

清华大学材料加工系列教材

材料加工系列实验

Materials Processing Experiments

主 编 邹贵生
副主编 黄天佑

3



清华大学出版社

TB3-33
1

清华大学材料加工系列教材

材料加工系列实验

Materials Processing Experiments

主 编 邹贵生
副主编 黄天佑

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书包含 30 个材料加工原理和工艺的试验,内容涉及铸造、金属塑性成形、焊接、粉末冶金和金属材料及热处理等典型的材料成形方法和材料表面工程,以及与材料加工密切相关的材料性能测试的新方法。

本书可作为“材料成形及控制工程”专业及其他相关专业如“材料科学与工程”的本科生、专科生的必修课教材,也可以供有关教师、研究生和工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

材料加工系列实验/邹贵生主编. —北京:清华大学出版社,2005.3

(清华大学材料加工系列教材)

ISBN 7-302-10273-2

I. 材… II. 邹… III. 工程材料—加工—实验—高等学校—教材 IV. TB3-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 143568 号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

责任编辑:宋成斌

印 刷 者:北京市世界知识印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:175×245 印张:15 字数:294 千字

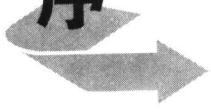
版 次:2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-10273-2/TB·87

印 数:1~3000

定 价:25.00 元

序



为了适应新时期科学技术的发展和经济建设的需要,培养基础宽、素质高、适应性强和具有开拓创新能力的复合型人才,将铸造、锻压、焊接、金属材料及热处理四个热加工专业合并为材料成形及控制工程专业。经过十几年的探索 and 教学实践,“材料成形原理”和“材料成形工艺”两门理论课程逐渐演成本专业的主干专业课程。

在学习上述两门理论课程之前,学生已修完“机械制造工艺基础”、“材料力学”,以及“工程材料”等相关课程,亦修完“机械制造实习”(原“金工实习”)课程,进行过铸造、锻压、焊接等各种热加工方法的实际操作,并做了金属材料力学性能方面的相关实验,已经具备了一定的实际工艺知识和体验。但总体来说,上述实习、实验所涉及的加工工艺不够全面,深度也不够,从而在一定程度上影响到理论课程的教学效果。为了达到理论联系实际的目的,进一步加深学生对材料成形的感性认识,提高工程实践能力,拓宽知识视野,有必要配合上述两门理论课程开设针对性更强的系列实验。

尽管完成上述工作所涉及的知识覆盖面宽、综合性强、难度较大,但为了提高培养质量,清华大学利用机械工程系最新的科研设备和基础工业训练中心近年引进的先进教学设备,开设了“材料加工系列实验”课程。该课程由 30 个实验构成,在内容上涵盖了目前材料加工领域的主要研究方向。更为重要的是,该课程重视实验中正确思维方法的引导和培养,推行学生独立操作、自行设计实验,以及多个小组实现数据共享,对实验结果进行综合分析处理的教学方法。学生在观察现象的基础上,提高了分析解决问题的能力、研究型学习的能力以及创新思维的能力,深受学生欢迎。

在多轮实验教学的基础上,本领域的专家、教授和实验技术人员一起,几经修改,最后编写出本教材。本教材特点之一,是内容丰富,知识深入,与上述两门理论

SAZ69 / 03

II 材料加工系列实验

课程配合密切。本教材的另一个特色是,每个实验附有与之相关的知识,便于学生预习和加深对实验的了解。可以相信,通过编者和读者的共同努力,本教材必将为材料加工成形及控制工程专业的教学发挥出更重要的作用,进而达到提高教学质量的目的。

傅水根

清华大学教授

2004年9月

前言



实践性课程“材料加工系列实验”与理论课“材料加工原理”和“材料加工工艺”共同构成了材料成形及控制工程专业的主干专业课。“材料加工系列实验”课程既必须紧密配合两门理论课,又应具有其独立性和特殊性。本书是为“材料加工系列实验”课程编写的实验指导书,内容包含了铸造、金属塑性成形、焊接、粉末冶金、金属材料及热处理等典型的材料成形方法和材料表面工程等新技术的原理和工艺,以及跟材料加工密切相关的材料性能测试的新方法。在本书的实验内容组配过程中,一方面,按照铸造、金属塑性成形、焊接、金属材料及热处理、材料表面工程和粉末冶金等材料成形研究方向的实验进行分模块排序,达到内容编写的系统性,另一方面,根据各种成形方法的特点和研究现状,以及目前的主要研究方向和设备条件,重视基础实验的同时,又兼顾研究型 and 具有工业应用背景的综合实验。每个实验的指导书由实验目的、概述(主要阐述该实验的原理)、实验内容、实验步骤与注意事项、实验报告要求、思考题和参考文献组成,必要时,配以附录。

