

# 焊接热效应

● 温度场

● 残余应力

● 变形

〔德〕 D. 拉达伊 著

机械工业出版社



# 焊 接 热 效 应

## 温 度 场、残 余 应 力、变 形

[德] D. 拉达伊 著

戴姆勒-奔驰公司高级研究经理  
不伦瑞克工业大学机械工程学教授

熊第京 郑朝云 史耀武 译  
关 桥 审校



机 械 工 业 出 版 社

015.101  
本书版权登记号: 图字 01-95-730

Authorized translation of the German edition

Dieter Radaaj, Wärmewirkungen des Schweißens; Temperaturfeld,  
Eigenspannungen, Verzug

©Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1988

Authorized translation of the English edition

Dieter Radaaj, Heat effects of welding; temperature field, residual  
stress, distortion

©Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1992

图书在版编目 (CIP) 数据

焊接热效应温度场、残余应力、变形/[德] D. 拉达伊著; 熊第京等译  
.-北京: 机械工业出版社, 1997.7

ISBN 7-111-05540-3

I. 焊… II. ①拉…②熊… III. ①焊接-温度场②焊接结构-残余应力  
③焊接结构-变形 IV. TG40

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 02761 号

出版人: 马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)

责任编辑: 武江 版式设计: 张世琴 责任校对: 张佳

封面设计: 姚毅 责任印制: 王国光

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1997年7月第1版第1次印刷

850mm×1168mm 1/32·12.75印张·3插页·315千字

0 001—3 000 册

定价: 32.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

## 序

D. 拉达伊教授已是中国焊接界熟习的著名专家。他继 1988 年完成这本书德文版和在 1992 年完成英文版的出版工作之后,又于 1996 年在几位中国学者——熊第京、郑朝云和史耀武的协助下,与中国机械工业出版社共同完成了此书的中译本出版工作,值得庆贺。几位中国学者准确的专业翻译与严谨的文字推敲,把这部著作完整地奉献给中国读者,从而使这本书的读者范围大为扩展。从这个意义上来说,D. 拉达伊教授的这部著作在国际焊接界的影响是不言而喻的。

在审校此书的中文译稿过程中,能有机会仔细地品评作者编写这本书的构思和内容设计。现将该书的特点概括如下,以飨读者。

这本书是 D. 拉达伊教授多年教学耕耘的结晶。他以渊博的学识,把这一多学科交叉的、千头万绪的和千变万化的在焊接过程中发生的动态的热物理、冶金、力学过程表述得深入浅出;在书中并没有抽象的理论演绎,也免去了繁琐的公式推导;读起来通俗易懂。

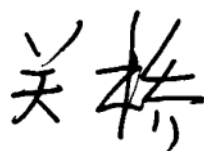
这本书是 D. 拉达伊博士多年从事工程研究的成就。特别是作为除生产各种汽车外亦生产机车及飞机的戴姆勒-奔驰公司研究部高级科研经理,使之有机会接触许多焊接实际问题。他以深广的学术造诣,力图把经验的、定性的技术知识用定量的方法来表达。焊接就其学科范畴而言,是一门专业科学;但就其工程应用来说,是一项制造技术。在过去半个世纪中,焊接,无论是作为科学,或是作为技术,在学术研究和工程应用实践中,都有了长足的进步。过去,一些依靠定性概念传授的焊接知识和操作技能,在这本书中则得以立足于最新的科研成果(如引入计算机数值

分析技术)给出定量的评估与指导,以期更科学地解决工程实际问题。

这本书又是 D. 拉达伊教授多年参加国际焊接学会(IIW)学术交流的成果。他以博采众长的学风,客观地总结和科学地归纳整理了过去半个世纪各国学者在这一绝无仅有的国际学术舞台上所作出的贡献。我有幸从 1964 年第一次参加国际焊接学会的学术会议以来,尤其是在第 X 专业委员会(原名:残余应力、应力消除与脆断,现名为焊接接头在结构中的行为及断裂防止)的学术交流中,关注了有关“焊接热效应”这一领域的发展;值得庆幸的是,这本书提炼了在这方面各国专家所取得的成就和最近进展。这也正是该书会拥有更为广泛的国际影响的原因所在。

