

爆破地震效应

张雪亮 黄树棠 编著

地震出版社

爆破地震效应

张雪亮 黄树棠 著

地震出版社

1981

内 容 简 介

本书主要根据爆破地震效应的实测、试验和理论研究的成果,着重阐述了预测爆破地震动的震级、强度、安全距离,微差爆破降震效果的计算方法和建筑物破坏的定量烈度工程标准,并提出了建筑物抗爆破地震的设计方法。此外,还简要地介绍了爆破地震效应的研究概况、爆破地震波的基本原理、爆破振动观测仪器、爆破振动测试技术和爆破震动的分析方法等。

本书可供从事采矿、土木、水利、道路、爆破工程和工程抗震等有关的工程技术人员、大专院校师生和科学研究工作者参考。

爆破地震效应

张雪亮 黄树棠 著

地震出版社出版

北京复兴路63号

人民铁道印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

850×1168 1/32 7 $\frac{1}{2}$ 印张199千字

1981年6月第一版 1981年6月第一次印刷

印数: 0001—3,000

统一书号: 13180·104 定价: 1.00元

序 言

爆破工程引起的爆破地震效应是爆炸公害中最重要的研究课题之一。随着爆破技术的广泛应用，它渐为人们所关注。我国自解放以来，对这一问题的研究工作日益重视，各部门结合爆破工程，进行了爆破地震动的实测、试验和理论研究工作，取得了不少成果。可是这一问题比较复杂，影响的因素又多，因此，国内外研究者建议采用的预测爆破地震动强度的经验公式和建筑物破坏的定量烈度工程标准，其差异都是很大的，这就给具体应用带来了许多困难。为便于工程技术人员根据爆破工程的特点，合理地选取和应用已有的研究成果，本书比较详细地介绍了爆破地震效应的一些实测数据和计算方法。为推动这一工作的进展，有助于积累更多的爆破震动的实测数据，广泛开展试验和理论研究工作，本书还概要地介绍了爆破震动观测仪器、试验技术和爆破振动分析方法，并对存在的一些问题进行了初步的探讨，以期引起广泛的深入研究。

本书是在江苏省地震局大力支持下完成的。本书的第一、二、四、五、六章由张雪亮撰写，第三章由黄树棠撰写。参加爆破震动实测工作的主要有黄树棠、张雪亮、卜宁安、严建武、朱祥健等。计算工作主要由张雪亮完成，严新育参加了部分工作。高德潜参加了计算结果和实测数据的整理分析工作。

在本书编写过程中，得到中国科学院工程力学研究所彭克中、杜端明、郭玉学和河北省黄壁庄水库任增云同志的帮助；初稿完成后，又承国家地震局徐宗和同志提出了宝贵意见，特此致谢。

由于书中涉及的面较广，有些问题还有待于在实际工作中进一步探索、充实和完善。书中的不足之处，热诚希望读者指正。

作者 1980年4月

目 录

第一章	爆破地震效应的研究概况	(1)
第二章	爆破地震波	(6)
第一节	应力与应变	(6)
第二节	波动方程	(15)
第三节	地震波的类型	(19)
第四节	地震波的传播	(25)
第三章	爆破振动测量仪器与测试技术	(31)
第一节	爆破振动测量仪器的基本技术要求	(31)
第二节	爆破振动测量仪器的概述	(32)
第三节	爆破振动测量仪器	(43)
第四节	测点布置	(53)
第五节	测试场地选择	(54)
第六节	拾振器的安装和定位	(55)
第七节	信号线的架设	(57)
第八节	仪器灵敏度的调试和记录线道的排列	(58)
第九节	仪器灵敏度的测定	(63)
第十节	仪器的供电和通讯联系	(70)
第四章	爆破振动分析	(72)
第一节	爆破震动图的特征	(73)
第二节	爆破震动记录的直观分析方法	(76)
第三节	爆破震动记录的数字化	(85)
第四节	爆破震动记录的零线调整和校正	(88)
第五节	爆破震动强度的物理量之间的换算	(98)
第六节	爆破震动的富里哀谱	(103)

