



北京航空航天大学

“冯如杯”创意大赛论文

防崴脚鞋

防崴脚鞋

摘要：

崴脚可以算得上是日常生活中极容易发生的身体伤害。研究表明，崴脚基本上都是由于脚踝不能够支撑运动带来的压力而内翻或外翻引起的。于是，我们设想只要在脚踝弯曲的瞬间将其固定或是施加外力予以支撑，就能有效防止崴脚的发生。对此，我们提出了两个解决方案：向鞋内注入剪切增稠液体，使鞋两侧能够在受到冲力瞬间变硬固定脚踝；或是利用压电效应控制电路根据压力的变化选择释放支撑装置支撑脚踝。

关键词：

防止脚踝弯曲，剪切增稠效应，压电陶瓷，支撑装置

Abstract:

Twisting ankle can be regarded as bodily injury which is most likely to occur in everyday life, research shows that it happens basically due to the ankle's cannot support a sudden force given by the body itself, so as long as the ankle bending, the moment to be fixed or applying an external force support, can effectively prevent the occurrence of twisting the ankle. In this regard, we have designed two solutions, they are: shear thickening fluid and Piezoelectric ceramic. We put this material on the both sides of the shoes, the shoes can instantly harden fixed ankle on both sides; Piezoelectric ceramic is put on the bottom of the shoes, before we jump, the stronger force given by our body will be felt by the Piezoelectric ceramic, and it will bounce off the supporting system in order to help the ankle supporting the weight. By this two way, can we prevent the happening of twisting ankle.

目录

1.方案一：剪切增稠液体材料装置.....	- 1 -
1. 1 工作原理.....	- 1 -
1. 2 具体结构图.....	- 1 -
1. 3 工作过程.....	- 2 -
1.3.1 状态一：突然冲击，固化准备.....	- 2 -
1.3.2 状态二：剪切增稠液固化.....	- 2 -
1.3.3 状态三：液体变回液相.....	- 2 -
1. 4 方案可行性分析计算.....	- 3 -
1. 5 方案优化分析计算.....	- 4 -
1. 6 溶液配制.....	- 7 -
1. 7 方案创新性分析.....	- 7 -
1. 8 方案优劣性分析.....	- 8 -
1. 9 市场前景分析.....	- 8 -
2.方案二：压电陶瓷及其配套装置.....	- 9 -
2. 1 工作原理.....	- 9 -
2.1.1 压电效应原理.....	- 9 -
2.1.2 电路示意图.....	- 9 -
2. 2 具体装置.....	- 9 -
2. 3 工作过程.....	- 10 -
2. 4 方案创新性分析.....	- 10 -
2. 5 创意可实现性分析.....	- 10 -
2. 6 方案优劣性分析.....	- 10 -
致谢	- 11 -
参考文献.....	- 12 -

引言

崴脚在我们生活中频繁发生，它不仅影响了我们进行体育运动，严重时甚至会影响到我们的正常生活，因此，一款可靠的防崴脚鞋是很必要的。我们对“防崴脚”这一难点的解决方案有如下两种。

1.方案一：剪切增稠液体材料装置

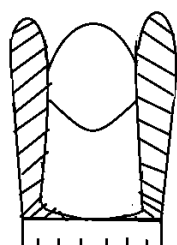
1. 1 工作原理

鞋子要在崴脚的一瞬间固定脚踝，防止脚踝弯曲而崴脚，因此我们经过查阅资料确定使用一种新材料——剪切增稠液（STF），这是一种具有特殊性能的悬浮体系,主要由纳米至微米量级颗粒的分散相和分散介质组成。这种材料对应变率高度敏感,且作为分散相的硬质球形纳米粒子悬浮体受剪切力、冲击力、抽拔力时都有明显的剪切增稠反应，进而有一定的吸能抗冲击性能，使剪切增稠液的表观粘度发生巨大变化,可以由液相转变为固相;冲击撤销后,又能从固相转变为液相。这种剪切增稠效应是一种非牛顿流体行为,是可逆的。我们将这种液体装入鞋的两侧，就能起到很好的防止脚踝弯曲的效果。