我谨代表我国的焊接界同行们,对于 D. 拉达伊教授为本书的中译本问世所作的努力表示感谢。愿这本书能在促进我国焊接科技事业的发展和在加强中德科技与文化交流中发挥应有的作用。

中国工程院 院士  
国际焊接学会学术委员会 委员(1996~1999)  
国际焊接学会(IIW) 副主席(1992~1995)



1996 年 11 月 22 日

## 中译本序

焊接过程的热效应包括焊件上的不稳定温度场、材料的显微组织变化，残余应力和变形。焊接工程师对这些效应控制的程度决定了该结构可焊与否。焊接性受到设计、材料和制造工艺的影响。到目前为止，焊接工程技术人员大多还是在经验的基础上通过焊接试验来研究焊接性问题。近年来，在热力学、连续介质力学和显微组织动力学基础上理论工作的发展，使得采用更科学的方法来研究焊接性问题成为可能，并且还可以越来越多地运用定量计算来替代定性分析，其中包括与焊接性有关的设计、材料和焊接工艺的优化。

本书的内容即建立于上述科学方法的基础之上，从温度场分析出发，处理残余应力和变形问题，然后为实际从事这方面工作的工程技术人员提供了减小焊接残余应力和变形的有效措施。最开始的一章介绍了本书的研究领域。最后一章评述了焊接对结构强度的效应。

本书的德文原版发行于1988年。最新的英译本随后于1992年出版。令我非常高兴的是，现在中译本又即将问世，我藉此机会向这一具有高度发达的古老文明和美好发展前景的伟大国家中的专家和学生们的致意。引入先进技术并使之适应于自己国家的经济和社会条件将是中国未来繁荣、昌盛的关键，愿很快就要完成的本书中译本能在中国的现代化进程中做出贡献。

我衷心地感谢潘际銮院士(南昌大学)，数年前在我首次出版《焊接结构疲劳强度》中译本时他热心地将我介绍给中国机械工业出版社。我同样感谢苏毅教授(清华大学)的支持，他对本书英文版进行了认真的评价。我真挚地感谢本书的译者熊第京教授(北京工业大学)、郑朝云副教授(重庆交通学院)和史耀武教授(北京工

业大学), 他们的技巧和努力在帮助中国读者理解本书的内容方面将有决定性的作用, 我肯定他们没有丢失原著的任何细节。非常感激关桥院士为本书所写的序言及对中译本全文的审校, 他在这一领域的学术成就是国际闻名的。我在斯图加特的前任科研助手张式程博士核对了本书的最后校样并给予我许多有关中译本事务的宝贵建议。此外, 和中国机械工业出版社的友好合作也总是令人愉快的。还应提及的是, 每次和中国机械工业出版社的友好合作都令我感觉非常愉快。

*Dieter Raday*

斯图加特, 1997 年 1 月 8 日

## 原 序

几乎所有的焊接方法都采用集中的能源，并在能量向别处扩散、传播之前，就使接头处的材料局部熔化或软化。尽管在过去的 40 年里，以瞬时热流为控制因素的综合分析方法的研究不断取得进展并发表了研究成果，而归纳这些成果并将它们浓缩在一本教科书内的任务却异常困难。由于这类著作比较缺乏，使得焊接工程师们对这些强有力的设计分析工具得不到充分运用。

近十年来，拉达伊(Dieter Radaj)博士一直准备来满足这方面的需要。他作为最早的研究者、教师，与斯图加特大学 Argyris 教授合作，以其丰富的经验，在航空器和电站结构方面，致力于发展应力分析的有限元方法。新近，又作为戴姆勒-奔驰公司(Daimler-Benz Corp.)的专家顾问，从事上述领域及汽车结构等方面的工作。此书的德文版问世于 1988 年，现在奉献的修订后的英文版将更显著增加这本书的使用价值。

具有闭式解的矩阵简便了对瞬时热流的研究，精通这些知识可以对许多问题以简明而透彻的理解，如对熔化焊输入功率的要求，焊接速度和熔化宽度及熔化后的冷却速率等。对这些核心知识融会贯通后，焊接工程师即可针对任何新的工程应用、如不同几何形状或材料的构件，很快地选择或优化适宜的工艺，而不必耗费长时间的试验。本书的第 2 部分清晰、详尽地介绍了这些方面。

