

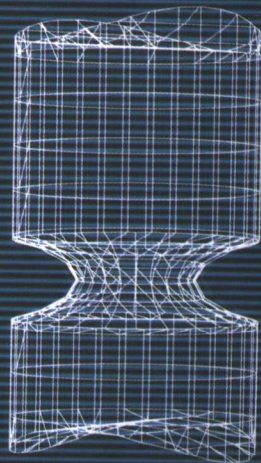
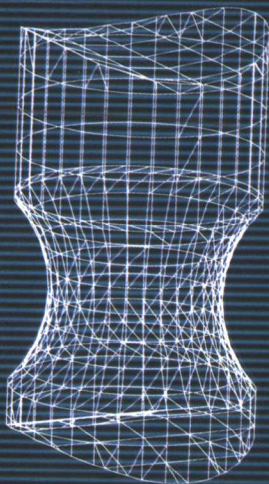
材料科学与工程



# 材料加工工艺过程的检测与控制

●杨思乾 李付国 张建国 主编

国防科工委「十五」  
规划教材



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·材料科学与工程

# 材料加工工艺过程的检测与控制

主 编 杨思乾 李付国 张建国  
主 审 张彦华 方洪渊

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

本书系统地介绍了材料加工工艺流程检测与控制的原理及方法。全书共 13 章。第 1~6 章介绍温度、力与应变、真空度、位移及转速、磁场等的测量;第 7~11 章介绍材料加工过程的单片机控制、可编程控制器控制、CAD/CAM 技术及相关的执行机构等;第 12 章介绍机器人工作原理及其在材料加工中的应用;第 13 章介绍检测与控制系统的电磁骚扰与兼容。

本书可作为高等院校材料成形及控制专业的本科生教材及参考书,也可作为从事铸、锻、焊、热处理生产与科研工作的工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

材料加工工艺流程的检测与控制/杨思乾,李付国,张建国主编. —西安:西北工业大学出版社,2006.2

国防科工委“十五”规划教材. 材料科学与工程

ISBN 7-5612-2003-0

I. 材… II. ①杨…②李…③张… III. ①工程材料—加工—检测—高等学校—教材 ②工程材料—加工—过程控制—高等学校—教材 IV. TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 108666 号

## 材料加工工艺流程的检测与控制

杨思乾 李付国 张建国 主编

责任编辑 翟恒曜

责任校对 季苏平

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072)

市场部电话:029-88493844 88491757

http://www.nwpup.com

陕西向阳印务有限公司印制 各地书店经销

开本:787 mm×960 mm 1/16

印张:28.5 字数:600 千字

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月第 1 次印刷

印数:1~3 000 册

ISBN 7-5612-2003-0 定价:35.00 元

# 国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯  
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春  
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡  
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章  
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山  
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



# 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技



新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提



升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



# 前 言

本书为国防科工委“十五”规划教材,可作为材料科学与工程学科方向的本科生教材及参考书,建议学时范围为40~50学时。

材料加工工艺过程的检测与控制是涉及内容较为广泛的一门课程。根据我国高等学校专业学科归并的现实情况,以及国防系统材料加工过程的基本特点与发展需求,本书在编写过程中坚持以强化应用基础为主要目的的指导思想,将检测与控制两方面的内容尽量纳入具体控制过程进行论述,以适应学生的认知规律。

本书共13章,其中前六章主要介绍材料加工过程的检测,后七章主要介绍材料加工过程的控制。

本书的实验教材及电子出版物将另行出版。

本书绪论及第4章由杨思乾编写;第1,8章由张建国编写;第2,5,9,11章由李付国编写;第3章由杨思乾、达道安、李得天编写;第6,10章由马铁军、杨金孝编写;第7章由杨思乾、达道安、谈治信编写;第12章由张勇编写;第13章由杨思乾、白同云编写。

本书由西北工业大学杨思乾、李付国、张建国任主编,北京航空航天大学张彦华、哈尔滨工业大学方洪渊任主审。此外,西北工业大学嵇菊生、南昌航空工业学院方平、西安交通大学王雅生及华中科技大学许福玲等对本书主要章节进行了仔细审阅。