1. 2 具体结构图

图为鞋的正视图

阴影部分为剪切增稠液放置位置



1. 3 工作过程

1.3.1 状态一：突然冲击，固化准备



正常走路时，脚底受力是均匀的，而当即将崴脚时，脚底有倾斜的趋势，人身体的重力会全部集中在脚底一侧，这时脚底的压强会突然变大，对鞋底的剪切增稠液的剪切力也会随之增大：脚踝也略有突出内翻的趋势，使其能给鞋侧面一个较大的压强。

1.3.2 状态二：剪切增稠液固化

如上文所述，脚底突然受到很大的压强冲击时，剪切增稠后液体便会固化，与此同时，脚底和脚踝同时给鞋侧面施加的力的会使液体固化，从而使鞋的脚踝部分像两块石膏一样将脚踝固定，防止其弯曲而扭伤。

1.3.3 状态三：液体变回液相

因受到冲击使液体粘度增大而导致的固化会在冲击撤销，即脚踝恢复原状，全脚掌承受全身重力时消失，使得液体恢复常态。

1. 4 方案可行性分析计算

因为剪切增稠液是一种非牛顿流体，它的粘度随着剪切速率的增大而增大。首先我们要计算流体的流动速度相对圆流道半径的变化速率—剪切速率

公式：剪切速率=流速差/所取两液面的高度差。

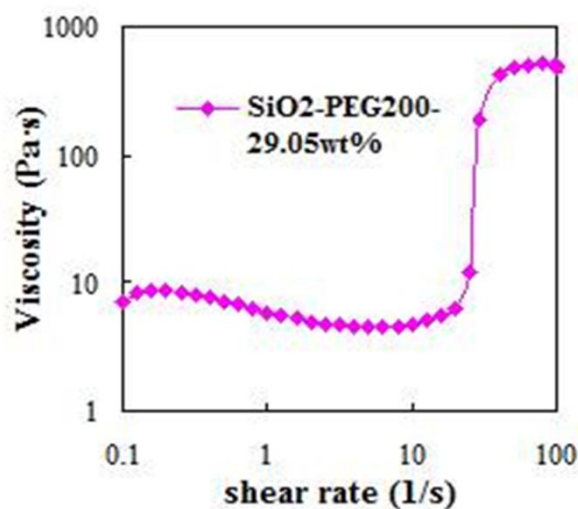
粘度为液体分子内摩擦的量度，也是物体粘流性质的一项具体反映。粘度的定义为一对平行板，面积为 A ，相距 dr ，板间充以某液体。今对上板施加一推力 F ，使其产生一速度变化 du 。由于液体的粘性将此力层层传递，各层液体也相应运动，形成一速度梯度 du/dr ，称剪切速率，以 r' 表示。 F/A 称为剪切应力，以 τ 表示。

剪切速率与剪切应力间具有如下关系： $(F/A) = \eta (du/dr)$ ，此比例系数 η 即被定义为液体的剪切粘度（另有拉伸粘度，剪切粘度平时使用较多，一般不加区别简称粘度时多指剪切粘度），故 $\eta = (F/A) / (du/dr) = \tau / r'$ 。

粘度单位常用“泊”，以 P 表示。部分粘度单位换算如下：

1 泊 (P) = 0.1 牛顿秒/米² (Ns/m^2) = 3.6 × 10² 千克/平方米时 (kg/m^2h)

1 千克力秒/米² ($kgfs/m^2$) = 1Pa. s = 98.07 泊 (P)。



图为剪切增稠液 PEG200-SiO₂- 29.05wt%的在 25℃时粘度随剪切速率的变化

如果我们假定人的平均体重为 60kg (约为 600N), 脚掌厚度为 1.5cm, 脚的长度为 20cm (即崴脚时剪切增稠液和脚底的接触面积为 30cm²), 脚踝面积约为 10cm², 由此可知, 即将发生崴脚时, 脚底对鞋侧面的压强约为 20w 帕, 脚踝对鞋侧面压强约为 60w 帕, 又根据上述公式有:

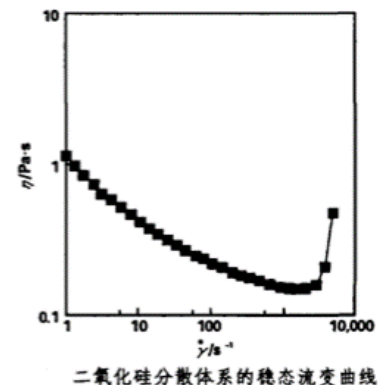
$$\sigma = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