学生可以有选择性地参加本书所列的实验。通过基础实验(如实验 1、7~15、26、30 等),认识材料成形典型方法的一般规律,加深和巩固“材料加工原理”和“材料加工工艺”两门理论课的基本知识,训练实验技能,提高实验观察和动手能力,培养科学研究的作风;通过参加研究型 and 具有工业应用背景的综合实验(如实验 2~5、16、22、24、27~28 等),学生能更加深刻地认识典型材料成形原理的本质,学习并掌握材料成形现象和材料性能的先进测量方法,了解先进成形技术及其在国民经济中的应用,接触科学研究的前沿,拓宽知识面,提高自主设计实验的能力,锻炼创新意识。

本书所列实验共 30 个,每个实验为 4 学时,“材料加工系列实验”课程可开设 32 学时或 48 学时,学生在教师提供指导性意见的前提下,可在本书所列的众多实验中选择参加,但每个学生所选实验总学时数不能少于 32 学时或 48 学时。

在实验内容编写时,既重视与各种成形方法相关的基础实验,又注意采用最新的研究设备做实验手段,反映当前材料成形及控制工程领域的主要发展方向;实验指导书中还提出了综合性较强具有一定难度的思考题,并列出了相应的参考书,通过查阅参考书及完成思考题,撰写实验报告,可提高学生文献查阅和综述、数据分析和独立思考的能力,为今后的学习和科学研究打下良好的基础。本书可作为“材料成形及控制工程”专业及其他相关专业,如“材料科学与工程”专业的本科生、专科生的必修课教材,也可作为相关专业教师、研究生和技术人员的试验研究参考书。

十几位多年从事教学和科研的清华大学机械工程系和清华大学基础工业训练中心的教师参加了本书的编写。各实验指导书的编写人员分别为:

实验 1、4: 陈祥,李言祥

实验 2: 李双寿,黄天佑

实验 3: 沈厚发,李伟

实验 5: 李双寿,黄天佑,胡永沂

实验 6: 李培杰,何良菊

实验 7、9、15、30: 邹贵生,王庆

实验 8: 李而立,严绍华,初晓

实验 10、13: 初晓,李而立,严绍华

实验 11、14: 姚启明,初晓,李而立

实验 12: 姚启明,左晶,李而立

实验 16: 蔡志鹏,赵海燕

实验 17、22: 张骅,王力,都东

实验 18: 李而立,姚启明,严绍华

实验 19: 李而立,严绍华,姚启明

实验 20、21: 张旭东,张红军

实验 23: 钟敏霖,刘文今

实验 24: 钟敏霖

实验 25: 张人佶,袁达

实验 26: 姚可夫

实验 27: 庄大明,张弓

实验 28: 吴建军,梁吉

实验 29: 陈祥,宋晋生

全书由邹贵生和黄天佑统稿。张迪对全书的文、图和表进行了校对和排版。

都东和梁吉两位教授在材料加工系列实验课程的开设、筹备以及本书的编写过程中提出了许多建设性意见,特此表示感谢。

本书的出版得到清华大学出版社出版基金的资助。正式出版前,本书作为清华大学机械工程系本科生的“材料加工系列实验”课程教材已试用过三届。

由于编者水平有限,书中缺点错误在所难免,敬请读者批评指正并提出宝贵意见。

邹贵生

2004年9月于北京清华园

目录



实验室安全守则与注意事项	1
学生实验守则	2

实 验

实验 1 铝硅合金的细化和变质处理	3
附录 1A 铝硅合金的精炼与除气	8
附录 1B 铝硅合金的细化和变质处理机理	12
实验 2 铸造残余应力的测定	16
附录 2A 铸造应力的其他测量方法及其减小与消除	19
实验 3 连铸钢水流动水力学模拟实验	24
实验 4 液态金属质量表征与识别方法	33
附录 4A 传统铸造热分析的基本原理以及铝硅合金熔体质量的表征	38
实验 5 消失模铸造	43
附录 5A 消失模铸铁件浇注系统设计	49
附录 5B 消失模铸造系统简介	51
实验 6 先进压铸技术	57
实验 7 金属高温强度和塑性及其测定	64
附录 7A 热—力学模拟试验机 Gleeble 1500D 介绍	72
实验 8 金属室温压缩的变形抗力测定及加工硬化分析	79

