

# “金属塑性成形原理”教学模式探索

宋广胜<sup>1</sup>, 肇葳葳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>沈阳航空航天大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳

<sup>2</sup>辽宁省沈阳市第7中学, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年11月7日; 录用日期: 2025年12月10日; 发布日期: 2025年12月19日

## 摘 要

金属塑性成形原理是材料成型及控制工程专业一门重要专业课, 它涵盖了金属物理学和塑性力学两方面知识体系, 具有包含知识面广和理论知识抽象的特点。本文以加深学生对专业知识掌握及培养学生探究精神为目的, 在课程知识体系中选取若干知识点, 围绕上述知识点, 将授课内容与科研和生产中的应用相结合, 并对选取的知识进行延伸拓展, 开拓学生的知识视野, 以达到巩固学生对课程内容的掌握, 培养学生的探究和创新能力的目的。

## 关键词

塑性成形, 教学模式, 知识点, 延拓, 探究精神

# Exploration on the Teaching Method of “Metal Plastic Forming Principle”

Guangsheng Song<sup>1</sup>, Weiwei Zhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

<sup>2</sup>Shenyang No. 7 Junior High School, Shenyang Liaoning

Received: November 7, 2025; accepted: December 10, 2025; published: December 19, 2025

## Abstract

As an important specialized course for materials forming and control engineering, the Metal Plastic Forming Principle encompasses both metal physics and plastic mechanics, featuring a broad range of knowledge and abstract theoretical concepts. In this paper, in order to deepen students' grasping of professional knowledge and cultivate their inquiry spirit, several knowledge points were chosen within the curriculum knowledge system, focusing on above mentioned knowledge points, combine teaching contents with applications in scientific research and production, and extend the selected

knowledge, broaden students' knowledge vision, to achieve the goal of consolidating students' grasping of course contents and cultivating their exploration and innovation abilities.

## Keywords

Plastic Forming, Teaching Method, Knowledge Point, Extension, Inquiry Spirit

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

金属塑性成形原理是材料成型及控制工程等专业的一门重要专业基础课,它分别从金属塑性成形的微观机制和塑性力学两个方面,对金属塑性成形的原理进行讲解,主要涉及到金属物理学和塑性力学基础理论两方面知识。由于该课程具有涵盖知识面广及理论知识抽象的特点,所以课程的开设是以学生先修了“材料科学基础”“工程力学”等课程为前提的。虽然学生已经先修了部分基础课程,但是由于该课程内容涉及到金属材料变形最微观的机制,及力学中的复杂数学推导,学生学起来感觉枯燥和抽象,在课堂上难以跟上老师的授课节奏,所以有必要在授课内容和教学模式等方面进行探索改革,以改进授课效果。

为了改进金属塑性成形原理的授课效果,众多院校对该课程的教学进行了改革。李强等[1]提出了采用合理安排教学内容与时间、采用多媒体与网络等技术手段辅助教学、积极引导主动思考、在教学中引入生产实例进行讲解等讲授方法。赵亚东等[2]通过精选教学内容、采用多媒体教学、引导学生主动思考、改进考核模式等途径对课程教学进行了改革;钱绪政等[3]采用对分课堂+高等数学强化辅助的教学模式,提高了学生学习的主动性和自信心;韩奇钢等[4]基于构建主义理论,提出以学生自我成长为中心的教学理念,改革授课内容与形式,构建课程闭环教育体系;王武荣等[5]基于问题/项目的教学理论,以成形制造虚拟仿真项目驱动学生完成课程学习。

本文基于构建主义教育理论,在授课过程中采用探究式教学,以学生为主体,探索疑问为导向,精选课程内容中若干关键知识点,通过对上述知识点的拓展延伸,串联起整个授课内容体系,增强授课内容对学生的吸引力,最终达到提高授课效果目的。