第七节	爆破地震动的反应谱·····	(114)
第八节	反应谱和富里哀谱之间的关系·····	(133)
第五章	爆破地震效应及其降震计算方法·····	(139)
第一节	爆破地震震级的计算方法·····	(140)
第二节	爆破地震的烈度·····	(145)
第三节	爆破地震动的工程参数·····	(150)
第四节	爆破地震动强度的预测·····	(157)
第五节	建筑物和井下巷道工程爆破地震破坏的 烈度工程标准·····	(181)
第六节	爆破地震的安全距离·····	(189)
第七节	微差爆破降低地震效应的计算方法·····	(199)
第八节	预裂爆破的降震效果·····	(207)
第九节	土质条件和地形对地震效应的影响·····	(207)
第六章	抗爆破地震的设计·····	(212)
第一节	爆破地震反应谱和地震反应谱·····	(212)
第二节	爆破地震富里哀谱和地震富里哀谱·····	(218)
第三节	建筑物对爆破地震动的影响·····	(220)
第四节	抗爆破地震的设计·····	(222)
第五节	抗爆破地震建筑的设计反应谱·····	(227)
第六节	爆破模拟等价于天然地震方法的探讨·····	(233)

第一章 爆破地震效应的研究概况

黑火药是我国古代四大发明之一。唐代医学家孙思邈（公元581—682年）在他著的《丹经内伏硫磺法》一书中，最早记载了制火药的方法。在唐（公元618—907年）末以后的相当一段历史时期内，黑火药主要用于军事，在爆破工程中应用不多。

黑火药和火药武器于公元1225年以后从我国传入伊斯兰教国家，在13世纪后期再传到欧洲。1867年A. B. 诺贝尔（Nobel, 1833—1896年）用硝化甘油制成代拿买特（Dynamite）和爆胶，并使之安全而成功地爆轰。这些炸药的威力比黑火药大得多，能爆破最坚硬的岩石，这样就提供了新的更有威力的爆破动力。因此，这一发明同发明黑火药一样，也具有划时代的意义。随着化学工业的发展，先后出现各种新品种炸药，加之爆破技术的发展，给爆破工程的发展开辟了广阔的前景。目前，在开矿、采石、筑坝、修路、建筑物和构筑物的拆除等方面，已经广泛地应用了爆破技术。爆破工程已成为爆炸力学中的一个分支学科——爆破工程学。

我国在解放后，爆破工程的应用发展得很快，例如在矿山剥离大爆破中，已能进行千吨到万吨级的爆破，而在定向爆破中早已能完成千吨级的工程；在光面爆破、预裂爆破、建筑物和构筑物拆除的控制爆破、矿山开采、筑坝、修筑铁路、人防、城市道路开拓等工程中，微差爆破等技术已被掌握和广泛应用。但是，爆破工程的系统理论研究不多。

爆破时炸药的一小部分能量转换为地震波，从爆源以波的形式向外传播，经过介质而达到地表，引起地表的震动。这种地震动的强度，随着爆心距的增加而减弱。在爆区的一定范围内，当地震动达到一定的强度时，会引起地表和建筑物、构筑物不同程

度的破坏。这种爆破地震动引起的各种现象及其后果，称为爆破地震效应。爆破地震波的破坏作用是爆炸公害中最重要的问题之一，已日益引起人们的关注。这个问题不是单纯的力学问题，它和地学密切相关，属于爆破地震工程学的研究范畴。

爆破地震波在岩石介质中的传播理论，各国研究工作者从本世纪二十年代起就进行了一些工作，尤其是从五十年代起，随着地下核试验的开展和核防护工程的修建以及工业爆破工程中炸药量的增大，进行了一系列的理论计算和试验研究，取得了较大进展。但由于波在土壤和岩石介质中的传播比空气中复杂得多，而且土和岩石的力学参数测定也比空气要困难得多，因此仍有一些问题尚待解决。

爆破地震效应主要研究爆破引起的地面运动变化规律及其震动强度对建筑物的影响等等。研究的主要目的在于选择适宜的爆破方式和药量，使得爆破的效果最佳，而由此引起的爆破地震动的强度，将不危及建筑物、构筑物的安全和边坡的稳定，以及需要保护的工程设施等。要研究解决这一问题，首先需要寻找一个物理量，这个物理量既能用来描述地震动的变化规律，与爆源药量的大小、爆心距有很好的相关性，建立正确的互换关系；又可用来说明建筑物或构筑物的不同程度的破坏特征，即能很好地表征爆破地震震害的特征。在寻找这个物理量的过程中，各国研究工作者是有不同选择的。在爆破地震工程中，目前广泛采用的是地震动的最大加速度和最大速度，较少采用地震动的最大位移、谱烈度和能量比等。在最大加速度和最大速度中，究竟采用哪一个更好呢？不同的学者有不同看法。有的认为对建筑物的破坏起重要作用的是质点速度，采用速度的优点是地震波所携带的能通量与所产生的地应力、结构中产生的动能和内应力相联系；有的认为是质点加速度，采用加速度的优点是和爆破地震产生的惯性力相联系，便于换算爆破地震荷载及进行建筑物的应力分析。地震动观测资料分析表明，采用加速度或是速度，作为爆破地震的工程

