

土岩爆破相似律与 爆破参数优化

陶纪南 张克利 等 编著

科学出版社

内 容 简 介

全书共分六章,前三章为理论部分,后三章为应用部分。

本书首次提出了一个全新的方法——用爆破漏斗试验确定土岩爆破最优参数,该方法不同于美国学者利文斯顿(C. W. Livingston)的爆破漏斗法。书中详尽地阐述了支撑这个方法的三个理论支柱,即土岩爆破相似律、爆破参数的规范化和爆破漏斗试验无量纲比值特征线理论。

本书具有中等以上文化水平的人就能看懂,适用于广大从事土岩爆破的工程技术人员和中专以上院校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

土岩爆破相似律与爆破参数优化/陶纪南等编著. —北京:科学出版社,1998

ISBN 7-03-006309-0

I. 土… II. 陶… III. ①岩体-爆破 相似性法则②岩体-爆破-参数-最佳化 IV. TD235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 21690 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998 年 9 月第 一 版 开本:850×1168 1/32
1998 年 9 月第 一 次印刷 印张:5 1/8
印数:1—1000 字数:127 000

定 价: 12.80 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

序

20 世纪下半叶,特别近 10 多年来,由于相似理论的建立和电子计算机技术的发展,为科学技术界创造了极大的效益。人们不再需要为了解决重大工程技术问题而耗费巨大的精力和费用,重复摸索经验,而可以通过由理论建立的模型或模拟试验,得到相当的实际效果。战争可以模拟,航天可以模拟,当然其他的工程项目也都可以模拟。

令人遗憾的是,许多重要的爆破工程还没有能成功地建立起来可行的模型或模拟方法,以达到预期的目的。这就是工程爆破技术理论与工程实际仍有较大差距,不能不依靠经验解决问题的现实状态。

陶纪南教授等人详细分析研究了影响工程爆破效果的三四十个因素。建立这样众多综合数群的模型是相当复杂和困难的。因此,他根据相似理论提出了土岩爆破的相似律,并论述了相似定理和相似准则,从而深入到了土岩爆破的核心,分别建立了土岩爆破集中和条形药包以及两种药包耦合与不耦合的爆破相似律,并进一步应用在地下采矿中深孔爆破及束状孔爆破工程中。

根据土岩爆破的不同条件,按照相似律的基本原理,分析众多的相关因素,从中找出主要的影响因素,建立工程试验的模型。为读者提供了土岩爆破模拟试验的具体方法,开启了一种科学试验的思路。这不仅可能缩短爆破理论与工程实际的距离,还为爆破理论研究工作者展现了光明的前景。

这是迄今为止所见到有关爆破模拟和模型试验研究的第一本专著,愿作介绍,供爆破界的同志们参考。

冯叔瑜

1997 年 4 月 20 日

于北京

EAC50/12

前 言

本书是在若干专题研究的基础上写成的。

全书共分六章,前三章为理论部分,后三章为应用部分。应用中也有理论阐述。熟悉相似论的读者可以绕过第一章第二节直读其它章节,本书首次提出了一个全新的方法——用爆破漏斗试验无量纲比值特征线确定土岩爆破最优参数,该法不同于美国学者利文斯顿(I. W. Livingston)的爆破漏斗法,因为支撑这个方法理论支柱是:土岩爆破相似律、爆破工程参数的规范化与爆破漏斗试验无量纲比值特征线理论。这个方法及其众多的爆破相似准则,在地下采矿的中深孔爆破和束状孔爆破中作过验证和应用,证明是基本成功的。在其他领域,例如在定向爆破方面,我们还没有这方面的实践。但是,我们相信它也会成功。不过,书中提出的逐次逼近的方法有待实践检验和完善。因此,这些都给读者留出了很大的创造余地。总之,“漏斗法”优化爆破参数还刚刚提出,要做的事情还很多。但是可以预见,由于生产实践的迫切需要,这个方法一旦和电子计算技术结合起来,将会极大地推动土岩爆破技术的迅猛发展,并创造出巨大的经济效益和社会效益。由于我们的水平有限,书中错误在所难免,请读者指正。