## 2. 课程知识体系及难点知识的选取

近些年来,各工科院校在制定本科专业培养计划时,都对本科4年的授课总学时进行了压缩,多数专业的总学时不高于 $175 \times 8$ 学时,与之相应则对课程的门数及每门课的总学时都进行了删减。在课程总学时不断压缩的趋势下,不同的院校则根据本校所依托的行业特点,及先修课程的内容范围,对金属塑性成形原理的授课内容进行了精选,对认为不是课程主干知识的内容进行删减,目前,多数院校的金属塑性成形原理的授课总学时(包括实验课)不超过56学时,多数为48学时,少数则为32学时。基于多年的本专业本科生就业特点及前期相关课程的授课内容,本课程的主要讲授的知识体系如图1所示,授课内容设置也结合了本课程的经典教材[6],囊括了金属塑性成形主要基础理论。

金属塑性成形原理所讲解的内容较抽象,如图1所示,金属塑性变形物理基础部分则涉及到了金属塑性变形的微观机理,也是金属材料科学中较难的部分,而金属塑性变形力学基础部分则对数学知识的

应用能力提出了较高的要求,特别是对高等数学和线性代数知识的应用。长期的授课实践表明,学生在学习过程中普遍感到内容抽象,学习难度较大,难以持续跟上老师的授课进度。

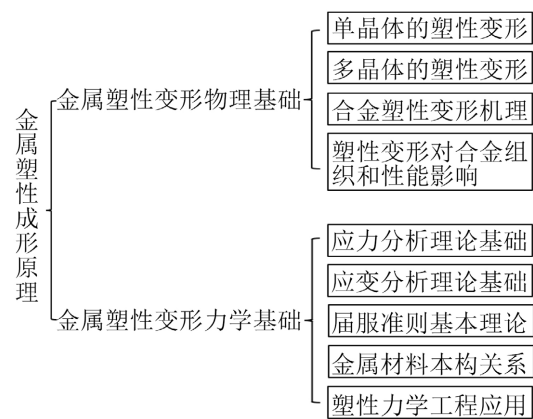


Figure 1. Main knowledge system of metal plastic forming principle  
图 1. 金属塑性成形原理的主要知识体系

为了提高学生学习理论知识的兴趣,避免于教材内容的限定,如表 1 所示,选取授课内容相关的若干知识点,对其讲解的范围和深度分别加以延拓,使学生切实感受到相关理论知识在科研和生活中的具体应用,培养学生的探究和创新精神。

Table 1. Selection of knowledge points and extension method  
表 1. 知识点的选取及延拓方式

选取的知识点	延拓方式
取向因子计算	结合科研工作,对知识进行延拓,让学生体会到相关知识在科研中的应用。
张量与坐标变换	通过讲解相关理论在日常生活中的应用,让学生感受相关理论的具体应用。
Tresca 屈服准则几何轨迹 - 六棱柱面	与学生一起探索屈服准则几何轨迹的建立过程,培养学生的探究精神与创新能力。
平板压缩的滑移线 - 速降线	引导学生探索建立滑移线方程,拓展学生的知识视野,培养学生的批判精神和探究能力。

对于表 1 中所列的 4 个知识点的延拓着眼点是不一样的,对前两个知识点延拓的着眼点是让学生体会理论知识的具体应用,学生通过感受具体理论知识在科研和生活中的应用,加深对知识的理解;而后两个知识点延拓的着眼点是培养学生的探究精神,这两个知识点的特点是在相关教材中只是给出了具体结论,至于结论是如何导出的,相关书籍中没有介绍。通过引导与提示等方式,与学生一起探索结论的推导过程,在探索实践中培养了创新能力和探究精神。

3. 知识点的延拓

3.1. 晶粒取向与取向因子

如图 1 所示,在金属塑性变形物理基础部分涉及到晶体塑性形变机理,需要讲解滑移系和孪晶系启动的微观机制,这其中涉及到晶粒取向的定义、晶粒取向的测定、取向因子分布的计算、滑移及孪晶启动的定量计算等金属学相关知识,不仅涉及到金属学的相关理论知识,还涉及到材料科学中的检测手段和仪器的使用。对上述知识点的讲解,如果结合具体的科研工作内容,会加深学生对相关知识理解,明