尽管集中的热作用在稳定焊接过程特性方面有许多有利的影响，但瞬时温度分布和热膨胀确是导致所有焊接接头均会产生孪生问题的根源，即残余应力和变形。正是在这一领域，有限元与之相匹配的数值分析方法盛行起来，通过计算即可给出三个连续的状态，即温度随时间的分布、弹性热应力和塑性变形。最终

留下的残余应力对薄板构件的失稳、翘曲和厚截面的裂纹倾向有重要的影响。在第3部分，拉达伊博士给出了有关这些影响的适宜的综合处理，不仅提供了带有许多结果的预测方法，而且也给出了为达到验证目的的实验测量结果。本书的第4部分阐述了更为重要的方面，用热和力的措施来稳定和减小残余应力，用合理的接头设计来减小变形等。在这些方面，从世界范围多年来提交国际焊接学会第X专业委员会的论文中进行了选择和概述。国际焊接学会第X专业委员会的专业范围正是，残余应力；应力消除；脆性断裂。

可以毫不犹豫地说，作者奉献了一部有永恒价值的优秀著作，具有无可挑剔的功效和完整性，优于用其它方法由某一编写委员会编著的参考书。那些掌握了本书内容的焊接工程师将会发现，他们获得了一种无价的工具，用以增强自己的专业能力。我想他们也会共同表示向拉达伊博士致谢，感谢他完成了创建上述工具的任务。

A. A. Wells

国际焊接学会 第X专业委员会 主席(1978~1990)

## 前 言

焊接是将金属材料连接成构件的最重要的方法。无论添加或不添加填充金属(包括表面堆焊焊缝),大多数焊接过程的技术核心是被连接表面的熔化,随后是连续地冷却。局部热输入形成局部熔化,同时尽可能的减少向构件内部的热扩散和向周围环境的热散失。

局部加热的效应包括:焊接熔池和焊道或焊核形状的形成;焊缝不完整性和缺陷的产生;主要在部分熔化区中的热裂纹和冷裂纹的萌生(被氢的扩散加剧);与硬化或软化有关的母材焊接热影响区的显微组织变化;以及主要对强度有不利影响、在整体结构内产生的残余应力和变形。

上述现象构成了被称为“焊接性”的概念,它是受设计、材料和制造方法影响的被焊结构的一种特性。长期来,焊接性的研究主要建立在以焊接试验为主的经验基础上。然而,近年来,在热力学、连续介质力学和显微组织动力学等方面的理论发展,已使更系统的研究成为可能。其中包括与焊接性有关的设计、材料和焊接工艺的优化。这种基于理论和数学的系统研究被称为“焊接性分析”。

在此系统研究的基础上,本书的内容从温度场出发;在温度场的基础上处理残余应力和变形问题;以提供给专业人员所需的减小上述问题的措施为终结。开始的一章介绍了本书涉及的主要领域,最后一章评述焊接对强度的影响。

此书以本人在不伦瑞克工业大学的系统讲义为基础,更多的研究结果是在戴姆勒-奔驰公司工作的内容。英文稿由 Hedwig Schiebel 仔细打印完成,插图由 Helga Schmidt 精确地用墨水绘

制, Shicheng Zhang (张式程) 协助校对文稿, 感谢所有上述人员的支持。还特别地感激 Alan Wells 为本书所写的有鉴别力的序言。

D. 拉达伊  
斯图加特, 1992 年 4 月

# 符 号 表

此表列出了本书中公式、图表和正文应用的各种符号,先按拉丁字母、然后按希腊字母顺序排列,大写体字母总列在前面,小写体字母在后,在同一字母组中具有相同量纲的参数顺序相连排列在一起。

