

现代汽车设计制造丛书

汽车材料 及热加工工艺

金善勤 主编



上海交通大学出版社

现代汽车设计制造丛书

本书出版由上海发展汽车工业教育基金会资助

汽车材料及热加工工艺

金善勤 主编

金善勤 沈利群

薛敬业 李文芳 编著

陈振耀

钱苗根 审



汽车材料及热加工工艺

金善勤 主 编

上海交通大学出版社出版发行
上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030
电话 64281208 传真 64683798

全国新华书店经销

常熟市印刷二厂·印刷

开本:787×1092(mm) 1/16 印张:15.5 字数:955 千字

版次:1998 年 10 月 第 1 版

印次:1998 年 10 月 第 1 次 印数:1-2000

ISBN 7-313-01989-0/U·071

定价:25.00 元

本书任何部分文字及图片,如未获得本社书面同意,
不得用任何方式抄袭、节录或翻印。

(本书如有缺页、破损或装订错误,请寄回本社更换。)

内 容 提 要

本书介绍了现代汽车应用的各种材料及其热加工工艺。主要讲述了各种材料的成分、结构、使用性能和加工性能等基础知识,以及它们在汽车上的应用现状和发展趋势。

本书主要供高等院校汽车专业教学用,也可供汽车行业从事设计、制造、材料、工艺等方面工作的工程技术人员参考。

主 编 王 明

副 编 王 明

参 考 文 献

前言

汽车上每个零件无一不是由材料制成的,汽车行业的工程技术人员在设计选材、加工制造、使用维护等方面都必须懂得汽车用材,就像服装设计师必须懂得衣料,建筑工程师必须懂得建材那样。现代汽车要求安全、舒适、减轻自重、低污染、节能、价廉,这些更离不开与之相匹配的材料。可以说,汽车的发展是以材料和材料加工工艺的发展为基础的,两者的发展必然是同步的,而层出不穷的新材料和新工艺为现代汽车的更新提供了必要的条件。可见,材料及其加工工艺是汽车专业学生必须修读的课程。

本书介绍各种材料及其热加工工艺以及主要在轿车上的应用。材料有金属和非金属之分。金属材料又有黑色金属和有色金属之分。黑色金属中的钢铁材料性能较好,便于加工,价格不高,仍是汽车的主要用材,如在现代轿车中,钢铁材料超过三分之二(其中铸铁约占10%)。对一般要求的结构零件多用碳钢或铸铁制造,要求高的结构材料可选用合金钢,随着对轿车性能要求的提高,高强度合金钢的应用取代了一些碳钢。有色金属中的铝、铜等强度不很高,价格又较贵,在轿车上的使用不如钢铁普遍,但是有色金属具有钢铁所不及的特性,在现代轿车上的应用正在稳步增加。尤其是铝,在轿车轻量化中举足轻重。据统计,十年来轿车上铝及其合金的用量已从5%左右上升到10%左右,而钢铁的用量相应下降。书中列出了轿车常用金属材料的中国牌号或代号,至于与国外牌号或代号的对照可查阅有关手册。

非金属材料也各有特点,与轿车的安全性、经济性、舒适性密切相关,在轿车制造中同样是不可缺少的。复合材料包括非金属与非金属的复合及非金属与金属的复合,轿车用复合材料现以前者为主,故本书将复合材料放在非金属部分讲述。现代轿车所用材料中非金属材料 and 复合材料的用量近些年也呈增长趋势。非金属材料中塑料等结构材料用量较大,超过轿车总重的10%。

金属材料的铸造、压力加工和焊接都是材料成形的主要方法,热处理和压力加工又能提高材质,这些加工工艺都是材料知识的组成部分,本书安排了专门章节予以介绍。

书中以基础知识为主,结合轿车应用和展望,并强调材质问题。总起来说,现代轿车材料与加工工艺的发展趋势是:结构材料中钢铁所占比例有所下降,而有色金属、非金属、复合材料的用量有所上升;轿车轻量化受重视,相应地,比强度高的高强度钢材、铝镁及一些非金属材料受青睐;对材料使用性能的要求更高,促进着新材料的发展;加工工艺性好的材料比较容易被采纳;要求降低材料成本。我国正在设法提高轿车材料的国产化程度;减少原材料进口,研制新材料,以促进汽车工业的发展。