确学习目的, 提高学习兴趣。图 2 和图 3 分别是讲解金属晶体塑性变形微观机制中所用到的部分科研工作内容, 目的是给学生引进具体相关科研工作中实例。

图 2 展示了实际的金属塑性变形机理研究的测试和分析手段, 具体为: 变形金属试样的制取→采用扫描电镜所配置的 EBSD 系统测定晶粒取向→晶粒取向测定结果的分析处理。这其中涉及到了晶粒取向的定义、晶粒取向的实际测定、滑移和孪晶系的取向因子计算等相关知识, 通过上述内容的讲解, 使学生体会到了相关科研工作的具体内容, 了解了相关理论知识的具体应用。

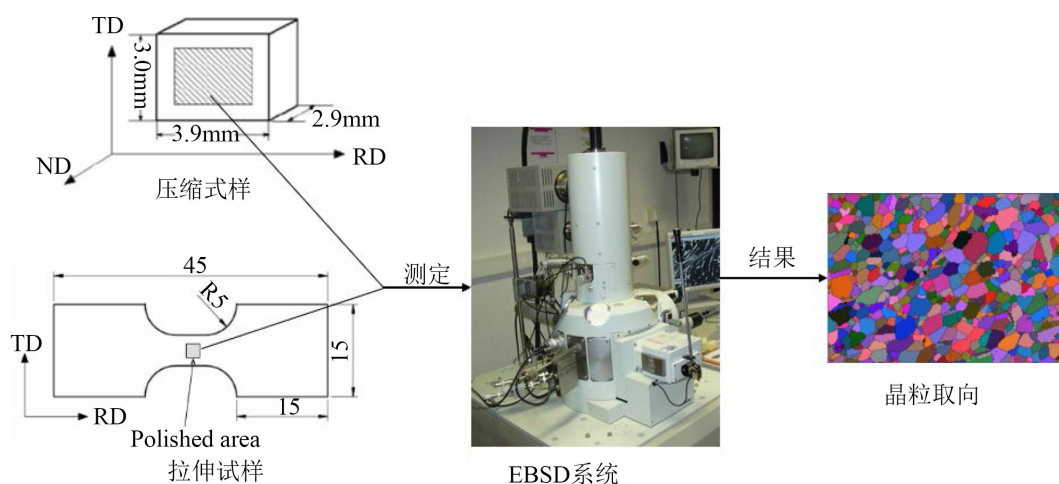


Figure 2. Measure of grain orientation in deformed metal by EBSD

图 2. 变形金属晶粒取向的 EBSD 测定

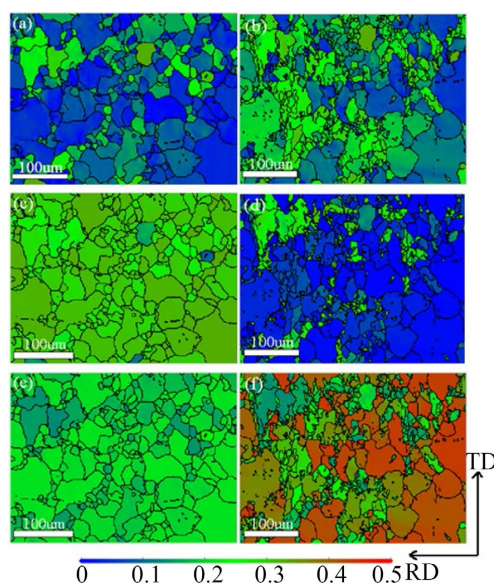


Figure 3. Schmid factor distribution before activations of (a) Basal; (c) Prismatic; and (e) Pyramid sliding systems; Schmid factor distribution after activations of (b) Basal; (d) Prismatic; and (f) Pyramid sliding systems

图 3. (a) 基面; (c) 柱面; (e) 锥面滑移系在孪晶启动前的取向因子分布; (b) 基面; (d) 柱面; (f) 锥面滑移系在孪晶启动后的取向因子分布

基于图 2 中的测定过程, 图 3 显示了镁合金变形中不同滑移系在孪晶启动前后在晶粒尺度上的取向因子的变化[7], 滑移系取向因子计算是金属塑性变形物理基础部分的重要内容, 在授课中, 对取向因子

