19
2.2 基于 DMM 的稳定判据、失稳判据和 Montheillet 判据的应用 比较分析	19
2.3 基于 Ziegler 塑性流变理论的失稳判据的应用比较分析与相似性 证明	22
2.4 基于 Lyapunov 函数稳定性准则的稳定判据的统一性证明	33
2.5 本章小结	34

3 基于 MATLAB GUI 的加工图软件的开发	36
3.1 国外加工图类软件概述	36
3.2 加工图的制作方法	38
3.3 基于 MATLAB GUI 平台加工图软件的开发	39
3.3.1 基于 MATLAB GUI 的加工图软件	40
3.3.2 PMS 理论基础	40
3.3.3 PMS 模块介绍	40
3.3.4 PMS 功能介绍	41
3.3.5 产品界面	41
3.3.6 软件的生成	41
3.3.7 加工图部分功能展示	42
3.4 本章小结	46
4 基于 MATLAB GUI 的加工图软件在不同材料中适用性的验证	47
4.1 引言	47
4.2 加工图软件在不同材料中适用性的验证	47
4.2.1 高温镍基合金 IN600	47
4.2.2 Nimonic AP-1 高温合金	49
4.2.3 Mg-11.5Li-Al 合金	54
4.2.4 双相不锈钢	58
4.2.5 某钢种热轧棒材	61
4.2.6 粉末冶金 2124 Al-20 Vol. % SiC _p 金属基复合材料	66
4.2.7 Al-Mg-Si 合金	69
4.2.8 Ti53311S 钛合金	73
4.3 本章小结	76
5 高合金材料热加工性能及组织演变	78
5.1 AISI 420 马氏体不锈钢热加工性能	79
5.1.1 真应变-真应力曲线	79

5.1.2	热加工图的建立	81
5.1.3	加工图中的峰值区	88
5.1.4	加工图中的失稳区	89
5.2	Incoloy 800H 铁镍基耐蚀合金热加工性能	90
5.2.1	真应力-真应变曲线	90
5.2.2	热加工图的建立	91
5.2.3	加工图中的峰值区	94
5.2.4	加工图中的失稳区	97
5.3	本章小结	100
6	结论	101
	参考文献	103

摘 要

材料的可加工性是材料在塑性变形中成型能力的重要相关参数。近几十年来,各国学者提出了各种模型和失稳理论来评估材料的热加工性。其中,基于动态材料模型理论的加工图技术被认为是最有应用前景的方法之一,并被广泛应用于设计和优化材料热加工工艺中,以实现微观显微组织和性能的控制。

然而,基于动态材料模型的各种用于制作加工图的判据有多种形式,目前并不存在一个用于预测各种材料热加工过程中流变失稳现象的万能判据。这种情况下,对一种材料而言,材料加工设计者通常需要检验各种失稳理论的适用性来确定材料的加工参数,因此给研究和生产带来很多不便。此外,加工图的制作过程复杂,选择精确、可靠、简便的加工图制作方法有助于加工图技术的应用。

基于以上存在的问题,本书的主要工作内容和结果如下:

(1) 推导出基于 Ziegler 塑性流变理论 Prasad 失稳判据的另一种形式:

$$\xi(\dot{\epsilon}, T) = \frac{\partial m}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m^2 + m^3 < 0$$

(2) 对各种失稳理论在不同材料中的应用进行了比较与分析。通过理论推导和实例验证,基于 Ziegler 塑性流变理论的 Prasad 失稳判据和 Murty 失稳判据具有相似性。讨论了基于 Prasad 失稳判据和 Murty 失稳判据失稳图出现的上移现象,通过分析指出功率耗散系数 η 和应变速率敏感系数 m 两个参数物理意义的本质区别和不同的计算方法产生上移现象的根本原因。此外,还证明了基于 Lyapunov 理论的 Gegel 稳定判据和 Malas 稳定判据的统一性。研究结论对用于加工图失稳理论的选择提供了理论依据。

(3) 基于 MATLAB GUI 开发出加工图软件——Processing Map Software (PMS)。



(4) 通过与文献中高温镍基合金 IN600、Nimonic AP-1 高温合金、Mg-11.5Li-Al 合金、双相不锈钢 00Cr22Ni1Mo017N、粉末冶金 2124 Al-20 Vol. % SiC_p 金属基复合材料、铝合金 Al-Mg-Si 和钛合金 Ti53311S 等不同类型材料的加工图对比, 基于 MATLAB GUI 加工图软件的加工图能准确直观地反映出材料在不同热加工变形条件下的组织演变规律。加工图软件 (PMS) 为研究材料的热变形工艺提供了更为便捷有效的工具, 具有精确的预测效果和广泛的适用性。通过不同材料的验证, 基于 Prasad 失稳判据和 Murty 失稳判据相似性证明是正确的, 与所应用的材料无关。

(5) 研究了典型的高合金材料——AISI 420 马氏体不锈钢和 Incoloy 800H 铁镍基耐蚀合金的热变形行为, 建立了基于 DMM 模型的热加工图, 结合微观组织的演变特点, 对热加工工艺参数进行了优化。

关键词: 热加工性; 动态材料模型; 加工图; 失稳判据; 稳定判据; 加工图软件; 高合金材料; 热变形

1 绪 论

1.1 材料的可加工性

材料的可加工性是机械加工的一个重要工程参数，它是材料在塑性变形过程中不发生破坏的变形能力。材料的可加工性分为两个独立的部分^[1]，即应力状态可加工性（State Of Stress workability, SOS workability）和内在可加工性（Intrinsic workability）。应力状态可加工性主要通过施加的应力与变形区的几何形状来控制。因此，它主要针对于机械加工过程，而与材料特性无关。内在可加工性则依赖于合金成分以及先前加工历史决定的微观组织和在加工过程中对温度、应变速率和应变等参数的响应。

通过拉伸实验可以从两个不同类型的特性表征材料的力学行为：强度特性（例如：屈服强度和极限抗拉强度）和延展特性（例如：伸长率和断面收缩率）。同样，评估材料可加工性的方法包括测量变形抗力（强度）和确定断裂前的塑性变形程度（可延展性）。因此，采用流动应力和各种工艺参数（例如：应变、应变速率、预先加热温度和模具温度）、断裂行为以及表征属于何种合金系统的冶金学相变理论三者可以全面地评估材料的可加工性。然而，评估材料可加工性的重点是测量和预测断裂前的变形极限^[2]。加工图是一种描述材料可加工性好坏的图形，通过以 T 和 $\dot{\epsilon}$ 为坐标轴绘制而成的加工图来显示材料塑性变形的稳定区域和失稳区域中的加工条件（工艺参数），最终目的是在制造环境中可重复的基础上生产出没有宏观和微观缺陷的具有特定组织和性能的部件。

加工图根据基于的数学模型主要分为三类：第一类是基于原子模型的加工图，例如 Ashby 和 Frost 的变形机制图（Ashby-Frost Deformation Map）和 Raj 图；第二类是基于动态材料模型和修正动态材料模型的加工图；第三类是基于极性交互模型的加工图。