本书由上海工程技术大学几位教师共同编著,其中第 1、2、3、5、6 章由沈利群执笔,第 4、7、8、9、10 章由金善勤执笔,第 11、15、16 章由薛敬业执笔,第 12、14 章由李文芳执笔,第 13、17 章由陈振耀执笔。全书由金善勤主编。陆丽萍和周剑锋两位在校学习期间为本书编著分别搜集了金属材料和热加工应用方面的信息。上海交通大学钱苗根教授在百忙中审阅了书稿并提出了宝贵意见,我们在此谨表感谢。

书中不当之处,敬请师生和其他读者指正。

编著者

1998 年 4 月

目 录

第 1 篇 金属材料及热处理

第 1 章 金属材料的性能	3
1.1 物理性能	3
1.2 化学性能	6
1.3 工艺性能	6
1.4 力学性能	8
第 2 章 金属与合金的结构及铁碳状态图	17
2.1 纯金属的晶体结构及其结晶	17
2.2 合金的结构与结晶	26
2.3 铁碳合金相图及其应用	31
第 3 章 碳钢	40
3.1 碳钢的分类、牌号和性能	40
3.2 碳钢在轿车上的应用	45
第 4 章 钢的热处理	47
4.1 钢在加热和冷却时的组织转变	48
4.2 退火	55
4.3 正火	56
4.4 淬火与表面淬火	57
4.5 回火	59
4.6 化学热处理	60
4.7 热处理工艺的选用	63
4.8 热处理质量问题	65
第 5 章 合金钢	68
5.1 合金元素在钢中的作用	68
5.2 合金钢的分类与牌号	71
5.3 合金结构钢	72
5.4 特殊钢	84
第 6 章 铸铁	87
6.1 概述	87
6.2 灰铸铁	88
6.3 球墨铸铁	90
6.4 蠕墨铸铁	94
6.5 可锻铸铁	95
6.6 合金铸铁	96

第 7 章 有色金属及其合金 98

7.1 铝及其合金..... 98

7.2 镁及其合金 104

7.3 铜及其合金 105

7.4 其他有色金属 107

第 2 篇 热加工工艺

第 8 章 铸造..... 111

8.1 金属的铸造性能和铸造金属 111

8.2 金属材料的铸态组织与性能 113

8.3 砂型铸造工艺与特种铸造 114

8.4 轿车上铸造工艺的应用 119

8.5 铸件质量问题 122

第 9 章 压力加工..... 126

9.1 金属材料压力加工综述 126

9.2 锻造 127

9.3 冲压 131

9.4 冷镦 135

9.5 挤压 136

9.6 轧制 137

9.7 其他压力加工工艺 137

第 10 章 焊接 138

10.1 熔焊..... 138

10.2 压焊..... 141

10.3 钎焊..... 144

10.4 不同材料焊接方法的选择..... 144

10.5 焊接生产线..... 145

10.6 焊接质量问题..... 146

第 3 篇 高分子材料

第 11 章 高分子材料的理论基础 155

11.1 高分子材料概述..... 155

11.2 高分子化合物的合成..... 158

11.3 高分子化合物的结构..... 159

11.4 高聚物的物理状态..... 163

11.5 高聚物的重要性能..... 165

第 12 章 塑料 171

12.1 概述..... 171

12.2 常用塑料的品种、性能和用途 177

12.3 塑料的主要成型方法..... 181

12.4 塑料制品的加工..... 183

12.5 塑料在轿车上的应用..... 184

第 13 章 橡胶 188

13.1 概述..... 188

13.2 橡胶的品种、性能和一般用途 190

13.3 橡胶制品的生产..... 196

13.4 橡胶制品在轿车上的应用..... 200

第 14 章 胶粘剂 203

14.1 概述..... 203

14.2 常用胶粘剂的品种、性能和用途 206

14.3 胶粘剂在轿车上的应用..... 207

第 4 篇 陶瓷材料和复合材料

第 15 章 陶瓷材料 213

15.1 概述..... 213

15.2 常用工业陶瓷..... 215

15.3 陶瓷材料在轿车上的应用..... 217

第 16 章 玻璃 218

16.1 概述..... 218

16.2 常用玻璃制品的品种、性能和用途 220

16.3 玻璃在轿车上的应用..... 221

第 17 章 复合材料 223

17.1 概述..... 223

17.2 聚合物基复合材料..... 224

17.3 金属基复合材料..... 230

17.4 陶瓷基复合材料..... 231

17.5 复合材料在轿车上的应用..... 232

参考文献..... 235

第 1 篇 金属材料及热处理

第 1 章 金属材料的性能

一辆轿车由上万个零件组成,其中 80%左右是由金属材料制成的。用于制造轿车零件的金属材料种类很多,这就要根据零件所需要的性能和不同的金属材料所具有的性能来合理地选择。