全书由陶纪南、张克利执笔,王树琪、许新强、张良学、张占国、郑晋峰、郭进平、石广斌等人参加了讨论或提供素材,其中石广斌还起草了§ 6.5,并和郭进平一起参加了试验、计算、校对、改错、录入等工作。中国工程院冯叔瑜院士和西安理工大学姚尧教授审阅了全书,冯院士还专为本书写了前言,在此深表谢意。

本书第二章以后内容已获国家专利,凡部分或全部引用、复制、采用书中所提出的方法及其内容者,需经专利权人同意,违者

视为侵权。

作 者

1997年4月25日

于西安

基本符号表(质量系统量纲)

W	最小抵抗线 [L]	K_{cM}	斜坡地形条状不耦合药包标准炸药单耗 [ML ⁻³]
d	炮孔直径 [L]	K_c	平坦地形集中耦合药包标准炸药单耗 [ML ⁻³]
d_b	条状药包直径 [L]	K_{sM}	平坦地形集中不耦合药包标准炸药单耗 [ML ⁻³]
D	药室直径或当量直径 [L]	K_d	斜坡地形集中耦合药包标准炸药单耗 [ML ⁻³]
D_b	集中药包直径 [L]	K_{sM}	平坦地形集中不耦合药包标准炸药单耗 [ML ⁻³]
L_f	填塞位置 [L]	S_c	条状耦合药包炸药比耗
f	相对填塞位置 ($f=L_f/d$)	S_s	集中耦合药包炸药比耗
R	爆破漏斗半径 [L]	S_{cM}	条状不耦合药包炸药比耗
N_{rd}	径向不耦合系数	S_{sM}	集中不耦合药包炸药比耗
N_{ax}	轴向不耦合系数	\vec{r}_w	最小抵抗线矢径
M	空腔比	n_c	条状耦合药包爆破作用指数
v_b	炸药爆速 [LT ⁻¹]	n_s	集中耦合药包爆破作用指数
v_R	土岩纵波波速 [LT ⁻¹]	$\varphi(n_c)$	条状药包爆破作用指数函数
ρ_b	装药密度 [ML ⁻³]	$f(n_s)$	集中药包爆破作用指数函数
ρ_R	土岩密度 [ML ⁻³]	β_c	条状药包压缩体积修正系数
q	耦合药包每米装药量 [ML ⁻¹]	β_s	集中药包压缩体积修正系数
q_l	径向不耦合药包线装药密度 [ML ⁻¹]	β_d	斜坡牵拉体修正系数
q_d	径向与轴向均不耦合药包线装药集中度 [ML ⁻¹]	η	破坏系数
κ	土岩爆破统计炸药单耗	m_s	介质压缩系数
K_c	平坦地形条状耦合药包标准炸药单耗 [ML ⁻³]	m	密集系数
K_{cM}	平坦地形条状不耦合药包标准炸药单耗 [ML ⁻³]	m_r	列密集系数
K_{cR}	竖直柱状耦合药包标准炸药单耗	m_i	行密集系数
K_d	斜坡地形条状耦合药包标准炸药单耗 [ML ⁻³]		

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1.1 土岩爆破相似律的研究现状	1
§ 1.1.1 土岩爆破相似律的发展概况	1
§ 1.1.2 研究土岩爆破相似律的实际意义	4
§ 1.2 现象相似的一般原理	6
§ 1.2.1 相似三定理	6
§ 1.2.2 准则方程与模型试验	11
第二章 土岩爆破条状药包爆破相似律	29
§ 2.1 条状药包的参数选取	29
§ 2.1.1 影响土岩爆破效果的主要因素分析	29
§ 2.1.2 影响因素的量化	30
§ 2.2 条状耦合药包的爆破相似准则	34
§ 2.2.1 条状耦合药包的基本计算公式	34
§ 2.2.2 条状耦合药包爆破几何相似准则	38
§ 2.2.3 完全相似	44
§ 2.2.4 几何不相似准则	44
§ 2.2.5 条状耦合药包爆破相似准则的试验验证	47
§ 2.3 条状不耦合药包爆破相似准则	51
§ 2.3.1 条状不耦合药包装药结构的规范化形式	51
§ 2.3.2 条状不耦合药包装药结构的基本参数选择	52
§ 2.3.3 条状不耦合药包装药结构参数的规范化形式	52
§ 2.3.4 条状不耦合药包爆破的几何相似准则	55
§ 2.4 条状药包的畸变预测	60
第三章 土岩爆破集中药包爆破相似律	62
§ 3.1 集中耦合药包的爆破相似律	62
§ 3.1.1 平坦地形集中耦合药包药量计算	62