附录 8A 变形抗力近似值的测定方法	83
实验 9 金属高温压缩塑性变形及其变形抗力测定	85
实验 10 金属压缩过程中的摩擦系数测定及压缩过程数值模拟	92
实验 11 金属薄板的成形极限	99
实验 12 金属室温压缩的塑性及其流动	105
实验 13 金属薄板的弯曲试验	110
实验 14 拉深成形的凸耳现象及其模具分析	115
实验 15 热循环对材料组织与性能的影响	121
附录 15A 钢的 CCT 图和焊接热影响区 CCT 图	126
实验 16 残余应力盲孔法测定与消除	131
实验 17 工业机器人运动编程及自动弧焊	138
附录 17A 实验安全操作规程	142
附录 17B MILLER MRV6 工业机器人简图	143
实验 18 脉冲 TIG 焊	144
附录 18A 常用不锈钢和铝合金 TIG 及 TIG-P 焊接工艺参数	153
实验 19 电阻点焊	154
附录 19A 实验操作要求及其他	161
实验 20 焦点位置对 CO ₂ 激光焊缝成形及熔化效率的影响	165
附录 20A 实验操作流程	170
实验 21 激光焊接过程检测与控制——等离子体的光电检测与 焦点位置寻优	171
附录 21A 实验操作流程	176
实验 22 脉冲 Nd: YAG 激光加工	177
附录 22A 实验安全操作规程(暂行)	181
实验 23 激光相变硬化	182
实验 24 激光熔覆	188
实验 25 等离子喷涂涂层的制备与观测	193
实验 26 干摩擦及油润滑条件下的摩擦学实验	200
实验 27 功能薄膜的制备方法以及光电学性能测试实验	205

附录 27A 有关图表	208
实验 28 铁基粉末冶金	210
实验 29 金相图像分析	214
附录 29A 定量金相学基础及定量金相试样的选取与制备	219
实验 30 热膨胀法测定钢的连续冷却转变图	224
附录 30A 钢的 CCT 图热膨胀法测定	229

实验室安全守则与注意事项

材料加工实验室中,许多设备在运行过程中涉及高温环境和力;有的化学试剂易燃、易爆,甚至还有腐蚀性和毒性。所以进行实验时,必须特别注意安全问题,绝对不能麻痹大意。为此,实验前应认真听辅导教师讲解,必须掌握实验注意事项,实验过程中要严格遵守安全守则,避免事故的发生。

安全守则和注意事项如下:

1. 严禁在实验室内跑、跳、打闹等,保持安静。避免震动,以免影响仪器精度及测量准确度。
2. 进入各实验室做实验时,必须穿长裤,不能穿拖鞋和凉鞋。
3. 不准随意挪动重要仪器和设备。
4. 不许擅自接通实验室的各种电源,只有经辅导教师检查同意后才能使用电源。
5. 实验前期接好电路中除电源外的线路,安装好各种卡具、试样,编好实验程序等,经辅导教师检查后,才能正式进行实验。
6. 注意仪器的冷却水系统,仪器开动前按规定通冷却水,实验完成后必须关闭冷却水。
7. 离开实验室前检查电、水、门窗,并经过辅导教师检查后方可离开。
8. 做完实验后,必须由辅导教师检查数据,然后再拆卸相应的装卡具和线路等,整理仪器和还原,并将实验现场收拾整齐。

学生实验守则

1. 实验前必须认真预习,明确实验目的和全部实验内容,了解实验有关操作技术和注意事项,设计实验方案和实验数据记录表格,并写出实验预习报告。经辅导教师检查合格后,方可做实验。没有预习或预习不合格者,辅导教师有权不让他参加本实验。