金属材料的性能主要包括:物理性能、化学性能、工艺性能和力学性能。

1.1 物理性能

金属材料的物理性能主要包括:密度,熔点,导电性,导热性,热膨胀性和磁性。

1.1.1 密度

金属的密度就是单位体积金属的质量,符号为 ρ ,单位是克每立方厘米,单位符号是 g/cm^3 。密度是金属特性之一。不同的金属材料的密度是不同的。在体积相同的情况下金属的密度越大其质量也越大。

按照密度的大小,金属可分为轻金属和重金属。密度小于 $5\text{g}/\text{cm}^3$ 的金属为轻金属;密度大于 $5\text{g}/\text{cm}^3$ 的金属为重金属。在常用金属材料中,铜的密度为 $8.96\text{g}/\text{cm}^3$,铁的密度为 $7.87\text{g}/\text{cm}^3$,属重金属;钛的密度为 $4.51\text{g}/\text{cm}^3$,铝的密度为 $2.70\text{g}/\text{cm}^3$,属轻金属。常用金属的密度见表 1-1。

密度是金属材料一个重要的物理性能。在轿车工业中,为了增加有效载质量,钢铁占整车质量的 67%左右;而某些高速运动的零件(如活塞),要求尽量减小质量,以减小其惯性力,宜采用强度较高、密度较小的金属材料(如铝合金)来制造。

表 1-1 常用金属的密度(20℃)

金属元素	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	金属元素	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	金属元素	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Mg	1.74	Fe	7.87	Nb	8.57
Al	2.70	Co	8.90	Mo	10.22
Ti	4.51	Ni	8.90	Ag	10.50
V	6.10	Cu	8.96	Sn	7.31
Cr	7.20	Zn	7.13	W	19.30
Mn	7.43	Zr	6.53	Pb	11.35

1.1.2 熔点

金属或合金在加热过程中由固体熔化为液体的温度称为熔点,常以摄氏度(℃)来表示。每

种金属都有自己的熔点,而合金的熔点为一个温度范围。

在常用金属材料中钨的熔点最高,锡、铅等金属熔点较低。金属的选材和制造与熔点密切相关,例如金属的铸造温度、熔焊温度都必须高于它的熔点,热处理的温度必须低于其熔点;熔点低的铅、锡可以制造保险丝等,熔点高的钨、钼则用于制造灯丝、加热元件、耐高温零件等。常用金属的熔点见表 1-2。

表 1-2 常用金属的熔点

金属元素	熔点/℃	金属元素	熔点/℃	金属元素	熔点/℃
Mg	650	Fe	1538	Nb	2467
Al	660	Co	1495	Mo	2620
Ti	1670	Ni	1453	Ag	961
V	1900	Cu	1084	Sn	232
Cr	1860	Zn	419.5	W	3400
Mn	1244	Zr	1852	Pb	327.5

1.1.3 导电性

金属能够传导电流的性能称为导电性。衡量金属导电性的指标是电导率和电阻率。电阻率的倒数为电导率。电导率以符号 σ 表示,单位符号为 $1/(\Omega \cdot \text{cm})$ 。电阻率亦称电阻系数,以符号 ρ 表示,单位符号为 $\Omega \cdot \text{cm}$ 。

所有金属都是导体,其中以银的导电性最好,其次是铜和铝,并且铜、铝价格较低,因此常用铜、铝作导线。合金的导电性比纯金属差,某些合金如镍-铬合金、铁-铬-铝合金具有很高的电阻率,常用于制作轿车仪表中的电阻元件。

电阻率是随温度的改变而改变的,在一定温度下,导体的电阻率越小,则其电导率越大,即其导电性能越强。表 1-3 为常用金属的电阻率。

表 1-3 常用金属的电阻率(20℃)