烈度定量标准都是比较合适的。目前中国科学院工程力学研究所和江苏省地震局等地震部门采用的是加速度峰值，冶金、铁道和水利等部门采用的是速度峰值。

在爆破地震效应的研究中，国内外大多采用爆破地震烈度工程标准来评定建筑物的破坏程度，这个方法一般从两方面着手：一方面建立描述地震动强度随药量、炸药埋藏深度、爆源介质的地球物理参数、传播途径、局部地质条件和爆心距等因数变化的数学物理方程式。在这些因素中，影响地震动的主要因素是爆心距和药量。地震动强度随爆心距的增加而减小，随药量增加而增强，据此建立了地震动强度同爆心距和药量三者之间关系的经验公式。另一方面，应用仪器观测不同震害程度的建筑物或构筑物在其邻近地面所对应的最大加速度或最大速度值，根据这些资料分析，确定建筑物或构筑物遭受爆破地震破坏的定量烈度工程标准。应用这一方法，先从预测地震动强度的经验公式中，推算建筑物或构筑物邻近地面的最大加速度或最大速度值，然后用这个值与建筑物的破坏的定量烈度工程标准相比较，当超过破坏标准时，建筑物或构筑物就会有不同程度的破坏。因此就要控制设计药量，使建筑物或构筑物邻近地面的最大加速度值或最大速度值在这一破坏标准值以下。这个方法在一定程度上能大致反映某一类建筑物或构筑物在爆破地震动作用下动力反应的特征。在苏联的爆破规程中，采用爆破地震危险区半径和药量间的经验公式，当建筑物或构筑物所在的位置在危险半径以外，则是安全的。这种方法不能反映爆破地震动对于各类建筑物具有不同反映的特征，所以不如采用前一种方法。但是，前一种方法在具体应用中存在一些困难：

一、预测地震动强度的经验公式中，与场地有关的系数变化很大，所以在选用这些系数时要特别谨慎。用加速度来衡量地震动强度时，虽然与场地有关的系数变化相对小些，但由于目前试验观测数据还不多，实用时也有困难。

二、各国研究工作者按各自的观测数据建议的建筑物爆破地震破坏的定量烈度工程标准差异很大，而且仅限于一般建筑物，因而在应用这些数据前，先要了解这些破坏标准是在什么特定条件下得到的。

震害和爆破地震动的观测资料分析表明，建筑物的受震破坏不但取决于地震动的幅值，而且还与地震动频谱和持续时间有关，另外，建筑物的动力特征也起着重要的作用。建筑物的形式、构造和施工质量是千变万化、随地而异的，尤其是建筑技术在不断发展，建筑物在不断更新，所以采用建筑物附近地面震动幅值峰值作为建筑物爆破地震破坏的定量烈度工程标准，是不能全面反映建筑物的抗爆破地震性能的。一个较为合理的方法是把地震动幅值、频谱和持续时间都纳入定量烈度工程标准中去。这样做是很理想的，但也有困难。这是因为震害不仅取决于地面运动的特征，而且决定于建筑物的动力特征，单方面的地面运动参数是无法完全决定震害现象的；再则，虽然震害受地面运动的幅值、频谱和持续时间三因素的影响，但各因素影响的大小随建筑物的动力特性而异，随建筑物的破坏程度而异，所以无法在这些因素与建筑物震害之间建立固定的函数关系。

爆破时，震源位置、药量大小、爆破方式、传播途径的介质和局部场地条件等等以及由这些因素引起的地震动对建筑物的反应，都可以按需要进行控制，这就给研究爆破地震效应创造了极为有利的条件，可以直接从震源机制和传播介质出发，确定爆破地震效应的合理计算方法。但由于目前观测数据还不够多，研究还不够深入，要建立这样一个合理的计算方法还有一定的困难。当前，确定爆破地震效应可以从两方面进行：一是沿用现行的方法；二是加强爆破地震动的试验研究和理论分析，在抗爆破地震的建筑设计中逐步考虑地震动各种参数的影响，如可将反应谱理论应用于抗爆破地震的设计。为便于实际应用，应该考虑地震动频谱随药量大小、爆心距和土质条件而改变的特征，预先规定