在本书的编写过程中,我们得到了许多高等院校有关教研室的热情支持。刘建民、王兰代绘制了全书的大部分图表,在此一并表示感谢。

最后,特别感谢本书援引的参考文献的作者。





由于编者水平有限,书中一定会有错误和不足之处,敬请专家和读者批评指正。

编者

2005年6月

# 目 录

绪 论	
习 题	4
<b>第 1 章 温度的检测</b>	
1.1 热电偶测温技术	5
1.2 热电阻	15
1.3 辐射测温	19
1.4 温度检测电路及测温仪表	26
1.5 智能仪表	31
习 题	37
<b>第 2 章 力与应变的测量</b>	
2.1 应变式传感器及测量电路	38
2.2 压阻式传感器及测量电路	49
2.3 压电式传感器及测量电路	53
2.4 压磁式传感器及测量电路	57
2.5 应力及应变的其他测量方法	61
习 题	69
<b>第 3 章 真空度的测量</b>	
3.1 真空系统及其主要参数	71
3.2 真空度的测量	73
3.3 真空测量技术	83
3.4 真空检漏技术和仪器	93
习 题	101
<b>第 4 章 位移及转速的测量</b>	
4.1 位移的测量	102
4.2 转速的测量	113
习 题	118
<b>第 5 章 磁场的测量</b>	
5.1 磁传感器的基本原理及类型	119
5.2 霍尔元件磁传感器及其检测电路	121
5.3 磁敏电阻传感器及其检测电路	126
5.4 磁敏晶体管传感器及其检测电路	132



5.5 磁场测量在材料加工中的应用 .....	137
习 题 .....	143
<b>第 6 章 检测信号微机处理系统的输入与输出</b>	
6.1 输入、输出通道的基本结构 .....	144
6.2 输入通道的基本电路 .....	149
6.3 A/D 转换电路 .....	156
6.4 输出通道的基本电路 .....	168
习 题 .....	182
<b>第 7 章 材料加工控制系统的执行机构</b>	
7.1 电加热系统 .....	183
7.2 液压与气压系统 .....	192
7.3 真空系统 .....	212
7.4 电机调速系统 .....	226
习 题 .....	236
<b>第 8 章 材料加工过程的单片机控制</b>	
8.1 单片机结构与控制系统组成 .....	237
8.2 交流电阻点焊单片机控制 .....	246
8.3 气体渗碳炉的单片机控制 .....	254
8.4 燃气加热炉温度的单片机控制 .....	261
习 题 .....	268
<b>第 9 章 材料加工过程的可编程控制器控制</b>	
9.1 可编程控制器概述 .....	270
9.2 钣金成形中的 PLC 控制 .....	275
9.3 锻压成形中的 PLC 控制 .....	280
9.4 铸造成形中的 PLC 控制 .....	284
9.5 粉末成型中的 PLC 控制 .....	288
9.6 自动点焊的 PLC 控制 .....	291
习 题 .....	295
<b>第 10 章 材料加工过程的智能控制</b>	
10.1 概述 .....	296
10.2 焊接过程的智能控制 .....	311
10.3 塑性成形及铸造过程的智能控制 .....	322
10.4 热处理过程的智能控制 .....	331
习 题 .....	339
<b>第 11 章 材料加工过程的仿真与 CAD/CAM 技术</b>	
11.1 材料加工过程的数值模拟与仿真 .....	340
11.2 CAD/CAM 系统的基本组成及编程方法 .....	346