的计算公式及其推导过程都做了详细讲解, 但教材中缺少取向因子在实际科研工作中应用等内容, 通过结合授课教师的镁合金变形机理研究工作, 使学生切实体会到取向因子的计算在金属变形机理研究中的应用, 拓展了取向因子相关知识面, 弥补了教材的不足, 加深了学生对相关知识的理解。

### 3.2. 坐标变换的应用

张量分析作为一个数学分支, 是学习和研究力学必需的数学基础, 但作为材料成型及控制工程专业的本科生, 考虑到张量分析的学习难度及课程学时限制, 在讲授金属塑性变形力学基础时只需要对张量的基本概念等加以讲解即可。作为一种高级的物理量, 张量是与坐标变换紧密联系的, 现阶段的中学数学大纲中没有包含坐标变换知识, 大学高等数学的大纲中也没有规定讲解坐标变换知识。坐标变换基础内容为坐标平移和旋转, 坐标平移公式是简单直观的, 对于坐标旋转, 只需要具有中学水平的向量分析基本知识, 就很容易推导出其数学公式, 学生也是容易理解掌握的。

实际上, 坐标变换(平移和旋转)公式是一个应用广泛的数学工具, 在上述的图2和图3中有关的晶粒取向知识就涉及到坐标变换公式的应用。在授课中, 如图4所示, 通过讲解生活中常见的摄像机的图像定位原理, 使学生了解到坐标变换公式的具体应用。在图4中, 展示了三个不同层次的坐标系, 分别是世界坐标系( $o_w x_w y_w z_w$ ), 即所拍摄的环境中物体所在的坐标系, 摄像机坐标系( $o_c x_c y_c z_c$ )和图像坐标系( $o_p x_p y_p$ )。

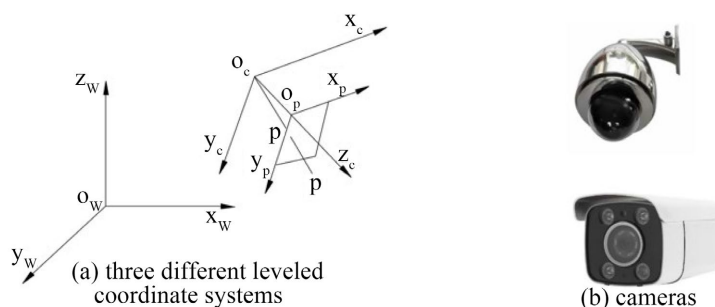


Figure 4. Coordinate system for camera and image location  
图4. 摄像机及图像定位的坐标系

摄像机对自然环境中物体进行定位, 需要把所拍摄的物体在世界坐标系中的坐标转化图像坐标系中的坐标, 这首先需要首先把世界坐标系转化为摄像机坐标系, 具体的转化公式为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad (1)$$

式中,  $T = [t_x, t_y, t_z]^T$  是世界坐标系的原点在摄像机坐标系中的坐标。R 为坐标旋转矩阵, 其表达式为

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

表示世界坐标系依次绕  $z$ 、 $y$  和  $x$  轴分别旋转  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  角, 使得世界坐标系与摄像机坐标系的方向一致。在对式(2)的讲解中, 涉及到了中学教材中的平面坐标旋转公式的灵活运用。

通过对上述摄像机定位原理的讲解, 使学生深刻体会到数学在日常生活中的应用, 有利于更好地理解张量与坐标变换的联系, 加深了对张量概念的理解, 提高了学生的学习专业知识的兴趣。



## 4. 探究精神的培养

针对金属塑性成形原理这门课程近些年陆续有不同版本的教材出版, 通过查阅这些教材, 结合多年的授课经历, 可以发现若干知识点在教材中只是直接给出了结论, 而结论是如何得出的, 相关书籍中都没有具体的介绍。在授课过程中, 可以针对这些只有结论的知识点, 引导学生尝试对这些结论的推理过程进行探索, 以达到培养学生探究精神和创新能力目的。