§ 3.1.2	斜坡地形集中耦合药包药量计算公式	64
§ 3.1.3	集中耦合药包爆破相似准则	65
§ 3.2	集中不耦合药包爆破相似律	70
§ 3.2.1	平坦地形集中不耦合药包爆破相似准则	70
§ 3.2.2	斜坡地形集中不耦合药包爆破相似准则	72
§ 3.2.3	集中不耦合药包爆破相似准则的其它形式	73
§ 3.3	集中药包爆破的畸变预测	74
第四章	柱状耦合药包孔网参数优化	76
§ 4.1	介质爆破漏斗试验的比值特征线图	76
§ 4.1.1	$\hat{R}-\hat{W}$ 图的性质与特征	76
§ 4.1.2	$\hat{R}-\hat{W}$ 图的应用	77
§ 4.2	孔网参数的规范化形式	82
§ 4.3	孔网参数优化试验	84
§ 4.4	爆破排面方位选择	88
§ 4.4.1	被结构面损伤的岩体爆破排面方位选择的理论依据	88
§ 4.4.2	寻找配套结构面,选择爆破排面	90
第五章	不耦合药包爆破参数优化	98
§ 5.1	光面爆破和预裂爆破参数优化	98
§ 5.2	定向爆破参数优化	102
§ 5.2.1	爆破方案选择和药包摆布	102
§ 5.2.2	药包设计参数的选择	107
§ 5.2.3	定向爆破小比例漏斗试验	115
第六章	爆破相似律在束状孔爆破中的应用	126
§ 6.1	束状孔落矿工艺特点	126
§ 6.1.1	束状孔落矿的基本工艺	126
§ 6.1.2	采场布置和结构参数	128
§ 6.2	束内孔布置的平面几何形状	130
§ 6.2.1	束内孔平面几何形状对爆破效果的影响	130
§ 6.2.2	半圆形布孔的几何特征参数	131
§ 6.3	束状孔的当量大孔	132

§ 6.3.1	束状孔当量大孔的修正系数	132
§ 6.3.2	修正系数 β 的试验结果	134
§ 6.4	束状孔孔网参数设计	135
§ 6.4.1	束状孔抵抗线的确定	135
§ 6.4.2	束状孔孔网设计	137
§ 6.5	采场回采设计实例	140
§ 6.5.1	采场基本情况	140
§ 6.5.2	回采中的几项关键技术	141
§ 6.5.3	回采爆破设计	143
附录 A	土岩爆破相似准则	146
附录 B	各种爆破的参数规范化形式	148
附录 C	岩石的力学指标和相关矩阵	150
参考文献		152

