

浅谈《冶金传输原理》课程思政元素的挖掘与融入

——以“边界层理论”教学为例

邵磊*, 罗志国, 曲迎霞, 李明明, 李海峰, 邹宗树

东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年5月7日; 录用日期: 2026年6月19日; 发布日期: 2026年6月30日

摘要

《冶金传输原理》是冶金工程专业的重要专业基础课程之一, 但课程内容涉及大量抽象概念介绍和数学公式推导。如何提升课程的思政育人活力与效能, 是当前亟待解决的难题。作为概念介绍和公式推导密度最高的章节, “边界层理论”教学的课程思政设计和实施难度最大。文章基于现有史料, 系统梳理边界层理论的创建历程, 进而提炼出一套可供“精准”融入的“原生”思政元素框架, 并就其具体实践提出路径建议, 以期为《冶金传输原理》一线教师, 特别是刚接手课堂教学任务不太久的青年教师, 提供一个可移植、可推广、可拓展的课程思政案例。

关键词

《冶金传输原理》, 流体力学, 边界层理论, 课程思政, 工程教育

On Element-Mining and Integration of Ideological and Political Education in *Principles of Transport Phenomena in Metallurgy*

—For the Teaching of “Boundary Layer Theory”

Lei Shao*, Zhiguo Luo, Yingxia Qu, Mingming Li, Haifeng Li, Zongshu Zou

School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang Liaoning

Received: May 7, 2026; accepted: June 19, 2026; published: June 30, 2026

*通讯作者。

文章引用: 邵磊, 罗志国, 曲迎霞, 李明明, 李海峰, 邹宗树. 浅谈《冶金传输原理》课程思政元素的挖掘与融入[J]. 创新教育研究, 2026, 14(6): 630-635. DOI: 10.12677/ces.2026.146468

Abstract

Principles of Transport Phenomena in Metallurgy (PTPM) is one of the crucial fundamental courses in metallurgical engineering. However, the course content involves a large number of abstract concepts and mathematical formula derivations, making it a significant challenge for instructors to enhance the vitality and effectiveness of its curriculum-based ideological and political education (CIPE). As the chapter with the highest density of conceptual introductions and formula derivations, the teaching of “Boundary Layer Theory” presents the greatest difficulty in designing and implementing CIPE. This paper systematically reviews the historical development of boundary layer theory based on existing historical materials, extracts inherent ideological and political elements suitable for precise integration, and proposes practical implementation pathways. It aims to provide a transferable, generalizable, and extensible teaching case for frontline instructors of PTPM, particularly for the early-career ones who are relatively new to classroom teaching.

Keywords

Principles of Transport Phenomena in Metallurgy, Fluid Dynamics, Boundary Layer Theory, Curriculum-Based Ideological and Political Education, Engineering Education

Copyright © 2026 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

《冶金传输原理》是冶金工程专业的重要专业基础课程之一，顾名思义，该课程的核心教学目标为使学理解并掌握冶金过程及系统内流动(动量传输)、传热(热量传输)、传质(质量传输)这三种高度类似故而具有相同数学描述的传输现象的基本原理与解析方法[1]，进而结合实践教学提升学生的工程素养和创新能力，培养出可堪支撑和引领我国冶金行业高质量转型发展重任的复合型拔尖人才。目前我国冶金类高校所开设的《冶金传输原理》大都是于上世纪 90 年代前后，根据当时学科专业发展及教育教学改革要求，将《流体力学》《传热学》以及《冶金传质原理》或其他相关课程整合而成的。经过 30 余年的改革与实践，已形成非常完善的《冶金传输原理》课程知识图谱及教学方法体系，当前正在着力探索数智赋能教学全过程的具体实施路径[2]-[4]。

另一方面，在全面推进“三全育人”和推动高等教育高质量发展的时代背景下，“课程思政”已成为落实立德树人根本任务的关键抓手[5]。其核心要义在于将思想政治教育的元素和目标如春风化雨般融入各类课程的教学之中，从而实现知识传授、能力培养与价值引领的有机统一。工程教育作为培养国家建设核心力量的主阵地，其课程思政建设的重要性尤显突出。《冶金传输原理》是冶金工程这门传统工科专业的基础(必修)课，责无旁贷地肩负着思政育人的重任。但必须承认的是，由于课程内容涉及大量抽象概念介绍和数学公式推导，《冶金传输原理》在思政元素的挖掘与融入方面貌似存在“先天性”缺陷。这种思维定势严重制约了思政育人的活力和效能，是所有授课教师必须解决的重要业务难题。