11.3	材料加工过程的 CAM 技术 .....	363
11.4	材料加工过程的快速原形制造系统 .....	370
	习 题 .....	376
<b>第 12 章</b>	<b>机器人工作原理及其在材料加工中的应用</b>	
12.1	概述 .....	377
12.2	机器人的驱动及操作机 .....	382
12.3	机器人控制技术 .....	389
12.4	机器人在材料加工中的应用 .....	402
	习 题 .....	405
<b>第 13 章</b>	<b>检测与控制系统的电磁骚扰与兼容</b>	
13.1	电磁骚扰及其耦合途径 .....	406
13.2	有源器件的选择与印刷电路板的设计原则 .....	411
13.3	系统地线及接地技术 .....	423
13.4	电磁屏蔽及电源系统的抗骚扰设计 .....	433
	习 题 .....	436
<b>参考文献</b>	.....	437

# 绪 论

## 一、材料加工工艺流程检测与控制的作用

金属及非金属材料的加工过程是一个复杂的物理、化学过程。在这个过程中,尤其是在热加工过程中,常常伴随着温度、压力、转速、位移、真空度、磁场、电流、电压等多种物理参数的变化。在加工过程中,准确地检测和控制这些物理参数的变化,以保证产品质量的稳定,是材料加工过程的主要目的之一。

下面以航空压力容器的加工过程为例,进一步说明检测与控制在材料加工过程中的作用。

航空压力容器(或称冷气瓶)是飞机冷气系统的一个重要组成部分。为了确保飞行安全,冷气操作系统有主操作系统和应急操作系统。因此,冷气瓶也随之分为主冷气瓶和应急冷气瓶。主冷气瓶用于启动发动机,收放襟翼、起落架和主轮刹车等;应急冷气瓶在主冷气系统发生故障或损坏时替代主冷气系统承担上述操作功能。因此冷气瓶是飞机飞行过程中保证安全的关键部件。

图 0-1 为典型的圆柱形冷气瓶,其材料为 30CrMnSiA 钢。冷气瓶的制造过程大致如下:先按图纸要求从板材下料,再通过卷制、液压成形和机械加工的方法,制成冷气瓶的筒体及端盖毛坯。然后把部件组装起来,用全自动钨极氩弧焊或全自动 CO<sub>2</sub> 气保护焊焊接纵缝、两条环缝及两个管接头,最后再对构件进行焊后热处理,以改善焊接接头的机械性能。

在上述工艺过程中,要分别检测压力、变形量、焊接速度、焊接电流和加热温度等一系列参数,以保证对冲压、焊接及热处理过程进行可靠的自动控制。只有这样,才能获得质量合乎要求的产品。

因此,检测与控制在材料加工工艺过程中起着十分重要的作用。可以说,没有先进的检测与控制技术,就不可能有先进的材料加工方法及制造工艺。

## 二、材料加工工艺流程检测与控制的特点

### 1. 检测参数的多样性及复杂性

随着材料种类的大量增加以及对零件加工精度要求的日益提高,材料加工工艺过程的检

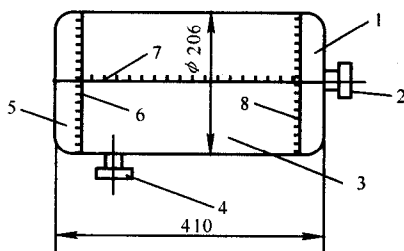


图 0-1 圆柱形冷气瓶

1,5—端盖; 2,4—管接头;

3—筒体; 6,7,8—焊缝



测参数越来越多,检测过程越来越复杂,对检测精度的要求也越来越高。

在材料加工过程中,常常会遇到温度、压力、位移、转速、应力应变、真空度及磁场强度等多个参数的实时检测,这就大大增加了检测过程的复杂性和技术难度。

#### 2. 被检参数变化范围大

零件的复杂性及多样性,导致了材料加工工艺过程检测数据通常在大范围内变化。例如,温度可从室温变化到数千度,压力从几牛变化到几百千牛,真空度从几帕变化到 $10^{-8}$  Pa等。这样,在不少情况下,单一仪表是很难满足检测要求的,必须使用两种以上不同量程的仪表,并在检测过程中能够实现自动转换。

#### 3. 检测与控制过程的干扰严重

材料加工过程的周围环境常存在很强的电磁干扰。这种干扰不仅强度大,而且干扰信号的频率分布范围较宽(从几赫至几百千赫),从而严重地影响检测和控制过程的正常进行,因此,必须采取多种抗干扰措施。