第一章 绪 论

§ 1.1 土岩爆破相似律的研究现状

土岩爆破相似律是个既古老而又年轻的课题,早在 1955 年 Brobeg^[1]就涉足了这个领域,指出爆破漏斗体积与药包体积成正比。但是 40 年来,这个问题的进展和其它学科相比却十分缓慢,在很多方面还几乎是一片空白,国内外学者在这一领域的论著寥寥无几。究其原因,可能是这个问题过于简单不值得研究;也可能是土岩爆破涉及的因素太多、太复杂而无法下手。爆破技术近几十年有了长足的进展,它完全可以解决在生产建设所遇到的各种工程爆破难题。但是,在理论上,连单个药包平地爆破的作用机理都还难做准确的定量分析,爆破理论严重落后于生产实践。工程爆破,实际上还停留在唯象学的水平上,解决工程问题主要凭个人的实践经验,从而严重阻碍了学科的发展,自然也就影响了土岩爆破相似律研究的进展。在热力学和流体力学领域,各国学者相继建立了几十个相似准则,如:著名的雷诺(Re)准则、欧拉(Eu)准则、傅鲁德(Fr)准则等,揭示了流体力学、热力学领域试验必须遵循的基本规律,促进了这个领域试验技术的高速发展,推动了航天、航海工业的进步。但是土岩爆破时至今日还没有建立一个可供操作的相似准则。从而导致大量的经验无法进行系统的定量总结,成功的经验无法定量推广。这无论从提高我们的认识水平,还是从提高我们的工程水平都是很不利,现实强烈呼唤土岩爆破相似律的发展。为了总结过去,激励未来,让我们先回顾它的发展。

§ 1.1.1 土岩爆破相似律的发展概况

前面提到,早在 1955 年 Brobeg 根据爆破漏斗试验提出,如果

药包在各个方向上按比例增大,则爆破漏斗在各个方向上按同一比例增大,即药包直径与爆破漏斗的线度尺寸成正比。这个提法有点过于简单,也不够准确。因为在同等介质条件下两药包爆破漏斗互成比例的条件不仅与药量(或药包直径)有关,而且与药包的埋深(即抵抗线),装药结构以及炸药性质等有关。如果限定在同样介质和炸药的条件就是一个完全相似的问题(参见 § 2.3.2),而完全相似只不过是爆破相似律的一种很特殊的情况,并非普遍规律。以后有人如 Sedov, L. I.^[2]研究过两药包爆破过程参量(如速度、位移、动冲量等)的相似性问题,但是由于化爆反应的复杂性,以及爆炸与介质相互作用的更加复杂性,人们很难从细观研究得到可供应用的结论。

到了 80 年代,我国学者许连波用量纲分析的方法研究了爆破相似律的一些问题^[3]。下面仅就许氏对单个集中药包在无限介质的爆破相似律研究作简要回顾。

首先作者分析了影响集中药包爆破效果的基本参量共 35 个。并将其分成几何参数、介质参数、炸药爆破参数和坐标参数四类,如表 1.1 所示。

35 个参量可组成 $35 - 3 = 32$ 个独立无量纲综合数群,作者构造了这 32 个无量纲数群,并将其分为三类,如表 1.2 所示。

显然,用 32 个无量纲数群去组织集中药包的爆破试验是几乎不可能的,因此,作者进行了简化。首先忽略了与加载速率及漏气效应有关的 π 项,并假设爆破的介质与炸药相同。这样,就只剩下 $\pi_1, \pi_2, \pi_{29}, \pi_{30}, \pi_{32}$ 这五个 π 项了,即

$$\pi = f\left(\frac{R_b}{R}, \frac{R_b}{W}, \frac{z}{W}, \frac{r}{W}, \frac{W}{u_{bt}}\right)$$

在几何相似条件下,时间参量与几何参量成某种比例关系。如果不分析爆破过程只研究其结果,则 $\pi_{29}, \pi_{30}, \pi_{32}$ 均可忽略, π 方程简化为 $\pi = f\left(\frac{R_b}{R}, \frac{R_b}{W}\right)$, 问题又回到了完全相似。这样,土岩爆破相似律的研究始终未能突破介质和炸药要完全一样的束缚。显然,这种