2. 进入实验室后,首先熟悉实验室环境、布置和各种实验设施的位置。听从辅导教师的安排,严肃认真,爱护所有仪器和工具。

3. 在进行实验操作时,要集中思想,细致观察,如实记录,开动脑筋,独立或与小组成员合作完成实验任务。

4. 用完公用工具后,应立即归还原处。不许动用非本实验用的其他仪器设备。使用的仪器设备,如有损坏遗失,要立即报告辅导教师,并将详细情况进行登记,事后按规定处理。

5. 实验完成后应认真撰写实验报告,要求如下。

(1) 一律用 A4 纸,竖放横书。

(2) 实验报告封面填好班级、姓名、学号、同组人姓名,实验日期、完成报告时间、教师审阅等项。

(3) 项目完整,内容简单明了,书面整齐清洁,各种图表规范。

(4) 实验报告的详细要求见各实验指导书。

(5) 在撰写有些实验的实验报告时,要求多个实验小组的原始数据共享,但数据处理必须独立完成。

(6) 必须按相关实验的辅导老师的要求提交实验报告。实验报告必须独立完成,鼓励写实验体会。

实验 1

铝硅合金的细化 和变质处理

1. 实验目的

- (1) 熟悉 Al-7Si 合金的熔炼、精炼、细化和变质处理过程。
- (2) 了解 Al-7Si 合金细化和变质处理的基本原理和方法。
- (3) 了解细化剂和变质剂对 Al-7Si 合金组织的影响。

2. 概述

铝是地壳中蕴藏量最多的金属元素,其总储量约占地壳重量的 7.45%。铝及铝合金的产量在金属材料中仅次于钢铁材料而居第二位,是有色金属材料中用量最多、应用范围最广的材料。纯铝是很柔软的金属,具有高导热性、导电性、抗蚀性和低密度等优点;工艺性能也十分优良,易于铸造、切削及加工成型;在合金化以后,铝合金有高的比强度、比刚度、断裂韧性和疲劳强度,同时保持良好的成形工艺性能和高的耐腐蚀稳定性,用其代替钢铁材料可大大减轻零构件的重量,增加结构的稳定性。因此,铝及铝合金在各种工业领域具有广泛的用途,是一种重要的工程结构材料。

在制造形状复杂、比强度、比刚度要求高的零部件时,广泛采用铝合金。目前液体导弹、运载火箭、各种航天器、飞机的主要结构材料大多采用铝合金,装甲、坦克、舰艇的制造也离不开铝合金。在机械、船舶、电子、电力、汽车、建筑和日常生活用具等生产行业,铝合金也同样有广泛的应用。常用的铸造铝合金有 Al-Si 系、Al-Cu 系、Al-Mg 系和 Al-Zn 系四大类,其中 Al-Si 系合金是航空工业中应用最广的铸造铝合金。亚共晶铝硅合金由于具有优异的铸造性能和良好的机械性能和力学性能以及物理化学性能(良好的耐蚀性、耐磨性和耐热性能)而在铝合金铸件中所占比重越来越大,占铝合金铸件总产量的 80%以上。



铝与硅形成的二元相图(图 1-1),共晶成分含 Si 11.7%、共晶温度为 577℃。Al-7Si 合金含 7% 的 Si,属于亚共晶铝硅合金。铸态组织由初生铝基固溶体(α -Al)相以及 α -Al 与粗大的块状或片状共晶硅的共晶体组成。由于共晶硅严重割裂基体,降低合金的强度和塑性,因此合金的机械性能不高,因而通常对二元铝硅合金进行细化和变质处理。

对熔体晶粒细化和变质处理的大量研究表明,晶粒细化和变质处理可显著提高铸件的综合性能,防止某些铸造缺陷。这是因为晶粒细化和变质处理有如下作用:

- (1) 可使合金组织发生变化,改变晶粒的大小和共晶硅的形状和分布;
- (2) 提高铸件的致密度;
- (3) 使铸件中的气、缩孔和夹杂物弥散分布,减小它们对铸件基体的不良影响;
- (4) 降低铸件凝固过程中产生热裂的倾向;
- (5) 提高延伸率;
- (6) 改进热处理性能;
- (7) 改善熔体的流动性;
- (8) 消除 X 衍射中所看到的“麻点”。