作为概念介绍和公式推导密度最高的章节，《冶金传输原理》动量传输篇“边界层理论”(Boundary Layer Theory)教学的课程思政设计和实施难度最大。除此之外，边界层理论不仅是动量传输的核心，同时也是对有流动流体参与的热量传输和质量传输进行数学表征的基础。因此，本文基于现有史料[6]-[8]，系

统梳理边界层理论的创建历程,进而提炼出一套可供“精准”融入的“原生”思政元素框架,并就其具体实践提出路径建议,以期作为《冶金传输原理》一线教师,特别是刚接手课堂教学任务不太久的青年教师,提供一个可移植、可推广、可拓展的课程思政案例。

2. 普朗特与边界层理论

边界层理论又称“普朗特边界层理论”,是德国学者普朗特(Ludwig Prandtl)于20世纪初独立提出并建立的。该理论具有划时代的重大意义,为之后的航空航天、机械、化工、气象等众多工程技术领域的飞速发展提供了坚实的理论根基,普朗特因此被誉为“现代流体力学之父”。为纪念普朗特,国际天文学联合会于1970年批准将月球背面南半部一座古老的大撞击坑(直径87.53公里,中心月面坐标 $59.62^{\circ}\text{S}/141.54^{\circ}\text{E}$)命名为普朗特(环形山)。普朗特的科研和育人活动几乎全部是在哥廷根大学(University of Göttingen)开展的,在此他亲手缔造了具有世界级影响力的“哥廷根应用力学学派”[7][9]。

2.1. 提出背景

18世纪,以欧拉(Leonhard Euler)、伯努利(Daniel Bernoulli)等人为代表的数学家们,基于无黏性(inviscid)、不可压缩(incompressible)流体假设,建立了一套优美和貌似完备的数学理论体系。欧拉方程能够精确描述流体的宏观运动,伯努利方程则揭示了流体速度与压力之间的内在联系。然而,这套理论在应用于实际问题时,却遭遇了灾难性的挫败。其中最为人们熟知的“证伪”困境便是“达朗贝尔悖论”(d'Alembert's Paradox)。根据无黏性、不可压缩流体假设,一个在均匀流场中作匀速运动的物体,其所受到的阻力恒为零。这一结论与人们日常生活中最直观的经验——无论是行船、投石还是风吹过建筑,都必然存在阻力——形成了尖锐的对立。这种理论与实际之间的巨大鸿沟直接将当时的流体力学撕裂为两个相对独立的分支。一个是理论流体力学(Theoretical Fluid Dynamics),由数学家主导,旨在求解优美的偏微分方程,但其结论往往无法为工程设计提供有效指导;另一个是实验水力学(Experimental Hydraulics),由工程师主导,主要是采用基于大量实验的经验公式来解决实际工程问题。这些经验公式虽然实用,但缺乏普适的理论基础,因而极大限制了预测能力和创新设计的可能性。

这种分裂状态持续了近一个半世纪,严重阻碍了流体力学作为一门统一科学的发展。人们普遍认识到,理论流体力学之所以“无用”,关键在于其忽略了流体的黏性。而描述黏性流体运动的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程虽然在19世纪中叶就已经建立,但由于其本质上属于复杂的对流扩散型二阶非线性偏微分方程组,在当时根本无法获得任何有实际意义的解析解。因此,流体力学界迫切需要一位天才,他能够从复杂的纳维-斯托克斯方程中抓住主要矛盾,提出一种既能反映流体黏性关键作用、又能在数学上得以处理的简化方法,从而架起连通理论流体力学与实验水力学的桥梁,使流体力学成为一门兼具严谨理论体系和强大工程应用能力的统一的成熟科学。普朗特正是在这样的背景下登上了流体力学界的历史舞台。