状况是不能满足生产实际需要的。

表 1.1 影响因素分析

几何参数	介质参数	炸药爆破参数	坐标参数
R 药室半径	E_1, E_2 介质加、卸载弹性常数		
R_b 药包半径	G_1, G_2 介质加、卸载的剪切弹性常数		
W 最小抵抗线	$\sigma_c, \sigma_g, \sigma_t$ 介质抗压、抗剪、抗拉常数		
φ 重力方向和临空面法线夹角	C 内聚力		
	K_p^1, K_p^2 塑性加、卸载体积模量	ρ_b 炸药密度	z 临空面法向量
	v_p 破裂面传播速度	v_b 炸药爆速	r 极坐标矢径
	v_c 裂纹传播速度	K 炸药品种	θ 极坐标角
	ρ_R 介质密度	t_0 炸药能量释放时间	t 时间
	φ_0 内摩擦角	T 爆炸物绝热系数	
	g 重力加速度		
	$\dot{\sigma}$ 加载速率		
	$\dot{\epsilon}$ 应变速率		
	e_s 破坏表面能		
	l_0 介质初始裂纹长度		
	γ 运动粘度		
	α, β 渗流系数		
4 个	22 个	5 个	4 个

通过以上回顾不仅使我们了解到前人的研究成果,而且也给我们以后的技术路线提供了若干启示,它们是:

1. 由于量纲分析法的局限性,对于一个涉及众多因素的复杂现象,如果不能准确把握其影响参量,单纯依靠量纲分析法,几乎是不大可能建立该现象的相似准则的。

2. 对于一个力学内涵很复杂的现象,在机理还没有搞清以

前,试图用细观分析的方法去构建相似准则,通常难以奏效。在认识还比较肤浅的条件下,宏观分析法也许是最佳选择。

3. 在挑选描述现象的特征参量时,一定要充分估计到生产现场可能实现的条件。否则,即使阳春白雪,也会和者甚寡,导致成果难以推广。土岩爆破由于涉及面广,生产单位水平参差不齐,问题尤为重要。

表 1.2

与几何参数及炸药基本性质有关的 π 项	与加载速率及漏气效应有关的 π 项	与坐标参数有关的 π 项
$\pi_1 = \frac{K_2}{R}, \pi_2 = \frac{K_2}{W}, \pi_3 = \frac{\rho_b}{\rho_R}$		
$\pi_4 = \frac{v_p}{v_c}, \pi_5 = \varphi, \pi_6 = r$		
$\pi_7 = \varphi_0, \pi_8 = K, \pi_9 = \frac{v_c}{v_b}$	$\pi_{20} = \frac{l_0}{W}, \pi_{21} = \frac{\rho_R g W}{\rho_b v_b^2}$	
$\pi_{10} = \frac{K_2^p}{K_1^p}, \pi_{11} = \frac{\sigma_c}{\rho_b v_b^2}$	$\pi_{22} = \frac{\sigma R_b}{\rho_b v_b^3}, \pi_{24} = \frac{c_s}{\rho_b v_b^2 W}$	$\pi_{29} = \frac{z}{W}$
$\pi_{12} = \frac{\sigma_R}{\rho_b v_b^2}, \pi_{13} = \frac{\sigma_t}{\rho_b v_b^2}$	$\pi_{25} = \frac{\gamma}{v_b W}, \pi_{26} = \frac{a_t}{W}$	$\pi_{30} = \frac{r}{W}$
$\pi_{14} = \frac{C}{\rho_b v_b^2}, \pi_{15} = \frac{K_f}{\rho_b v_b^2}$	$\pi_{27} = \frac{\beta_t}{W}, \pi_{28} = \frac{R_b}{v_b t_0}$	$\pi_{31} = \theta$
$\pi_{16} = \frac{C_p}{v_b}, \pi_{17} = \frac{C_s}{v_b}$	$\pi_{23} = \frac{\epsilon W}{v_b}$	$\pi_{32} = \frac{W}{v_b t}$
$\pi_{18} = \frac{E_2}{E_1}, \pi_{19} = \frac{G_2}{G_1}$		

注:表中 C_p 为加载纵波波速, C_s 为加载横波波速,均为非独立变量。

§ 1.1.2 研究土岩爆破相似律的实际意义

土岩爆破相似律是指导土岩爆破模型设计和试验的理论基础,它的最终目标是达到爆破参数的优化组合,以便多、快、好、省地完成各类工程爆破任务。爆破相似律的指导作用,体现在以下几个方面:其一,用它可以指导小型或微型试验,对预定爆破目标进行参数优化,整理试验数据,或预测原型可能发生的某种现象;其二,用它可以去构架一个规范化体系,以便生产现场利用这个体系