供抗爆破地震建筑的设计反应谱。建筑物基底的最大加速度可以由预测地震动强度的经验公式得到，应用反应谱理论就可得到建筑物沿高度分布的爆破地震力，可以进行建筑物的强度和稳定的验算，从而进行建筑物抗爆破地震的设计或安危程度的鉴定。这一方法是比较合理的。它既考虑了建筑物的动力特性，又考虑了地震动频谱的特征。虽然计算比较复杂，计算工作量也大，但是若预先通过电子数字计算机分析整理，规定了设计反应谱和相应的系数，是可以使计算简化的。如何把地震动的持续时间反映到抗爆破地震设计中去，需要建造专门的试验建筑物或者构件，进行爆破地震破坏试验研究。这方面的工作目前尚在开始阶段。在微差爆破降低地震效应的研究中，地震动持续时间也占有重要的地位。

爆破地震效应是一个比较复杂的研究课题。要建立能反映实际情况的最合理的爆破地震效应的计算方法，应直接从震源机制、传播介质的构成和性能来估计地面运动的特征，从而达到工程震害的正确预测。要解决这一问题，一方面要加强地震动观测的试验研究和理论分析工作，研究爆源岩石的破裂力学过程、高频爆破地震波在非均匀和非弹性介质中的传播规律以及建筑物在爆破地震波作用下破坏的机理等等，另一方面更需要设计并研制便于爆破震动观测和分析的仪器。

第二章 爆破地震波

炸药在岩石或土中爆炸时，炸药的大部分能量转变成冲击波和气体的膨胀力，冲击波使坚硬的物体呈现裂缝，气体的膨胀使这些裂缝扩大，最后物体被成块地破碎和抛掷出去，其中小部分能量转变为地震波，以波的形式从爆源向各个方向传播，使地面引起颠簸和摇晃。离爆源越近，这种地面运动的震动强度越高，反之，强度就越低。当震动强度超过一定程度时，就会造成建筑物的破坏。为了了解和分析爆破振动和爆破地震波的破坏作用，下面简要介绍有关弹性体的应力和应变关系以及固体介质中弹性波的类型、成因和传播的基本原理。

第一节 应力与应变

(一) 应力

假如有一平衡物体，在外力 P_1 、 P_2 、 $\dots$ 、 P_7 的作用下，物体各部分之间将发生内力。为研究任一点 o 处的内力大小，可假想通过 o 点的截面 mn ，将物体截断成A和B两部分，物体截断后，A和B两部分维持平衡。对于A来说，如图2.1 a所示，它在外力 P_5 、 P_6 、 P_7 和分布在截面 mn 上的内力作用下维持平衡，而这些内力代表由B部分材料对A部分材料的作用。在A部分截面的微小面积 ΔS 上任一点 o ，可以用应力矢量 F_N 来表示作用在法向是 n 的微元平面上的单位面积力。若单元面积 ΔS 无限缩小，则就是作用在截面 mn 上 o 点处的应力矢量。在直角坐标中， F_N 可以分解成 X_N 、 Y_N 、 Z_N 三个分量，其中 X 、 Y 、 Z 表示应力矢量的分量方向， N 表示 ΔS 面的法线方向。

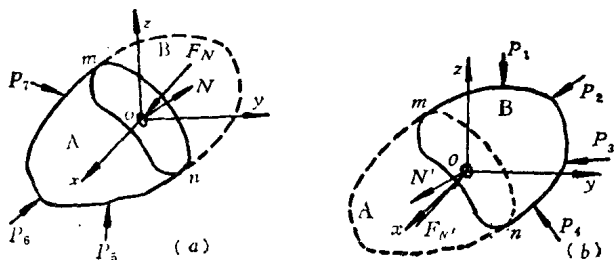


图2.1 平衡物体

同理，由图2.1b所示，在B部分同一点o的向外法线是 N' ，它与 N 的方向相反，应力矢量为 $F_{N'}$ ，和 F_N 的大小相等，即

$$F_N = -F_{N'}.$$

用 σ 表示法向应力， τ 表示剪应力。为了表明应力作用面的方向，这些字母须再加上脚码，在 σ 下面的指示符号表示作用的平面；而在 τ 下面的指示符号的第一个字表示作用的平面，第二个字代表应力分量的方向。图2.1中，在o点取微小的单元正方体，使其各棱边与所选择的坐标轴平行，则作用在单元体