2.2. 建立过程

1904年,即将由汉诺威工学院(Technical University in Hanover)转赴哥廷根大学就职的普朗特参加了在海德堡(Heidelberg)举办的第三届国际数学家大会。他在会议现场报告了Über flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung [10] (On the motion of fluids with very little friction/论极小摩擦下的流体运动)一文,其中提出了“边界层”这一开创性创见。普朗特认为,对于大雷诺数(Reynolds number)流动,黏性的影响并非在整个流场中都微不足道以致可以忽略,而是集中在紧贴物体壁面的一个非常薄的流体层内,他将其命名为“边界层”。在边界层内,流体流速从壁面的零(无滑移条件)迅速增至外部主流速度,速度梯度极

大, 因此黏性力不可忽略。而在边界层之外的广大区域, 流体的黏性作用可以忽略, 所以其运动可以沿用既有的基于无黏性流体假设的欧拉方程描述。这种分区处理的精妙思想如同一把钥匙, 瞬间打开了桎梏流体力学近 150 年的枷锁, 实现了理论流体力学与实验水力学的统一, 使流体力学从此走上了高速发展的道路。

作为倡导并践行数理科学与应用科学必须紧密结合的工程科学先驱, 普朗特并不满足于仅仅提出一个物理概念。实际上, 他的边界层理论中最闪耀的光芒在于将一个抽象概念合理转化为可供分析和计算的具体数学模型。通过结合边界层很“薄”(为“小量”)这一核心特征与量级分析法(Order-of-Magnitude Analysis), 普朗特对纳维-斯托克斯方程中的所有物理量及其偏导数进行了量级排序, 然后舍去小量项, 最终得到了相较纳维-斯托克斯方程而言大大简化的边界层微分方程, 使其理论求解成为可能。在 1904 年的会议论文中, 普朗特基于其大量实验得到的边界层内流体流速分布相似这一深刻洞见, 创新性地引入了一个同时包含二维坐标的相似性变量, 进而(粗略)求解边界层微分方程, 得到了平板(层流)绕流问题的摩擦阻力估算式, 其中的常数系数约为 1.1。虽然采用系数为 1.1 的估算式计算得到的摩擦阻力与实验结果仍存在较大偏差, 但这篇仅有 8 页的会议论文在历史上首次直接回应了达朗贝尔悖论。

普朗特深刻意识到精确估算摩擦阻力对边界层理论后续发展的至关重要性, 就职哥廷根大学后便接收了由数学系转投而来的博士生布拉修斯(Paul Richard Heinrich Blasius), 并安排其对边界层微分方程进行更为精确的求解。布拉修斯没有让导师失望, 他在引入相似性变量的基础上, 进一步考虑一个指数级数形式的速度分布相关函数, 最终成功得到了常数系数为 1.328 的摩擦阻力估算式, 其计算值与实验结果高度吻合[11][12]。至此, 理论流体力学第一次能够合理解释并定量计算真实世界中的阻力, 达朗贝尔悖论被彻底破解。

为进一步完善边界层理论, 哥廷根应用力学学派的学子们继续开展了大量研究工作。例如, 针对布拉修斯所得结果仅适用于层流条件的局限, 普朗特的学生冯·卡门和波尔豪森(Karl Pohlhausen)于 1921 年提出了对流体流动状态通用的边界层微分方程的积分方法[13][14], 后人称由该方法得到的结果为冯·卡门-波尔豪森近似解, 而布拉修斯的结果为布拉修斯精确解。又如, 对于中等以下雷诺数流动, 边界层厚度为小量的条件不能成立, 故边界层微分方程不再适用。冯·卡门的学生, 我国著名力学元勋郭永怀于 1953 年从纳维-斯托克斯方程出发, 求出了平板绕流的二阶近似解, 进而得到了中等雷诺数条件下的摩擦阻力估算式[15]。

2.3. 历史地位

边界层理论最伟大的历史功绩, 在于它以一种前所未有的方式, 将看似水火不容的理论流体力学与实验水力学完美地统一起来, 宣告了现代流体力学的诞生。从科学技术史的角度来看, 边界层理论不仅解决了阻力之谜, 还深刻揭示了一系列此前无法理解的关键流动机理, 其中一些至今仍是流体力学研究的核心, 使得飞行器和交通工具的减阻设计从“经验艺术”变成了“科学工程”。例如, 边界层理论明确区分了物体绕流时两种主要的阻力来源。一是摩擦阻力, 源于流体黏性在物体表面产生的剪切应力; 二是压差阻力(又称形阻), 由物体前后表面因边界层分离等造成的压力分布不均所致。这为分别计算两种阻力奠定了基础。又如, 当流体沿物体表面流向压力升高的区域(即逆压梯度区)时, 边界层内的流体动能会逐渐消耗。当靠近壁面的流体动能不足以克服逆压梯度时, 流动就会从壁面剥离, 形成回流区和尾迹。这种流动分离是导致阻力剧增的根本原因。边界层理论为预测流动分离转捩点的位置和控制手段提供了科学指导。