去设计各自的爆破参数。由于这些参数被纳入到一个预先规范的系统内,这样就使人们日后有条件对这些量化参数进行整理与提高,从而深化人们的认识和运作水平。否则,要取得具有推广价值的量化经验是困难的;其三,它还是人们用来认识某些新的爆破现象和组织某些新的爆破试验的理论武器。因为土岩爆破相似律所揭示的应是各类工程爆破的本质规律,它应具有广泛的指导意义。

质量和效益的统一是任何生产部门追求的目标,也是土岩爆破工程追求的目标。但是,长期以来由于受现场条件和维持正常生产的限制,试图通过大量的原型试验,去寻求爆破参数的优化组合几乎是不可能的,生产呼唤小型或微型爆破试验来解决这类问题。土岩爆破相似律正是解决这类问题的理论基础。但是,不同的爆破对象有不同的要求和内容,例如中深孔挤压爆破要求破碎块度适中,各种单项指标(如炸药单耗、每千吨矿石的炮孔量)要低,参数优化的内容主要是孔网参数取值和爆破排面抵抗线矢径 r_w 方位的确定。光面和预裂爆破则要求眼痕率高,超欠挖少,光爆层(或预裂面)单位爆方(或每米²)凿岩爆破费用低;参数优化的内容主要是光爆层厚度,光爆层孔间距和装药结构选择。定向抛掷爆破则要求爆堆集中,上坝方量高,爆破危害小;参数优化的内容主要是药包的布置方案和药包抵抗线和空腔比的确定。所有这些要做到比较理想,都离不开现场小型试验或更小比例的微型试验。因为,只有采用这种小型化手段才能大幅度的节省人力、物力、时间,才便于用各种综合手段进行观察、测量,才有可能多次重复试验。可以说,符合客观实际的爆破模型试验是解决爆破参数优化的基本手段。

本书提出用爆破漏斗试验参数无量纲比值特征线图对各类土岩爆破工程进行参数优化,这个方法不同于50年代美国学者利文斯顿(C. W. Livingston)提出的漏斗理论,它是建立在土岩爆破相似律、土岩爆破工程参数规范化以及爆破漏斗试验无量纲比值特征线理论的基础之上的,并在地下中深孔爆破与束状孔爆破中初步得到证实。这个方法还刚刚提出,有待各类爆破实践的广泛检

验、补充和完善。

§ 1.2 现象相似的一般原理

模拟分物理模拟和数学模拟,保持物理本质一致的同类现象的模拟,属物理模拟;物理本质不同,但描述现象的微分方程相同的异类现象的模拟,属数学模拟。本书所及仅限于物理模拟,即通常所说的用小比例的试验预测原型的实际情况。那么小比例的模式试验应当遵循一些什么样的普遍规律,以及如何进行模型设计则是本节要着重研究的问题。

§ 1.2.1 相似三定理

相似三定理是指导模型设计,整理试验数据,建立相似模型试验方程(即经验公式),使试验成果得以推广的理论基础。

一、相似正定理

如果两现象相似,它们应具有以下性质^[4]:

1. 它们都为完全相同的方程组(包括现象方程组和单值条件方程组)所描述。

2. 用来描述现象的一切物理量在空间中相对应的所有点及在时间上相对应的各瞬间各量具有同一比例。以不同直径圆管内液体的流动为例,其截面流速分布示于图 1.1。图中,