### 4.1. 屈服准则轨迹的建立

在塑性力学中, 判断质点是否进入塑性变形状态的理论依据是屈服准则, 所以屈服准则就是塑性力学重要组成部分, 其中 Mises 屈服准则和 Tresca 屈服准则是经典塑性力学两个基本屈服准则, 几乎在所有关于塑性力学基础理论的教材中, 对这两个屈服准则都有所介绍。两个基本屈服准则有代数和几何表达两种方式, 屈服准则的几何表达为其代数表达式在坐标系中的轨迹, 称为屈服轨迹。如图 5 所示, Mises 屈服准则的轨迹为在主应力空间中以第一象限等倾线为轴线半径为  $\sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_s$  的圆柱面, 称为 Mises 圆柱面, 其建立过程在相关教材中都有介绍。对于 Tresca 屈服准则的代数表达式

$$|\sigma_1 - \sigma_2| = \sigma_s; |\sigma_2 - \sigma_3| = \sigma_s; |\sigma_1 - \sigma_3| = \sigma_s \quad (3)$$

在主应力空间中的轨迹则为图 5 中与 Mises 圆柱面同轴线并内嵌于其内部正六棱柱面(标为红色)。

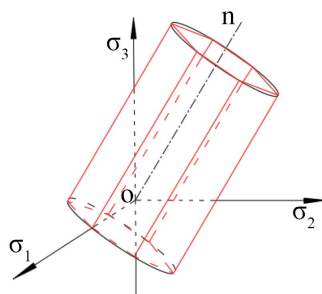


Figure 5. Yield locus in principal stress space  
图 5. 主应力空间中的屈服轨迹

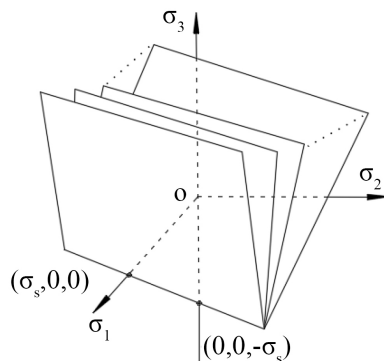


Figure 6. The plane family corresponding to the equation  $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$   
图 6. 方程  $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$  对应的平面族

初步分析式(3)可以发现并不能直接由其得到图 5 中六棱柱面轨迹, 对于图 5 中六棱柱面的建立过程, 相关教材中往往都是在详细描述完 Mises 圆柱面建立过程后, 以“……, 以同样方式建立 Tresca 屈服准

则的轨迹为“……”等描述方式一语带过, 对其建立过程并没有具体介绍, 学生往往对其建立感到不解。

以该问题为出发点, 启发学生对式(3)中隐含的条件进行分析。首先, 如果不考虑隐含的约束条件, 式(3)的 3 个表达式(如果省略绝对值符号, 实际上为六个表达式)分别对应的空间轨迹为六族平面, 以其中的表示式之一:  $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$  为例, 不考虑约束条件, 则其对应的轨迹为一族平面, 如图 6 所示, 该族平面的数量可以无限多, 其中每一个平面与坐标平面( $\sigma_1\sigma_3$ )的交线对应着方程  $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$ , 即与  $\sigma_1$  轴和  $\sigma_3$  轴的交点分别为  $(\sigma_s, 0, 0)$  和  $(0, 0, -\sigma_s)$  的直线。

再者, 考虑三个主应力分量  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  取值的排序, 假设主应力各分量之间的关系为  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , 即主应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为质点的最大和最小正应力, 则 Tresca 屈服准则对应的表达式则为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s \quad (4)$$

令

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{n}{m} \sigma_s \quad (n \leq m) \quad (5)$$

式中,  $m$  为正整数,  $n$  为自然数。

则

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 = \left[ \left( \frac{n}{m} \right)^2 + \left( 1 - \frac{n}{m} \right)^2 \right] \sigma_s^2$$

很容易证明

$$\left[ \left( \frac{n}{m} \right)^2 + \left( 1 - \frac{n}{m} \right)^2 \right] \leq 1$$

则

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \leq \sigma_s^2$$

在主应力空间中, 代入应力偏张量对应的矢量模长的表达式

$$\begin{aligned} |\overline{\text{mp}}| &= \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{3}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \end{aligned}$$