#### 4. 控制过程及被检参数存在明显的非线性、时变性、不确定性及不完全性

材料的加工工艺过程受多种因素的影响,这些影响存在着明显的非线性、时变性、不确定性及不完全性。例如,点焊过程中的电极表面粘污,焊接温度场变化的不均匀性,冲压模具的磨损等,这些因素明显增加了控制过程的技术难度。

### 三、材料加工工艺过程检测与控制的发展趋势

材料加工工艺过程检测与控制的发展趋势主要体现在以下四个方面。

#### 1. 检测与控制的智能化

所谓智能化,是指在检测及控制过程中,利用计算机及其系统来模拟和执行人类的某些智力功能。例如,判断、理解、推理、识别、规划、学习和问题求解等。

随着计算机技术及智能控制理论的发展和完善,智能仪表及智能控制系统在材料加工领域的应用已日益广泛,代表了检测与控制系统的的主要发展方向。

与传统的检测仪表及控制系统相比,智能仪表及智能控制系统具有明显的优势。智能化检测仪表能在被测参数发生变化时,自动选择测量方案,进行自动校正、自补偿、自检测、自诊断,并可进行远程设定、状态组合、信息存储以及网络接入等。

智能控制的基本特点是不依赖或不完全依赖被控对象的数学模型,主要是利用人的操作经验、知识和推理技术以及控制系统的某些信息和性能得出相应的控制动作。这种控制方式非常适合材料加工工艺过程的控制。

智能控制主要包括专家系统、模糊控制及人工神经网络控制。

智能控制的发展,为材料加工过程的建模和控制提供了全新的途径。由于材料加工过程是一个多参数相互耦合的时变非线性系统,影响材料加工质量的因素较多,并带有明显的随机性,因此,专家系统、模糊控制、神经网络控制及其互相结合的控制方式在材料加工过程中展示



了广阔的应用前景。

## 2. 检测与控制系统的综合化

为了提高对材料加工过程参数的全面监视、检测、控制,以及检测与控制过程的高灵敏度、高精度、高分辨率和高稳定性,则必须提高控制与检测系统的综合能力,充分利用系统的内在规律,使系统向功能更强和层次更高的方向发展。

检测与控制系统综合化及一体化的结果,不仅大大提高了检测与控制系统的合理性,而且加快了系统的标准化,使得由多种计算机组成的控制系统连接组合更为方便。

3. 单片机、可编程控制器、机器人和 CAD/CAM 将成为材料加工过程检测与控制的主要支柱

单片机、可编程控制器是 20 世纪 70 年代末开始在我国应用的。目前,大部分材料加工过程及其相关装置已用单片机及可编程控制器进行控制,并显示出以下明显的技术特点。

- (1) 具有高的可靠性及控制精度;
- (2) 良好的控制实时性;
- (3) 完善的输入/输出通道及通信功能;
- (4) 灵活方便的软件编程;
- (5) 很强的环境适应性及抗干扰能力;
- (6) 良好的可维修性。

可以预见,在今后较长的一段时间内,单片机及可编程控制器仍将占据检测与控制领域的主要位置。

自从 1962 年美国推出第一台工业机器人以来,到 2000 年全世界的工业机器人总数已达近百万台,其中大多数被用在焊接等材料加工领域。

机器人的应用是材料加工领域革命性的进步,它突破了材料加工检测与控制的传统模式,开拓了一种柔性自动化的生产方式。在产品的更新换代越来越快的今天,柔性制造技术显然具有非常重要的意义。

计算机辅助设计及计算机辅助制造(CAD/CAM)是指以计算机作为主要技术手段,来生成和运用各种数字信息和图表信息,以进行产品设计和制造。CAD/CAM 技术在飞机、汽车及船舶工业中已得到广泛的成功应用。这是工业革命以来工程技术领域中发生的最重大的变化之一。