细化处理和变质处理是目前改善铝硅合金组织、提高性能的最常用也是最有效的手段。

1) 铝硅合金的细化处理

铝硅合金的细化处理的目的是细化合金的 α -Al 晶粒。晶粒细化是通过控制晶粒的形核和长大来实现的。细化处理的最基本原理是促进形核,抑制长大。对晶粒细化剂的基本要求是:

- (1) 含有稳定的异质固相形核颗粒,不易溶解;
- (2) 异质形核颗粒与固相 α -Al 间存在良好的晶格匹配关系;
- (3) 异质形核颗粒应非常细小,并在铝熔体中呈高度弥散分布;
- (4) 加入的细化剂不能带入任何影响铝合金性能的有害元素或杂质。

1950 年 Cibula 发现,当铝合金中含有 Ti,特别是同时存在微量 B 或 C 时,将会使铝合金的晶粒细化。这一发现开创了 Al-Ti 系列晶粒细化技术的先河。

晶粒细化剂的加入一般采用中间合金的方式。常用晶粒细化剂有以下几种类

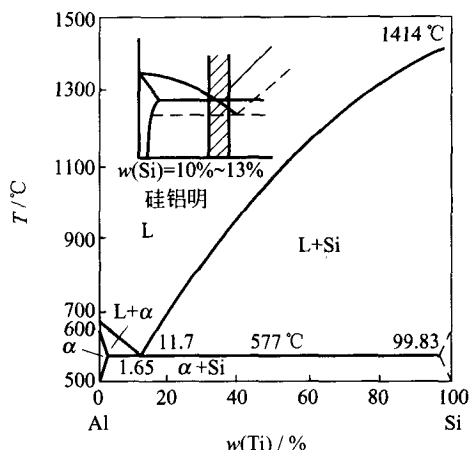


图 1-1 Al-Si 二元相图

型：二元 Al-Ti 合金、Al-B 合金和三元 Al-Ti-B 合金、Al-Ti-C 合金以及稀土金属中间合金。它们是工业上广泛应用的最经济、最有效的铝合金晶粒细化剂。这些合金加入到铝熔体中时，会与 Al 发生化学反应，生成 TiAl_3 或 $(\text{Ti}, \text{B})\text{Al}_3$ 、 TiB_2 、 AlB_2 或 $(\text{Al}, \text{Ti})\text{B}_2$ 、 TiC 、 B_4C 等金属间化合物相。这些金属间化合物相在铝熔体中以高度弥散分布的细小异质固相颗粒存在，可以作为 $\alpha\text{-Al}$ 形核、长大的核心，从而增加反应界面和晶核数量、减小晶体生长的线速度，起到晶粒细化的作用。

晶粒细化剂的加入量跟合金种类、化学成分、加入方法、熔炼温度以及浇注时间等有关。若加入量过大，则形成的异质形核颗粒会逐渐聚集，由于其密度比铝熔体大，因此会聚集在熔池底部，丧失晶粒细化能力，产生细化效果衰退现象。

晶粒细化剂加入合金熔体后要经历孕育期和衰退期两个时期。在孕育期内，中间合金完成熔化过程并使起细化作用的异质形核颗粒均匀分布并与合金熔体充分润湿，逐渐达到最佳的细化效果。此后，由于异质形核颗粒的溶解而使细化效果下降；同时异质固相颗粒会逐渐聚集而沉积在熔池底部，出现细化效果衰退现象。当细化效果达到最佳值时进行浇注是最为理想的。随合金的熔炼温度和加入的细化剂的种类的不同，达到最佳细化效果所需的时间也有所不同，通常存在一个可接受的保温时间范围。

合金的浇注温度也会影响最终的细化效果。在较小的过热度下浇注可以获得良好的细化效果；随着过热度的增大，细化效果将下降。通常存在一个临界温度，低于该温度时温度变化对细化效果的影响并不明显，而高于此温度时，随着浇注温度的升高，细化效果会迅速下降。该临界温度同合金的化学成分和细化剂的种类以及加入量有关。