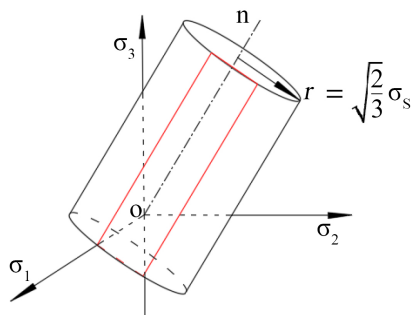
得到 Tresca 屈服准则在主应力空间的轨迹应满足

$$|\overline{\text{mp}}| \leq \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_s \quad (6)$$

式(6)表明式(4)对应的屈服轨迹应位于轴线为等倾线  $\overline{\text{on}}$ , 半径为  $r = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_s$  的圆柱内, 即位于 Mises 圆柱面上或其内部。在图 6 所示的平面族内, 只有其中一个与等倾线  $\overline{\text{on}}$  平行并且位于 Mises 圆柱面内的平面才能满足式(6), 该平面与 Mises 圆柱面的方位关系如图 7 所示, 图中的红色平面即为该平面。

最终, 基于上述分析结果, 式(3)对应着满足式(6)的主应力空间中 6 个平面, 其中的一个平面为图 7 中所示的平面, 由上述分析, 该 6 个平面只有都平行于等倾线  $\overline{\text{on}}$  并且位于 Mises 圆柱面内才能满足式(6), 式(3)对应的 6 个平面分别与  $\sigma_1\sigma_2$ 、 $\sigma_2\sigma_3$  和  $\sigma_1\sigma_3$  坐标面的交线方程依次为

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm \sigma_s; \quad \sigma_2 - \sigma_3 = \pm \sigma_s; \quad \sigma_1 - \sigma_3 = \pm \sigma_s \quad (7)$$



**Figure 7.** The  $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$  plane meeting the Tresca yield criterion (marked in red) and Mises cylinder surface

**图 7.** 满足 Tresca 屈服准则的  $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$  平面(标记为红色)及 Mises 圆柱面

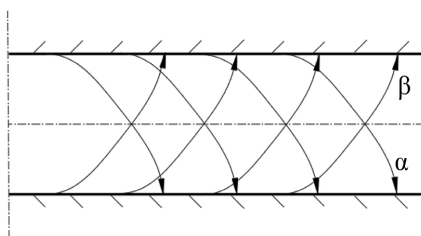
如图 5 所示,上述 6 个位于 Mises 圆柱面内的 6 个平面组成一个正六棱柱面(标记为红色),称为 Tresca 六棱柱面,即为主应力空间中的 Tresca 屈服准则对应的几何轨迹。

上述分析为启发学生对图 5 中的正六棱柱面的建立过程,以尝试解决教材中可能没有解决的问题。上述过程表明,由式(3)而建立起图 5 中正六棱柱面,需要一定的想象力和严谨的数学推理过程。

## 4.2. 平板压缩滑移线与速降线

利用滑移线法分析金属塑性变形过程的应力和应变等分布是塑性力学的重要内容,利用滑移线法首先需要建立变形金属的滑移线场,这也是滑移线法的难点,具有对称特征的金屬变形滑移线场往往具有明确的滑移线方程。对于材料成型及控制工程专业,往往受课时限制,不系统讲解滑移线场的建立,相关教材中通常也省略了具体滑移线建立的描述。通过引导学生对特殊滑移线方程建立的探索,可以培养学生的创新能力和探究精神。

如图 8 所示,为相关教材中经常出现的粗糙平板压缩金属变形的滑移线场分布示意图,在相关教材中只是告诉读者该滑移线为正交摆线。什么是摆线?为什么该滑移线为摆线?教材中没有具体的解释。在授课中,可引导学生对该问题展开研究。



**Figure 8.** Sliding trace distribution of metal compressed by rough plates

**图 8.** 粗糙平板压缩金属的滑移线分布

学生通过查阅文献资料,可以知道摆线即为圆摆线,为圆在沿直线滚动时圆周上的点运动轨迹,同时圆摆线也是著名的速降线或等时线,其形成过程及对应的参数方程如图 9 所示。追溯关于速降线方程的建立的历史,可以了解到在 17 世纪欧洲著名伯努利家族与牛顿、莱布尼茨等著名科学家在这方面的贡献。