总而言之, 在边界层理论问世之前, 流体力学是割裂的、经验性的、部分失效的。在其之后, 流体力学变成了一门统一的、理论与实践紧密结合的、具有强大预测能力的现代科学, 逐渐孕育出计算流体力

学、湍流大涡模拟、高超声速空气动力学等无数分支，形成了完整的学科版图。尽管这些分支目前已取得长足进步，但边界层内复杂多变的物理现象仍存在大量未解之谜。对边界层的探索远未结束，对边界层理论的完善还在继续。毫无疑问，边界层理论将继续作为一门充满活力的基础科学，在所有涉及流体流动的工程科学领域中，扮演着不可或缺的关键角色。

3. 思政元素挖掘与实践

通过以上梳理可以发现，边界层理论本身是一个完整的科学研究过程的缩影，它包含了发现问题、分析问题、提出假设、建立模型、数学求解、实验验证等一系列核心环节，在当时代表了一种全新的开创性研究范式，这种范式至今仍是工程科学领域研究的“黄金法则”。以边界层理论为支点建立的哥廷根应用力学学派倡导理论分析、精巧实验和工程应用紧密结合的人才培养模式，更是对世界科学界产生了深远影响。如此丰硕的思想遗产和教育贡献，为我们系统性地挖掘思政元素提供了不可多得的“宝藏”。

3.1. 思政元素框架

1) 家国情怀：普朗特开展的研究与当时他的祖国德国发展航空事业、提升国家竞争力的迫切需求紧密相关。他缔造的哥廷根应用力学学派中，更是不乏如前所述的中国流体力学先驱，他们饱含浓厚家国情怀，始终将个人所学与国家需要无私结合。例如，普朗特唯一的女博士生和关门弟子陆士嘉学成后毅然归国，在新中国一穷二白的基础上参与创建了北京航空学院(今北航)，并亲自设计建造了中国第一座大型风洞，为我国航空事业培养了大批栋梁之才[16]。普朗特的学生冯·卡门的弟子钱学森、郭永怀、钱伟长的伟大事迹更是为大众熟知。

2) 科学精神：在理论流体力学(无黏)与实验水力学(经验公式)长期脱节的背景下，普朗特没有像大多数人一样或选择绕行、或满足于经验公式，而是直面问题根源，对“无黏”这一基本假设的普适性提出了深刻质疑。他基于细致的实验观察和深刻的物理直觉，创造性地提出了“边界层”这一开创性概念。这种敢于挑战科研“无人区”、执着追求事物本质的科学精神值得所有人敬佩和学习。

3) 哲学思辨：普朗特敏锐地洞察到，流体黏性效应虽小，但却集中在壁面附近薄层内，成为决定阻力的关键；而外部广袤流场则可忽略黏性影响，符合传统“无黏”假设。这样就将一个难以解决的复杂问题分解为多个可以分别处理的、相对简单的问题。在信息爆炸的时代，这种“抓住主要矛盾、分区处理”的哲学思辨能力正是卓越工程师所必需的核心素养。

3.2. 实践路径建议

在边界层理论教学课程思政的具体实践中，有以下路径供任课教师参考。

1) 案例贯穿：将前述故事线(历史背景、矛盾、突破、应用、传承)作为暗线，与边界层理论的知识明线(概念、假设、方程、求解等)同步讲解，提升课堂教学的趣味性。

2) 方法显化：明确总结和强调“发现问题、分析问题、提出假设、建立模型、数学求解、实验验证”这一科学研究范式，引导学生将其作为分析其他科学理论和将来开展科学研究的思维工具。

3) 价值引领：在介绍理论工程应用(特别是摩擦阻力计算)和学科发展时，自然引出其对于国家和行业的重大意义，激发学生的专业自豪感和使命感。

4) 讨论反思：设计课堂讨论或课后思考题，如“从边界层理论的创立看创新思维的特点”、“谈谈哥廷根应用力学学派学术传承给你的启示”等，引导学生主动思考和内化思政元素。