金属元素	$\rho/10^{-6}\Omega \cdot \text{cm}$	金属元素	$\rho/10^{-6}\Omega \cdot \text{cm}$	金属元素	$\rho/10^{-6}\Omega \cdot \text{cm}$
Mg	3.90	Fe	9.71	Nb	14.5
Al	2.69	Co	6.24	Mo	5.7
Ti	55	Ni	6.844	Ag	1.6
V	26	Cu	1.673	Sn	12.8
Cr	12.90	Zn	5.916	W	5.5
Mn	185 (23~100℃)	Zr	44.6	Pb	20.648

1.1.4 导热性

金属传导热的性能称为导热性,一般用热导率(或称导热系数) λ 来衡量金属导热性的好坏。导热系数的单位是瓦特每米开(尔文),单位符号是 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。导热系数大的金属材料,其导热性能良好。金属中银的导热性最好,铜和铝次之。纯金属的导热性比合金的好。导热性

好并具有较好耐蚀性的材料如铝等常用来制造轿车的热交换器和散热器中的零件。

导热性是金属材料的重要性能之一,对热加工具有十分重要的意义,在进行焊接、铸造、锻造和热处理时,必须掌握金属材料的导热性。对于导热性差的金属材料,如合金钢,尤其是高合金钢,应采取适当的措施,避免急剧的加热或冷却,以防止金属材料产生过大的热应力而引起金属材料的变形或破裂。表 1-4 列出了常用金属的导热系数。

表 1-4 常用金属的导热系数(20℃)

金属元素	$\lambda/10^2W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	金属元素	$\lambda/10^2W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	金属元素	$\lambda/10^2W \cdot (m \cdot K)^{-1}$
Mg	1.56	Fe	0.803	Nb	0.53
Al	2.37	Co	0.69	Mo	1.38
Ti	0.22	Ni	0.905	Ag	4.27
V	0.60	Cu	3.98	Sn	0.67
Cr	0.91	Zn	1.21	W	1.78
Mn	0.0119 (-192℃)	Zr	0.227	Pb	0.352

1.1.5 热膨胀性

金属在温度升高时体积胀大的现象称为热膨胀性,通常以线膨胀系数 α 表示。 α 是指在指定温度范围内,每当温度升降 1℃,其单位长度膨胀收缩的长度。线膨胀系数的单位符号是 1/℃ 或 1/K。常用金属的线膨胀系数见表 1-5。

热膨胀性也是金属材料的一个重要特性。例如,一些精密的测量工具,像千分尺、块规等,为了保持其高度的准确性,就要用线膨胀系数很小的金属来制造。异种金属焊接时,就要考虑它们的热膨胀系数是否接近,以免因热膨胀量不等而使零件变形甚至损坏。例如:在铸造轿车零件时,为了确保零件尺寸,减少和避免缩孔及疏松等铸造缺陷,必须考虑体积收缩可能引起开裂而采取一定的措施;活塞在缸套间上下运动以及转动轴与轴承间的配合,也要用线膨胀系数值来控制其间隙尺寸。

表 1-5 常用金属的线膨胀系数(100~500K)

金属元素	$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	金属元素	$\alpha/10^{-6}K^{-1}$	金属元素	$\alpha/10^{-6}K^{-1}$
Mg	15~29	Fe	6~14.5	Nb	5~7.5
Al	12.5~27	Co	12~13	Mo	3~5.5
Ti	4.4~9.8	Ni	6.5~15.5	Ag	14.3~20.6
V	4~8 (300~500K)	Cu	10.5~18	Sn	15.5~27.5
Cr	3.5~9.5	Zn	23~32	W	2.7~4.6
Mn	11.5~28	Zr	3.9~6.2	Pb	25~32

1.1.6 磁性

金属能被磁场吸引或磁化的性能称为磁性,不同金属被磁场吸引和磁化的性质不同,这种

区别可用磁导率(或称导磁系数) μ 来反映, μ 的单位是亨利每米,单位符号是H/m。 μ 大于1的材料为顺磁材料,即在外加磁场中只能被微弱地磁化的材料,如铬、锰、铝、钨等。 μ 特别大的材料为铁磁材料,即在外加磁场中能被强烈磁化的材料,如铁、钴、镍等。 μ 小于1的材料为逆磁材料,即能抵抗或削弱外加磁场磁化作用的材料,如铜、铅、锌、锡、钛、铍等。