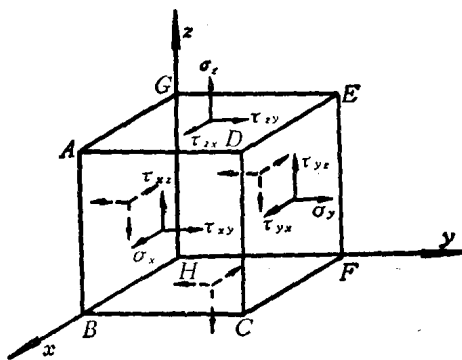


图2.2 单元体的应力矢量

各面上的应力矢量都可用三个应力分量来表示，如图2.2所示。在 $ABCD$ 平面上的应力分量是 $(\sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz})$ ，在 $CFED$ 平面上的应力分量是 $(\tau_{yx}, \sigma_y, \tau_{yz})$ ，在 $ADEG$ 平面上的应力分量是 $(\tau_{zx}, \tau_{zy}, \sigma_z)$ 。因为物体内部各点的内力是必须平衡的，所以在上述三平面相对的平面上的应力分量各与其所对平面上的应力分量大小相等，方向相反。这样就一共引进了 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yx},$

$\tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$ 九个应力分量。根据剪应力互等定理, 则有

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}.$$

因此, 九个应力分量中就只有六个应力分量是独立的。由此可以看出, 若一点的六个应力分量 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}$ 是已知的, 则经过该点的任何平面上的应力矢量都可用这六个应力分量来确定。也可以说, 六个应力分量可足够用来描述物体内部的应力分布情况。

(二) 应变

现在来讨论弹性体的任一微小单元体 $dx dy dz$ 的微小变形情况, 如图 2.3 所示。单元体在 x 、 y 和 z 平面上的投影是三个矩形, 它们的变形可以由边的伸长缩短和两边夹角角度的变化两个方面来考虑。

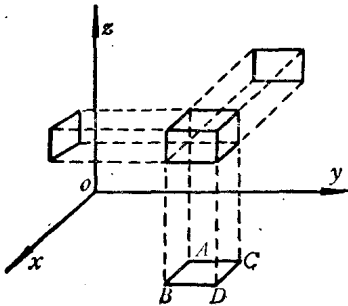


图2.3 微小单元体

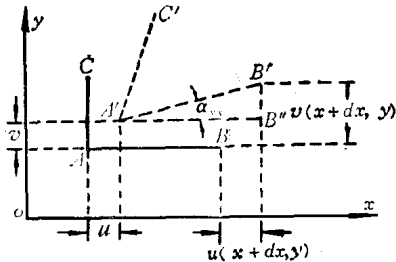


图2.4 平面变形

单元体在 oxy 平面上的投影是矩形 $ABCD$ 。由图 2.4 所示, 在变形以前, AB 和 AC 的长度各为 dx 和 dy , A, B, C 三点的坐标是:

$$A(x, y),$$

$$B(x+dx, y),$$

$$C(x, y+dy),$$

变形以后, A, B, C 变为 A', B', C' , 其坐标是:

$$A'[x+u, y+v],$$

$$B'[x+dx+u(x+dx, y), y+v(x+dx, y)],$$

$$C'[x+u(x, y+dy), y+dy+v(x, y+dy)].$$

下面的式子是用泰勒级数展开并略去含 dx 、 dy 平方以上的项后得到的:

$$u(x+dx, y) = u(x, y) + \frac{\partial u}{\partial x} dx,$$

$$v(x+dx, y) = v + \frac{\partial v}{\partial x} dx,$$

$$u(x, y+dy) = u + \frac{\partial u}{\partial y} dy,$$

$$v(x, y+dy) = v + \frac{\partial v}{\partial y} dy.$$

线段 AB 的绝对伸长度在 ox 轴上的投影为

$$\delta(dx) = A'B'' - AB = u(x+dx, y) - u(x, y) = \frac{\partial u}{\partial x} dx,$$

于是可得到 AB 在 x 方向的应变

$$e_x = \frac{\delta(dx)}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x}.$$

用同样方法可以证明与 oy 和 oz 轴平行的线段的应变分别为

$$e_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad e_z = \frac{\partial w}{\partial z}.$$