σ : 剪切应力 (单位 pa), 就是计算的压强值。

η : 粘度 (单位 pa*s)

$\dot{\gamma}$: 剪切速率 (单位 s⁻¹)

选取图像的上临界剪切速率点 (10000, 0.3), 可以计算出临界压强值即 10000*0.3=3000pa, 远小于脚底和脚踝总共能提供的压强, 因此, 可以达到剪切增稠效果, 使该方案完全能够预防崴脚的发生。



1.5 方案优化分析计算

我们希望所用的剪切增稠液固化效果能够达到最好, 对此, 我们想出了两种改进方案: 增加分散相二氧化硅的质量分数来增加液体的粘度或增大分散介质 PEG 的相对分子量来降低液体的临界剪切速率。以下是我们的分析:

因为颗粒悬浮液的表现粘度可以表述为:

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}, a, \rho, \mu) = \eta_0 \frac{1 + \left(\frac{2a^3 \rho}{9\mu} \lambda_2 - \alpha_2 + \frac{2a^3 \rho}{9\mu} \alpha_1 \right) \dot{\gamma}^2}{1 + \left(\frac{2a^3 \rho}{9\mu} \right)^2 \dot{\gamma}^2}$$

可以看出, 表观黏度主要依赖于 4 个参数, 分别是: 应变速率 $\dot{\gamma}$ 、颗粒半径 a 、颗粒密度 ρ 和原溶液的动力学黏度系数 μ 。现逐一分析:

参数 γ :

图 1 是在上述特定参数值的条件下描绘出的应变速率—表观黏度 γ_1 曲线。从该图不难看出, 本文的表观黏度模型能很好地模拟出剪切增稠的现象。当超过某一临界应变速率的时候, 表观黏度急剧增加; 当应变速率增加到某一值时, 表观黏度又将趋于平稳(即第二牛顿区)

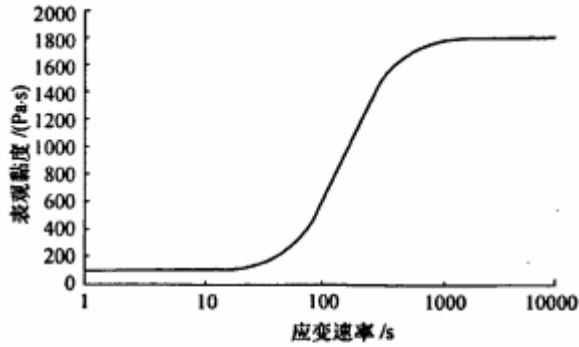


图 1 表观黏度与应变速率的关系

$$\begin{aligned} (a = 0.0005\text{m}, \quad \rho_s = 2300\text{kg/m}^3, \quad \mu = 23 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}, \\ \lambda_2 = 0.01, \quad \alpha_1 = 0.1, \quad \alpha_2 = 0.000000001, \\ \lambda_1 = 2a^2\rho_s/9\mu = 0.0056, \quad \eta_0 = 100\text{Pa}\cdot\text{s}) \end{aligned}$$

参数 a :

考虑到颗粒沉淀的问题, 颗粒半径取值从 $0.000001\text{m} \sim 0.0005\text{m}$ 。由此, 图 2 是在特定参数值的条件下描绘出的颗粒半径 a —表观黏度 r / 曲线。从该图可以看出, 对于颗粒悬浮液而言, 当颗粒半径大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时, 增加颗粒半径尺寸能有效地提高悬浮液的表观黏度, 增稠效果明显, 并在半径 $300\text{ }\mu\text{m}$ 左时, 达到峰值; 当颗粒半径大于 $300\text{ }\mu\text{m}$ 时, 随着颗粒半径尺寸的增加, 悬浮液的表观黏度开始降低, 出现了变稀的现象。