因为本书汇集的工程科学的多个领域有不同的习惯,故未能完全采用可辅助读者理解和领会的统一的标志法。

某些符号仍被赋予了不同功用而多次使用,希望不致错用;如果其意义不同,则将它们分开排列,如其意义相似(近),就将它们排在同一行里。

仍然保留了从前的符号  $\sigma_y$ ;  $\sigma_{0.1}$ 、 $\sigma_U$ , 而没有用新的标准符号  $R_e$ 、 $R_{p0.1}$ 、 $R_m$  代替,这是因为前者和应力符号一致,因此较为贴切。

|               |                              |                           |
|---------------|------------------------------|---------------------------|
| $A$           | $[\text{mm}^2]$              | 梁、杆、或板的横截面积               |
| $A_w, A_{wm}$ | $[\text{mm}^2]$              | 焊缝或焊道的横截面积,在模型中焊缝或焊道的横截面积 |
| $A_l$         | $[\text{mm}^2]$              | 翼板的横截面积                   |
| $A_e$         | $[\text{mm}^2]$              | 焊条(电极)的横截面积               |
| $A_d, A_m$    | $[\text{mm}^2]$              | 熔敷金属、熔化金属的横截面积            |
| $A$           | $[\text{mm}^2/\text{N}]$     | 残余应力解中的参数(图 110)          |
| $A$           | $[\text{mm}^2/\text{N}]$     | 应变计算式中的参数〔式(198)〕         |
| $A^*$         | $[\text{mm}^2/\text{N}]$     | 修正后用于应变仪的上述参数             |
| $A$           | $[1/\text{s}]$               | 材料蠕变特性〔式(238)〕            |
| $a, a^*$      | $[\text{mm}^2/\text{s}]$     | 热扩散率,参考材料中的热扩散率           |
| $a, a_0$      | $[\text{mm}]$                | 焊缝厚度,根部焊道厚度               |
| $a_1$         | $[\text{mm}]$                | 角焊缝焊脚长度                   |
| $a, a^*$      | $[\text{mm}]$                | 在 $x$ 正、负方向卵形面的半轴         |
| $a_l$         | $[\text{mm}]$                | 试样和胶片间的距离                 |
| $a$           | $[\text{mm}^2/\text{N}]$     | 材料蠕变特性〔式(238)〕            |
| $B$           | $[\text{mm}^2/\text{N}]$     | 应变计算式中的参数〔式(199)〕         |
| $B^*$         | $[\text{mm}^2/\text{N}]$     | 修正后用于应变仪的上述参数             |
| $B$           | $[(\text{mm}^2/\text{N})^n]$ | 材料的蠕变特性〔式(232)〕           |

|                  |                                      |                            |
|------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| $b, b^*$         | [1/s]                                | 板材和杆材的传热系数                 |
| $b$              | [mm]                                 | $y$ 方向卵形面的半轴               |
| $C_0$            | [J/mm <sup>2</sup> sK <sup>4</sup> ] | 热辐射系数                      |
| $[C_T]$          | [J/K]                                | 热容量矩阵                      |
| $dC^*$           | [-]                                  | 微分系数〔式(133)〕               |
| $C$              | [N/mm <sup>2</sup> ]                 | 材料的硬化特性〔式(125)〕            |
| $C$              | [-]                                  | 材料的蠕变特性〔式(235)〕            |
| $C$              | [cm <sup>3</sup> /100g]              | 氢的浓度                       |
| $c$              | [J/gK]                               | 比热容                        |
| $c$              | [mm]                                 | $z$ 方向卵形面的半轴               |
| $c$              | [-]                                  | 碳含量                        |
| $D$              | [mmN]                                | 板材弯曲(抗弯)刚度                 |
| $D$              | [1/s]                                | 材料的蠕变特性〔式(234)〕            |
| $D$              | [cm <sup>2</sup> /s]                 | 氢的扩散系数                     |
| $d$              | [mm]                                 | 直径                         |
| $d_0$            | [mm]                                 | 恒密度热源直径或钻孔的直径              |
| $d_n$            | [mm]                                 | 正态分布热源的直径                  |
| $d_e$            | [mm]                                 | 焊条芯直径                      |
| $d_c$            | [mm]                                 | 焊条药皮直径                     |
| $d_{150}$        | [mm]                                 | 加热到 150℃ 区域的直径             |
| $d_r$            | [mm]                                 | 轧辊直径(或滚轮直径)                |
| $d_A$            | [Å]                                  | 晶格(或结晶点阵)内原子的晶面间的距离        |
| $E, E^*$         | [N/mm <sup>2</sup> ]                 | 弹性模量, 参考材料中的弹性模量           |
| $E_0, E_{20}$    | [N/mm <sup>2</sup> ]                 | 0 或 20℃ 时的弹性模量             |
| $E_i(-u)$        | [-]                                  | 积分指数函数〔式(42)〕              |
| $E_T$            | [N/mm <sup>2</sup> ]                 | 温度为 $T$ 时的弹性模量             |
| $e$              | [mm]                                 | 偏心距, 与重心之间距离               |
| $e^*$            | [mm]                                 | 焊点或定位焊段之间的间距               |
| $e$              | [-]                                  | 欧拉常数( $e=2.7183$ ), 自然对数的底 |
| $F$              | [N]                                  | 拉力                         |
| $F_s, \bar{F}_s$ | [N]                                  | 纵向收缩力, 有效收缩力               |
| $F_{st}$         | [N]                                  | 横向收缩力                      |