CAD/CAM 技术在材料加工领域的推广应用,改变了工程技术人员的工作方式,缩短了产品的研制周期,显著提高了产品质量以及新产品开发的成功率。

CAD/CAM 技术所具有的实体造型功能、三维运动机构的分析和仿真功能、有限元法网络自动生成功能、优化设计功能以及信息处理的管理功能已经显示出了强大的技术优势及非常广阔的应用前景。

毫无疑问,单片机、可编程控制器、机器人和 CAD/CAM 必将在材料加工工艺过程检测与



控制领域得到更加日益广泛的应用。

#### 四、课程的目的及要求

本课程是材料成形与控制及材料加工工程专业的主要课程之一,其任务是使学生掌握材料加工工艺过程检测与控制的基础理论、基本知识、基本方法及相关的实验技能,使其能够根据材料加工工艺过程的要求,正确检测温度、力、真空度、位移、转速以及磁场等相关的物理量,并对工艺过程进行自动控制。

本课程的主要内容如下:

- (1)温度、力与应变、真空度、位移、转速及磁场的检测方法及其原理;
- (2)检测与控制的执行机构及其工作原理;
- (3)单片机及可编程控制器控制原理及其方法;
- (4)智能控制原理及其方法;
- (5)过程仿真与CAD/CAM技术;
- (6)机器人及其工作原理;
- (7)检测与控制系统的干扰与抗干扰。

本课程是以物理学、电工学、电子学、微机原理及应用和材料成形工艺等课程为基础的专业课。学习本课程前,学生应对微型计算机、可编程控制器以及主要的材料加工工艺方法有一定的感性认识。在教学过程中,应密切注意与实践性教学环节的结合。

#### 习 题

1. 举例说明检测与控制在材料加工过程中的作用。
2. 材料加工工艺过程检测与控制的主要特点是什么?
3. 材料加工工艺过程检测与控制的发展趋势是什么?



# 第 1 章 温度的检测

温度是反映物体冷热程度的一个状态参数,它反映了物体内部微粒(分子或原子、离子、电子)无规则运动的平均动能。物体愈热,温度愈高,这些微粒运动的平均动能也就愈大。物体微粒的动能、势能等能量的总和构成了它的内能,因此,温度又是体现物体内能的一个重要的参数。

在热加工过程中,温度的检测和调节是极为重要的。只有在精确的温度检测和调节下,才能保证零件热加工的质量。温度检测和调节是两种不同的概念,温度检测是反映被测对象的温度及其变化;而温度调节是控制被测对象的温度变化规律。

物体的温度之所以能够进行检测,一是基于物体的某些物理量与温度有单值关系;二是诸物体之间达到热平衡时具有相同的温度。温度的检测广泛采用感温元件,常用的有热电偶、热电阻温度计和辐射高温计等。热电偶依据的是热电偶的热电势与温度的关系,而热电阻是利用温度变化引起物体的电阻变化的性质。物体的这种热电效应是温度检测的理论基础。

## 1.1 热电偶测温技术

温度检测中使用最广泛的感温元件是热电偶,它们是根据材料的电性能和热电效应制成的。

### 一、热电元件的物理基础

#### 1. 塞贝克效应

1821年德国物理学家塞贝克在考察铋-铜和铋-锑回路的热电效应时发现:当A、B两种不同金属组成闭合回路,且两接触点具有不同温度时,回路中产生电动势和电流(见图1-1)。这种热能转变成电能的现象,称为塞贝克效应。

塞贝克电动势的大小和方向决定于回路中两接触点的温度差和导体材料。在两接触点的温度差不大时,电动势 $E_{AB}$ 与温差 $\Delta T$ 成正比,即

$$E_{AB} = S_{AB} \Delta T \quad (1-1)$$

式中, $S_{AB}$ 称为相对热电势率,也叫做塞贝克系数。它表示两接点的温差为 $1^{\circ}\text{C}$ 时回路中相应的热电势。相对热电势率 $S_{AB}$ 不是单一材料的特性参数,而是两种材料组合的特性。由于电动势有方向性, $S_{AB}$ 也有方向性。