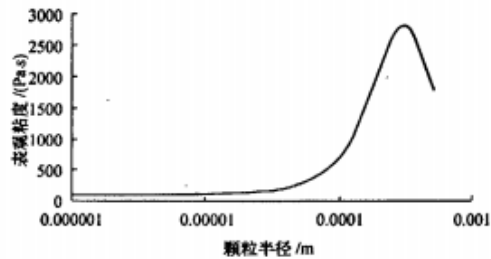


图 2 表观黏度与颗粒半径的关系

$$\begin{aligned} (\dot{\gamma} = 500\text{s}^{-1}, \quad \rho_s = 2300\text{kg/m}^3, \quad \mu = 23 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}, \\ \lambda_2 = 0.01, \quad \alpha_1 = 0.1, \quad \alpha_2 = 0.000000001, \quad \eta_0 = 100\text{Pa}\cdot\text{s}) \end{aligned}$$

参数 ρ :

考虑到一些常规的颗粒材质, 将颗粒的密度取值从 $1100\text{kg/m}^3 \sim 11500\text{kg/m}^3$ 。图 3 是在特定参数值的条件下描绘出的颗粒密度以一表观黏度 r' 曲线。从该图可以看出, 对于颗粒悬浮液而言, 其颗粒的密度对于表观黏度的贡献总体来说并不是很大。即便是将较轻的有机玻璃换成较重的铅, 其表观黏度只是增加了 25% 左右, 并且基本上是成一线性变化规律。

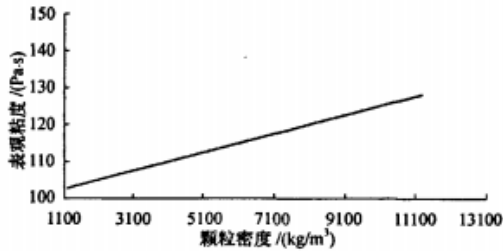


图 3 表观黏度与颗粒密度的关系

($\dot{\gamma} = 500\text{s}^{-1}$, $a = 0.0001\text{m}$, $\mu = 23 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$,
 $\lambda_2 = 0.01$, $\alpha_1 = 0.1$, $\alpha_2 = 0.000000001$, $\eta_0 = 100\text{Pa}\cdot\text{s}$)

参数 μ :

考虑到一些常规的溶液动力学黏度系数, 将溶液动力学黏皮系数取值从 $0.001\text{Pa}\cdot\text{s} \sim 1.5\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。图 4 是在特定参数值的条件下描绘出的原溶液动力学系数 μ —表观黏度 r' 曲线(如图 4 所示)。从该图可以看出, 对于颗粒悬浮液而言, 随着原溶液动力学黏度系数的增加, 尤其是在 0.01-0.1 这一区间, 悬浮液增稠效果十分显著, 最大可以增加近 30 倍, 并在 $\mu=0.26$ 附近达到峰值。

综上, 随着颗粒半径尺寸的减小, 在非牛顿区域(剪切增稠区域), 悬浮液的剪切增稠效果越发显著。悬浮液表观黏度与颗粒半径有关, 每一个应变速率都对应一个临界的颗粒半径值。当颗粒半径 a 小于该临界值时, 悬浮液表观黏度随着颗粒半径尺寸的增加单调递增。当原溶液动力学黏度系数 μ 小于临界值时, 悬浮液表观黏度随着原溶液动力学黏度系数的增加单调递增。

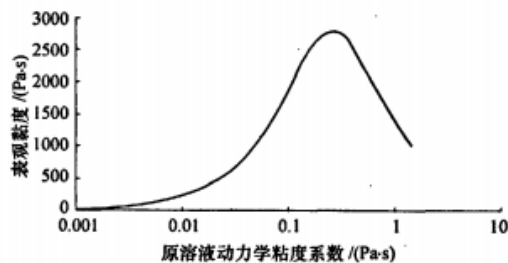


图 4 表观黏度与原溶液动力学黏度系数的关系

($\dot{\gamma} = 500\text{s}^{-1}$, $a = 0.0001\text{m}$, $\rho_p = 2300\text{kg/m}^3$, $\lambda_2 = 0.01$,
 $\alpha_1 = 0.1$, $\alpha_2 = 0.000000001$, $\eta_0 = 100\text{Pa}\cdot\text{s}$)