5) 效果评价：设计对照组，通过前后测问卷、课堂观察、学生访谈等方式收集数据，对教学效果进行量化与质化相结合的分析评价，从而为方案的进一步改进完善提供支撑。

4. 结束语及展望

本文针对“边界层理论”这一高度抽象和数学化的教学内容，系统梳理了该理论的创建历程，进而提炼出一套可供“精准”融入的“原生”思政元素框架，并就其具体实践给出了路径建议。我们相信，只要能够勤于钻研、善于总结，一定可以由点及面、发散拓展，最终让《冶金传输原理》这门“硬核”专业基础课展现出培育学生健全人格、激发使命担当的独特魅力，真切做到让思政教育如盐在水，自然地溶解于专业知识的海洋之中，使学生在探求科学真理的道路上，自觉地树立起正确的世界观、人生观和价值观，成长为担当民族复兴大任的时代新人。

进一步的教学改革和课堂实践中，将挖掘更具个性化和深度的思政切入点，同时系统梳理科学史教育(HPS)、工程伦理教育以及课程思政的相关理论，将本文的实践探索与更宏大的理论框架相结合。另外，也会总结撰写具体的教学实施细节，包括具体的时间分配、故事讲述的切入点、讨论题目的设计、预设的学生反应及应对策略等。

基金项目

本文系教育部学位与研究生教育发展中心 2025 年度工程案例项目(GC-2510145001)衍生成果。

参考文献

- [1] 邹宗树, 邵磊. 过程冶金中的传输现象[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2024: 1-2.
- [2] 任萌萌, 赵俊学, 李小明, 等. CFD 仿真应用于冶金传输原理课程案例教学[J]. 中国冶金教育, 2021(6): 58-59, 64.
- [3] 姜东滨, 任英, 杨文, 等. 冶金传输原理教学中的数学建模[J]. 中国冶金教育, 2025(1): 64-65, 69.
- [4] 焦璐璐. 数值模拟仿真技术在“冶金传输原理”教学中的运用探究[J]. 教育教学论坛, 2025(50): 145-148.
- [5] 张倩倩, 樊晓燕, 张婷. 新工科课程思政教学改革探索与思考[J]. 高教学刊, 2025, 11(4): 47-50.
- [6] Eckert, M. (2019) Ludwig Prandtl: A Life for Fluid Mechanics and Aeronautical Research. Springer, 115-231.
- [7] (美)冯·卡门, 李·埃德森. 冯·卡门-航空航天时代的科学奇才[M]. 曹开成, 译. 上海: 复旦大学出版社, 2019: 82-90.
- [8] (德)乔汉娜·沃格尔-普朗特. 普朗特传-回忆和信札中的普朗特[M]. 孙博华, 等, 译. 北京: 高等教育出版社, 2022: 117-137.
- [9] Zhang, Z.H. (2023) Emigration or Return? International Mobility and Theodore Von Kármán's Chinese Students and Associates. *Notes and Records: the Royal Society Journal of the History of Science*, 77, 605-646. <https://doi.org/10.1098/rsnr.2022.0017>
- [10] Prandtl, L. (1904) Über flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. *International Mathematics Congress, Heidelberg*, 8-13 August 1904, 574-584.
- [11] Blasius, H. (1908) Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*, 56, 1-37.
- [12] Hager, W.H. (2003) Blasius: A Life in Research and Education. *Experiments in Fluids*, 34, 566-571. <https://doi.org/10.1007/s00348-002-0582-9>
- [13] Kármán, T.V. (1921) Über laminare und turbulente Reibung. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1, 233-252. <https://doi.org/10.1002/zamm.19210010401>
- [14] Pohlhausen, K. (1921) Zur näherungsweise Integration der Differentialgleichung der laminaren Grenzschicht. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1, 252-290. <https://doi.org/10.1002/zamm.19210010402>
- [15] Kuo, Y.H. (1953) On the Flow of an Incompressible Viscous Fluid Past a Flat Plate at Moderate Reynolds Numbers. *Journal of Mathematics and Physics*, 32, 83-101. <https://doi.org/10.1002/sapm195332183>
- [16] 张克群. 飞: 流体力学家陆士嘉[M]. 北京: 现代出版社, 2006: 38-45.