式中, 当 $e > 0$ 时, 表示线段伸长; 而当 $e < 0$ 时, 表示线段缩短。

令 α_{xy} 表示 y 向的线段向 x 轴的转动角度, α_{yx} 表示 x 向的线段向 y 轴的转动角度, 则线段 AB 和 AC 之间原来的直角 CAB 减小了角度 $\alpha_{yx} + \alpha_{xy}$, 这就是平面 yz 与 xz 之间的剪应变, 可表示为

$$\gamma_{yz} = \gamma_{xy} = \alpha_{yx} + \alpha_{xy}.$$

式中

$$\alpha_{yx} \approx \tan \alpha_{yx}$$

$$= \frac{v_{B1} - v_{B2}}{dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx}$$

$$= \frac{\frac{\partial v}{\partial x} dx}{\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) dx} = \frac{\frac{\partial v}{\partial x}}{1 + \frac{\partial u}{\partial x}}$$

当伸长度很小时, $\frac{\partial u}{\partial x}$ 和 1 相比较是一个小量, 因此可略去不计, 则有

$$\alpha_{yx} = \frac{\partial v}{\partial x}.$$

同理可得

$$\alpha_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y}.$$

由此, 便可得到剪应变为

$$\gamma_{yx} = \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}.$$

应用同样方法, 可得到

$$\gamma_{zy} = \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z};$$

$$\gamma_{zx} = \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}.$$

式中当 $\gamma > 0$ 时, 表示角度的收缩; 而当 $\gamma < 0$ 时, 表示角度的扩大。

若已知一点的六个应变分量 $e_x, e_y, e_z, \gamma_{xy} = \gamma_{yx}, \gamma_{yz} = \gamma_{zy}, \gamma_{zx} = \gamma_{xz}$, 就可以足够用来描绘该点附近各点的变形情况。

(三) 应力与应变的关系

应力和应变之间的关系可由下式表示:

$$\sigma_x = f_1(e_x, e_y, e_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}),$$

$$\sigma_y = f_2(e_x, e_y, e_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}),$$

$$\sigma_z = f_3(e_x, e_y, e_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}),$$

$$\tau_{yx} = f_4(e_x, e_y, e_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}),$$

$$\tau_{zx} = f_5(e_x, e_y, e_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}),$$

$$\tau_{xy} = f_6(e_x, e_y, e_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}).$$

假定物体不存在初应力，则当应变为零时，应力为零。当假定应变很小时，即 e 和 $\gamma \ll 1$ 时，上式可用泰勒级数展开而略去应变分量二次以上的项，可得

$$\begin{aligned} \sigma_x = & \frac{\partial f_1}{\partial e_x} de_x + \frac{\partial f_1}{\partial e_y} de_y + \frac{\partial f_1}{\partial e_z} de_z \\ & + \frac{\partial f_1}{\partial \gamma_{xy}} d\gamma_{xy} + \frac{\partial f_1}{\partial \gamma_{yz}} d\gamma_{yz} + \frac{\partial f_1}{\partial \gamma_{zx}} d\gamma_{zx}, \end{aligned}$$

.....

.....

.....

.....

.....

因此，在应变很小时，应力和应变的关系可以改写成下面的形式：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= c_{11}e_x + c_{12}e_y + c_{13}e_z + c_{14}\gamma_{yz} \\ &\quad + c_{15}\gamma_{zx} + c_{16}\gamma_{xy}, \\ \sigma_y &= c_{21}e_x + c_{22}e_y + c_{23}e_z + c_{24}\gamma_{yz} \\ &\quad + c_{25}\gamma_{zx} + c_{26}\gamma_{xy}, \\ \sigma_z &= c_{31}e_x + c_{32}e_y + c_{33}e_z + c_{34}\gamma_{yz} \\ &\quad + c_{35}\gamma_{zx} + c_{36}\gamma_{xy}, \\ \tau_{yz} &= c_{41}e_x + c_{42}e_y + c_{43}e_z + c_{44}\gamma_{yz} \\ &\quad + c_{45}\gamma_{zx} + c_{46}\gamma_{xy}, \\ \tau_{zx} &= c_{51}e_x + c_{52}e_y + c_{53}e_z + c_{54}\gamma_{yz} \\ &\quad + c_{55}\gamma_{zx} + c_{56}\gamma_{xy}, \\ \tau_{xy} &= c_{61}e_x + c_{62}e_y + c_{63}e_z + c_{64}\gamma_{yz} \\ &\quad + c_{65}\gamma_{zx} + c_{66}\gamma_{xy}. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$