图 1-2 为铝硅合金细化处理前后的显微组织。

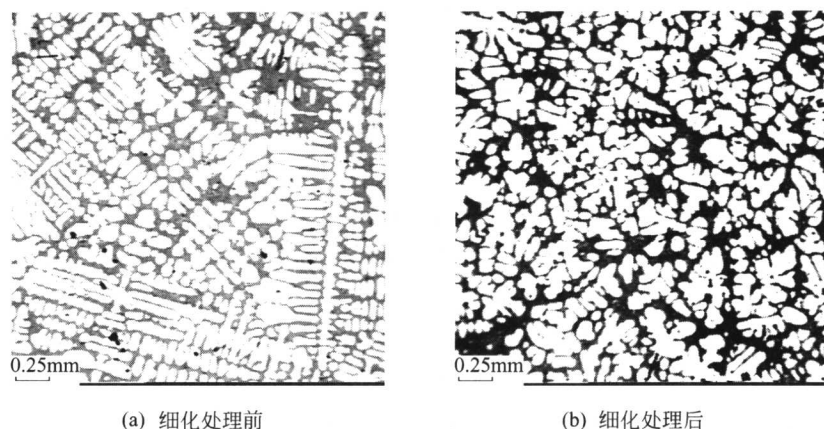


图 1-2 铝硅合金细化处理前后的显微组织

2) 铝硅合金的变质处理

铝硅合金中, Si 相在自然生长条件下会长成块状或片状的脆性相, 它严重地割裂基体, 降低合金的强度和塑性, 因而需要将它改变成有利的形态。变质处理使共晶硅由粗大的片状变成细小纤维状或层片状, 从而改善合金性能。

图 1-3 为铝硅合金变质处理前后的显微组织。

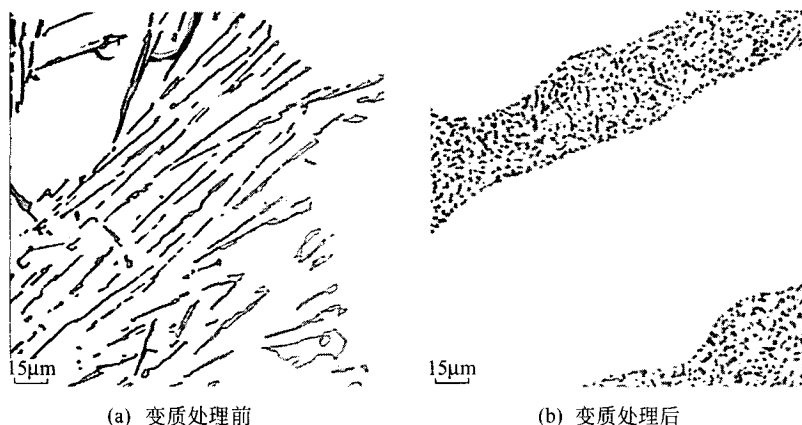


图 1-3 铝硅合金变质处理前后的显微组织

变质处理一般在精炼之后进行, 变质剂的熔点应介于变质温度和浇注温度之间。变质处理时处于液态, 有利于变质反应的完成; 而在浇注时已变为粘稠的熔渣, 便于扒渣, 不致形成溶剂夹杂。

自 1921 年发现金属钠(Na)对 Al-Si 共晶合金的共晶组织有细化作用, 能明显提高合金的力学性能尤其是延伸率以来, 加 Na 变质处理就成为铝硅合金铸造的必要工序。在铝硅合金熔体中加入微量的变质元素 Na(质量分数 $w(\text{Na}) \approx 0.01\%$) 后, 共晶硅形貌会发生巨变, 由片状转变为纤维状, 凝固曲线的共晶平台下降($5 \sim 10^\circ\text{C}$), 共晶点右移(质量分数为 $1\% \sim 3\%$), 同时材料的力学性能特别是延伸率会大幅度提高。

尽管 Na 具有很好的变质效果, 但是存在如下问题: Na 极易烧损, 变质有效时间短, 砂型铸造条件下有效时间仅为半小时; 吸收率低, 并且含量很难预测; 钠盐变质剂中的 F^- 和 Cl^- 离子腐蚀铁质坩埚及熔炼工具, 使铝液渗铁, 导致合金铁质污染, 同时在坩埚壁上形成一层牢固的结合炉瘤, 浇注后很难清除; 挥发性卤盐会腐蚀设备。

近年来发现, 碱金属中的 K、Na, 碱土金属中的 Ca、Sr, 稀土元素 Eu、La、Ce 和混合稀土, 氮族元素 Sb、Bi, 氧族元素 S、Te 等均具有变质作用。其中, Na、Sr 的效果最佳, 可获得完全均匀的纤维状共晶硅。