对于某些金属来说,磁性不是固定不变的,当加热到某一温度时,其磁性消失,这个温度叫居里点,如铁的居里点为770℃。

磁性是电器、电机、仪表制造中选用金属材料的重要依据之一。例如,变压器、电机、测量仪表等用硅钢片制造,就是利用了材料的磁性。仪表壳等要求不易磁化或能避免电磁场干扰的零件,要用铜、铝等无磁性金属材料制造。

1.2 化学性能

化学性能主要是指金属材料在室温或高温条件下抵抗氧气和腐蚀性介质对其化学侵蚀的能力,一般包括耐腐蚀性、抗氧化性和化学稳定性。

1.2.1 耐腐蚀性

金属抵抗各种介质(如大气、水蒸气、有害气体、酸、碱、盐等)侵蚀的能力,称为金属的耐腐蚀性能。钢铁在潮湿的空气中生锈是最常见的腐蚀现象。一般人们采用改变金属材料成分和采用各种表面处理方法(如油漆、电镀等)来增强金属材料的耐腐蚀性。

腐蚀对金属材料的危害很大,不仅使金属材料本身受到损失,严重时还会使轿车零部件遭到破坏。因此提高金属材料的耐腐蚀性能,可以减少金属消耗,延长材料使用寿命,具有重大的经济意义。

1.2.2 抗氧化性

金属材料在高温下抵抗氧气氧化作用的能力,称为金属的抗氧化性。

金属在铸造、锻造、焊接、热处理等热加工过程中,为了避免发生氧化、造成材料的损耗和各种缺陷,常在坯件或金属材料周围制造一种还原气氛或保护气氛。

在高温下工作的轿车零部件,如发动机的气门、内燃机的零件,必须采用抗氧化性好的材料来制造。

1.2.3 化学稳定性

化学稳定性是金属材料耐腐蚀性和抗氧化性的综合能力。金属材料在高温下的化学稳定性叫热稳定性。如轿车发动机的气门在高温下工作就要求具有良好的热稳定性,否则气门表面很快被氧化腐蚀而剥落。所以,在高温下工作的零件的材料要有良好的热稳定性。

1.3 工艺性能

金属材料必须经过不同形式的加工才能成为各种零件或构件,如轿车的气缸是铸造的,齿轮要经过多种切削加工,轿车的壳体是冲压成形的等。金属材料在各种冷热加工过程中所表现

出来的性能,称为工艺性能。工艺性能包括铸造性能、锻压性、焊接性、热处理工艺性、可加工性和冲压成形性等。

1.3.1 铸造性能

铸造俗称翻砂,金属材料可以通过铸造制成各种形状的零件,轿车上的曲轴、凸轮轴、转向器壳体、摇臂、气缸套等均由铸造而成。

铸造性能主要包括液态金属的流动性、凝固过程的收缩率、吸气性和偏析倾向等。流动性是指液态金属充满铸型的能力,流动性越好,越易铸造出细薄精致的铸件。收缩性是指铸件凝固时体积收缩的程度,收缩率越小,铸件凝固时变形越小。吸气性是指液态金属从型砂或空气中吸收气体的能力,吸气性大的铸件容易产生气孔等缺陷。偏析是指化学成分不均匀,偏析越严重,铸件各部位的性能越不均匀,铸件的可靠性越小。

在设计铸件时,必须考虑合金的铸造性能。铸铁具有优良的流动性、较小的收缩性和很小的偏析。钢的流动性比铸铁差,它的收缩和偏析都比铸铁大,因而其铸造性能比铸铁差。

1.3.2 锻压性

金属材料的锻压性是指在经受压力加工(如锤锻、轧制、拉拔、挤压等)时,能改变形状而不产生裂纹的性能。钢具有良好的锻压性,而铸铁几乎不可锻压,在承受压力加工时会发生破裂。

钢的锻压性与其成分有很大的关系,低碳钢、低合金钢比高碳钢、高合金钢的锻压性好。硫、磷含量高的钢的锻压性差。

锻压性与温度有很大的关系,钢材在锻压、轧制时,必须控制锻、轧温度。

1.3.3 焊接性

金属材料的焊接性是指其适应常用的焊接方法和焊接工艺的能力。焊接性好的材料焊接时不易形成裂缝、气孔、夹渣等缺陷,焊接后接头强度与母材相近。

低碳钢焊接性好,焊接时不需采取特殊的工艺措施就能获得良好的焊接接头。中碳钢含碳量高,焊接性差,主要问题是近焊缝区易产生淬硬组织和冷裂缝。高碳钢和铸铁等焊接性更差,不宜作为焊接件。故焊接时要根据不同的材料,采取不同的工艺措施,以获得高质量的焊件。