1. 6 溶液配制

综合方案优化分析，在此，我们选用质量分数为 70% 的二氧化硅-PEG 体系，以下是我们选择的依据：

分散介质的选择：人体防护用剪切增稠流体溶剂要无毒，稳定不易变质，适应温度范围宽，粘度不能太大，有一定的悬浮能力。

分散相的选择：分散相应选性质稳定，无毒，球化率高，纳米级、粒径分布均一且集中，价格相对便宜的惰性材料。

粒径选择纳米级的原因：粒径小于 1 微米的悬浮体是胶体体系，悬浮稳定，不易沉淀。保证流体的悬浮稳定性。

选球形粒子的原因：(1)球形粒子的悬浮体流动性好，增稠后软化速度快，保证下一次冲击时，流体已恢复原状，准备好下一次增稠。如恢复速度慢，受连续冲击时，流体与发射物硬碰硬接触，分散吸收能量的性能下降，防护设施有可能发生较小范围内的累积破坏，造成防护失效。(2)非球形粒子的悬浮体剪切增稠需要针对人体防护设施进行研究。临界点过低，增稠的程度差，不是制液体防护设施的理想材料。

1. 7 方案创新性分析

此方案采用内置新型材料——剪切增稠液的做法，巧妙的利用了其自身“冲击固化”的特性，在不违背自然规律的条件下，将崴脚的可能性降低为 0。它更是代替了可靠性不高，舒适性及便捷性也较差传统绷带缠绕的方式。综合以上分析可以看出，该方案的防崴脚鞋除了结合人体的静态尺寸和动态尺寸进行设计外，最重要的是要从防护、安全、运动、舒适四个方面加强功能设计，真正达到人——运动——环境的有机统一，使他们处于最佳匹配状态。

1.8 方案优劣性分析

此方案优点在于利用剪切增稠液体平时柔软、受冲击时坚固的特性。在柔软状态下，可以很好地贴合穿鞋者的脚型；受到外界冲击时，也可在符合穿着者脚型的状态下变硬，进行塑形缓冲，可以在减轻脚局部受到的冲击应力的同时固定脚踝，防止了“过度保护”的发生。应用 STF 技术会使其和传统防崴脚鞋相比重量降低 20%以上，厚度减薄 30%以上。因此，剪切增稠液体调和了鞋的防护性能和舒适性之间的矛盾，使得两者和谐共存。

此方案的缺点在于剪切增稠液 STF 制备较为复杂，价格也相对贵一些。而且由于无法辨识如踢门，被人踩到等撞击和崴脚时受到撞击的区别，可能会造成液体在不必要时的固化，可能导致偶尔舒适性上的减弱。

1.9 市场前景分析

此方案适用人群广泛，对于青年，中年，老年人的防崴脚功能都有很高的可靠性，一旦真正面向市场销售，预测将会有可观的销量。至于成本过高的问题，我们坚信科技水平进步更加迅猛，日后可以选择使用廉价的玉米淀粉溶液等作为替代品，从而使防崴脚鞋同时具备可靠性高，舒适度好，价格低廉这三大优势。（本方案中未选用玉米淀粉溶液的原因是目前为止人们对其具体性质，以及达到最佳效果时淀粉与水的比例关系尚未知晓，这还有待进一步的研究）

2.方案二：压电陶瓷及其配套装置

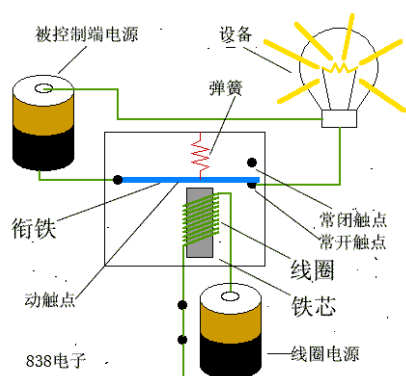
2. 1 工作原理

2.1.1 压电效应原理

对于不存在对称中心的异极晶体,加在晶体上的外力除了使晶体发生形变以外,还将改变晶体的极化状态,在晶体内部建立电场,这种由于机械力作用使介质发生极化的现象称为正压电效应。压电材料可以因机械变形产生电场,也可以因电场作用产生机械变形,这种固有的机-电耦合效应使之可以起到良好的压力传感以及电路电源的作用。