由图 8 中的滑移线的对称性特征,可任取一条滑移线进行分析,如图 10 所示,为方便分析,建立如



图所示局部坐标系( $oxy$ )。

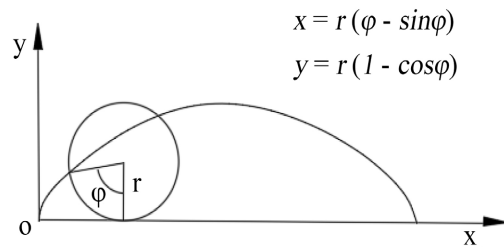


Figure 9. Formation and parametric equation of cycloid  
图 9. 圆摆线的形成及参数方程

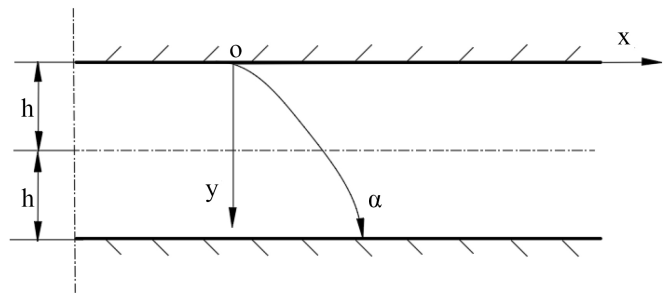


Figure 10. Selection of sliding trace  
图 10. 滑移线的选取

对图 10 中的滑移线  $\alpha$  轨迹进行分析, 可得到如下参数方程[8]

$$x = h(2\omega + \sin 2\omega) \quad y = h(1 - \cos 2\omega) \quad (4)$$

式中,  $\omega$  为滑移线上任意点的切线与  $x$  轴的夹角。将图 9 中的摆线参数方程与式(4)对比, 可以发现, 两者实际上是一致的, 则表明图 10 中的滑移线为一条圆摆线。

学生通过对图 8 中滑移线方程建立的探索, 拓展了知识视野, 加深了对授课内容的理解深度, 培养了批判精神和探究能力。

## 5. 结束语

在金属塑性成形原理授课中选取若干知识点, 分别以拓展学生的知识视野和培养学生的探究精神为出发点, 将部分知识点与科研工作及生产生活应用相结合, 使学生体会到专业知识的具体应用, 达到提高学生学习专业知识兴趣的目的, 同时针对教材中无具体推演过程的结论, 引导学生探索结论的建立过程, 以达到培养学生探究精神和创新能力的目的。

## 基金项目

沈阳航空航天大学本科教学改革研究项目(JG251103A4)资助。

## 参考文献

- [1] 李强, 于宝义, 李润霞, 等. “金属塑性成形原理”课程教学方法改革与实践[J]. 中国电力教育, 2010(25): 59-60.
- [2] 赵亚东, 郝安林. 《金属塑性成形原理》课程的教学探索[J]. 安阳工学院学报, 2011, 10(4): 95-97.
- [3] 钱绪政, 王利明, 黄锋, 等. 《金属塑性成形原理》课程的教学模式及应用效果探讨[J]. 技术创新, 2021, 42(6): 29-31.

- 
- [4] 韩奇钢, 梁策, 李义. 学生为中心的通专融合“塑性成形”教学体系构建[J]. 教育教学论坛, 2023(43): 129-132.
- [5] 王武荣, 丁悦婕, 韦习成, 赵杨洋. 虚拟仿真项目驱动“金属塑性成形原理”课程教学改革实践[J]. 科教文汇, 2021(32): 105-110.
- [6] 俞汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [7] Song, G.S., Chen, Q.Q., Zhang, S.H. and Xu, Y. (2015) Deformation Micro-Mechanism for Compression of Magnesium Alloys at Room Temperature Analyzed by Electron Backscatter Diffraction. *Materials and Design*, **65**, 534-542. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.061>
- [8] 程巩固. 矩形坯料平面变形滑移线法新解及其应用[J]. 大型铸锻件, 1998(1): 25-35.