1.3.4 热处理工艺性

金属材料在热处理过程中所呈现的性能称为热处理工艺性,包括淬硬性、淬透性、淬火变形、表面氧化及脱碳、晶粒长大趋势、回火脆性等。各种材料的热处理工艺性是不同的,在热处理中必须分别对待,采用不同的热处理方法以免产生热处理缺陷。详细内容将在各种材料的热处理部分叙述。

1.3.5 可加工性

金属材料的可加工性是指金属在切削加工时的难易程度。它很难用一个指标来评定,但可用刀具寿命、切削后工作表面状况及切屑排除难易程度等指标来评价。凡使刀具寿命长、加工后表面粗糙度降低、排屑出屑容易和切削量大的金属,其可加工性就好,反之就差。

影响可加工性的因素很多,如材料的成分、组织、硬度、强度、塑性、韧性、导热性、加工硬化

程度及热处理工艺等。具有良好切削性能的金属,必须有合适的硬度(一般希望将 HB 控制在 170~230 之间)和足够的脆性。可加工性好的材料可减少刀具磨损,降低刀具刃部受热的温度,使切削速度提高,并且可提高工件表面光洁度。

1.3.6 冲压成形性

轿车壳体是用冲压的方法制成的,用于冲压的金属材料必须具有较好的冲压成形性。

检验金属材料冲压成形性的方法叫杯突试验。它是用规定的钢球或球形冲头,顶压夹紧在压模内的试样,直至产生第一个裂纹为止,这时的压入深度叫杯突深度。杯突深度不小于规定时,就认为试验合格。材料能承受的杯突深度越大,则冲压成形性越好。

1.4 力学性能

轿车是用不同的材料制成各种各样的零部件后组装而成的。材料的力学性能是设计和制造轿车零件的重要依据,也是控制质量的重要参数。轿车零部件在使用过程中,往往会受到各种外力的作用,如柴油机上的连杆在工作时不仅受拉力、压力的作用,还要承受冲击力的作用。这些外力作用对金属材料有一定的破坏性,这就要求金属材料必须具有一种抵抗外力作用而不致被破坏的能力,这就是金属材料的力学性能。

金属的力学性能主要有弹性、强度、硬度、塑性和韧性等。这些性能指标一般都是按规定把金属材料制成一定形状和尺寸的标准试样,在专门的试验机上通过试验来测定的。这些试验中最常用的是静拉伸试验、硬度试验和冲击试验等。

1.4.1 强度指标

所谓强度是指物体在外力作用下抵抗产生塑性变形和断裂的特性。根据受力情况的特点,可以把载荷分为压缩、拉伸、扭转、剪切和弯曲等,如图 1-1 所示。故强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗剪切强度、抗扭转强度、抗弯曲强度等。强度是通过试验的方法测定的,因其变形的形式不同,测定的试验方法也不同,现以用低碳钢试样的静拉伸试验来测定抗拉强度为例说明之。

拉伸试验所用试样的形状与尺寸符号如图 1-2(a)所示。试样两端加一缓慢增加的外力(拉伸载荷),观察施加载荷过程中试样产生伸长变形,直到试样被拉断为止的情况,便可得到如图 1-3 所示的外力 P 和变形量 Δl 的关系曲线,即低碳钢的拉伸曲线。在拉伸曲线上可以确定某些性能指标。

1. 弹性极限

从图 1-3 可以看出, O_e 段是直线。拉伸试验的这一阶段,试棒变形量 Δl 与外力 P 成正比。当外力去除后,试棒便恢复到原来尺寸,这一阶段的变形为弹性变形。产生弹性变形时所能承受的最大应力叫弹性极限,用 σ_e 表示,即

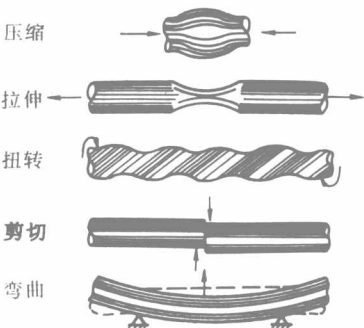


图 1-1 金属材料在受载荷时的变形分类