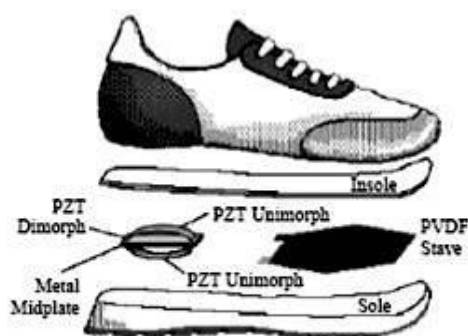
2.1.2 电路示意图

在压电晶片的两个表面上镀有电极,并引出引线外接继电器,如图,其中线圈电源为压电晶片。外接设备为一电控弹射装置,用于弹出鞋外部侧面内的支撑装置。



2. 2 具体装置

将压电晶片置于鞋子底部,如图所示。控制电路置于鞋子后侧,由弹出器控制的弹出装置置于鞋外部的内外两侧。



2.3 工作过程

实验表明压电陶瓷的压力与应电压的关系不是总成线性的。但一段线性区间,作用力与电压是成正比的。当人跳起前脚对鞋的压力大于某一设定值时,压电晶片所产生的电压将衔铁吸附,从而接通控制电路,使内外两侧的支撑装置在人跳起时同时弹出,从而实现落地后的辅助脚踝支撑,防止崴脚。保护完成后,使用者自行将支撑装置按回即可使鞋子恢复原状。

2.4 方案创新性分析

该方案使用了新型材料——压电陶瓷,创新点在于抛弃了固有的纯机械式防护,很好地利用了压电陶瓷敏感度高的特殊优势,确保了防崴脚的可靠性。

2.5 创意可实现性分析

如今压电陶瓷的使用已经比较广泛,特别是最近几年其发展更为迅速。尽管价格相对来说还比较高,但在科技水平日新月异的今天,我们相信其使用领域将会大大扩宽,价格会更为低廉。

2.6 方案优劣性分析

优点: 敏感度高, 可将脚踝扭伤的概率减至最低。内外两侧同时弹出支撑装置, 抵消了支撑装置弹出时带有的动能, 防止了对脚部的冲击导致的误伤。

缺点: 电路较复杂, 电器元件较多, 可能会导致鞋自身重量较重; 舒适性也会稍有降低, 而且支撑装置需手动调回会造成使用不便; 被控制电路电源需定期更换, 便捷性较差, 远期成本较高。

致谢

从创意的初步形成到其不断完善直到最终能使之较完美地呈现出来，有很多人给予了我极大的帮助和鼓励。

首先感谢我的辅导员一直鼓励我，让我有动力把这个最初认为不可能完成的项目完成，并且感谢她在我最需要帮助的时候给我以思路上的提示和技术上的指导。

其次感谢林峰医生在学术上的支持，让我对崴脚这一伤害的发生有了深入的了解，并且在关节的受力，运动分析上得到了可靠的数据计算，没有他的帮助，整个创意基本不可完成。

然后感谢徐嘉旻学长的帮助，无论是创意的完善还是项目细节的处理他都给了我很多指导，特别是查阅了很多资料，帮助我解决了很多专业知识上的问题。正是由于他的帮助和支持，我才能克服一个个的困难，解决各种疑惑，直至本文的顺利完成。

最后感谢我的两个组员，他们各自发挥自己的优势帮助我逐步完成这篇论文，他们每一个思想的火花都能给我很多提示，帮我解决问题。感谢他们的帮助，使我在轻松愉悦的气氛中完成这篇论文。

虽然创意大赛的论文已经完成，但是仍有一些技术上的问题需要解决，我们还会继续研究下去。并且我们会本着这种善于发现问题思考问题的精神不断创新，努力探求，勇攀科技高峰。

再次感谢所有帮助我的人！谢谢你们！

参考文献

- [1] 庞娟. 纳米药水制造超级防弹衣[J]. 现代物理知识, 2008, 20(1): 51.
- [2] 徐素鹏, 张玉芳. 剪切增稠液体在个体防护装甲上的应用进展[J]. 高科技纤维与应用, 2008, 33(3): 40-42.
- [3] 徐钰蕾, 龚兴龙, 江万权, 叶兴柱, 张忠. 剪切增稠液体的制备及其性能表征, 1001-9731(2007)增刊-3904-0
- [4] 曲远方. 功能陶瓷及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 33-55