$$l_1/l'_1 = l_2/l'_2 = \dots = l_i/l'_i = C_l = d/d' = \text{常量}$$

$$v_1/v'_1 = v_2/v'_2 = \dots = v_i/v'_i = C_v = \text{常量}$$

上式中的 C_l, C_v 为相似常数,其值为常量,是指同一截面和同一时间说的。对于不同截面,或同一截面不同时间,其比例常数的值则可能不同。

3. 相似现象必然发生在几何相似的对象里,因为现象相似是以几何相似为基础的。这一性质实质是第二性质的一个特例,即边界的几何形状相似。

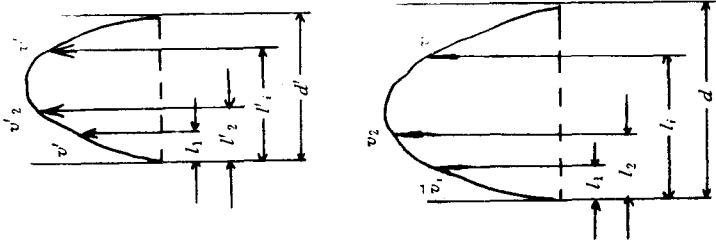


图 1.1 截面流速分布

4. 由描述现象的各特征量组成的相似准则,数值相同,或相似指标等于 1。以质点运动为例,其运动微分方程为

$$v = \frac{dl}{dt} \quad (1.1)$$

若两相似现象分别以下标 p 和 m 表示其对应物理量,则(1.1)式可分别写成

$$v_p = \frac{dl_p}{dt_p} \quad (1.2)$$

$$v_m = \frac{dl_m}{dt_m} \quad (1.3)$$

由性质 2 有

$$\frac{l_p}{l_m} = C_l, \quad \frac{t_p}{t_m} = C_t, \quad \frac{v_p}{v_m} = C_v \quad (1.4)$$

将其代入(1.2)式有

$$C_v v_m = \frac{C_l dl_m}{C_t dt_m} \quad (1.5)$$

将(1.5)式除以(1.3)式得

$$C_v = \frac{C_l}{C_t} \quad \text{或} \quad \frac{C_v C_t}{C_l} = 1 \quad (1.6)$$

(1.6)式左端即相似指标,它说明两相似现象各物理量的相似常数

受(1.6)式制约。将(1.4)式代入(1.6)式得

$$\frac{v_p t_p}{l_p} = \frac{v_m t_m}{l_m} = \dots \quad \text{或} \quad \frac{v t}{l} = \text{不变量} \quad (1.7)$$

从而得到两相似现象各物理量的另一种制约关系。式(1.7)左端即相似准则,它有以下特点:①它是一个无量纲综合数群;②它的值只在空间上的对应点和对应时刻才相等,即使同一点不同时刻,它的值也不一定相同,因此叫不变量,而不叫常量;③每个相似准则都有一定的物理意义,迄今为止,科学工作者在各领域建立并特殊命名的相似准则达60多个;④由单值条件中物理量组成的准则叫定性准则,由于在试验中其值可以由人们主观决定,因此也叫主定准则,包含有待定量的准则叫非定性准则,也叫待定准则。这些相似准则服从以下运算规律:

(1) 相似准则的指数,即 π^n (n 为常量),仍是相似准则;

(2) 相似准则的指数积,即 $\pi^{n_1} \pi^{n_2} \dots \pi^{n_k}$ (n_1, n_2, \dots, n_k 为常量),仍是相似准则;

(3) 相似准则的和或差,即 $\pi^{n_1} \pm \pi^{n_2} \pm \dots \pm \pi^{n_k}$ (n_1, n_2, \dots, n_k 为常量),仍是相似准则;

(4) 相似准则与任意常数 C 之积或商,即 $C\pi, \pi/C$,仍是相似准则;

(5) 相似准则与任一常数 C 的和或差,即 $\pi \pm C$,仍是相似准则。

利用这些运算规律,可以改变相似准则的函数形式,但不会改变准则方程的函数性质。

至此,可以把相似正定理表述为:如果现象相似,则描述两现象各物理量所分别组成的相似准则数值相等;或由它们的相似常数组成的相似指标等于1。相似正定理于1848年由法国J. Bertrand建立,它指明了相似现象所具有的性质,其中最重要的是性质(4)。