|              |                         |                           |
|--------------|-------------------------|---------------------------|
| $F_{st}^*$   | [N/mm]                  | 焊缝单位长度上的横向收缩力             |
| $F_r$        | [N]                     | 滚轮压力                      |
| $\Delta F$   | [N]                     | 力值的范围或力值幅度的两倍             |
| $F$          | [1/s <sup>m</sup> ]     | 材料的蠕变特性〔式(233)〕           |
| $f(\sigma)$  | [-]                     | 与应力相关的蠕变函数                |
| $G$          | [N/mm <sup>2</sup> ]    | 切变模量                      |
| $G$          | [-]                     | 材料的蠕变特性〔式(234)〕           |
| $g(t)$       | [-]                     | 与时间相关的蠕变函数                |
| $g$          | [mm/s <sup>2</sup> ]    | 自由落体加速度                   |
| $H, H_0$     | [N/mm <sup>2</sup> ]    | 硬化模量, 0℃时的硬化系数            |
| $\Delta H$   | [J/kmol]                | 蠕变激活能                     |
| $H_p$        | [-]                     | Holloman-Jaffe 指数〔式(228)〕 |
| $H_v$        | [cm <sup>3</sup> /100g] | 氢源(陷阱)密度                  |
| $h$          | [mm]                    | 板、壳、焊缝、焊道的厚度, 型材、翼板的高度    |
| $h_m$        | [mm]                    | 模型中上述各种厚度                 |
| $h_{rb}$     | [mm]                    | 加强肋高度                     |
| $h_{tot}$    | [mm]                    | 板材总厚度                     |
| $h_{wb}$     | [mm]                    | 腹板厚度                      |
| $h_{fl}$     | [mm]                    | 翼板厚度                      |
| $h_0$        | [mm]                    | 杆的初始高度, 盲孔的深度             |
| $\Delta h$   | [mm]                    | 卸载层的高度                    |
| $h_d$        | [mm]                    | 堆敷焊道的高度                   |
| $h_m$        | [mm]                    | 熔化金属或焊接熔池的深度              |
| $h_m^*$      | [mm]                    | 深熔焊缝时的上述深度(图 54 和 55)     |
| $h_t$        | [mm]                    | 翼缘距弯曲中心线的距离               |
| $h_{te}$     | [mm]                    | 拉力(拉伸)区的高度(图 165)         |
| $h_r$        | [mm]                    | 焊缝的余高                     |
| $h_l$        | [mm]                    | 板材的临界厚度〔式(93)、(97)和(173)〕 |
| $h_1, h_2$   | [mm]                    | 多层焊缝的总厚度(图 196)           |
| $h_1', h_2'$ | [mm]                    | 多层焊缝的总厚度(图 196)           |
| $h(T)$       | [-]                     | 与温度相关的蠕变函数                |

|                     |                          |                            |
|---------------------|--------------------------|----------------------------|
| $I$                 | $[\text{mm}^4]$          | 惯性矩                        |
| $I_y, I_z$          | $[\text{mm}^4]$          | 相对于 $y$ 轴和 $z$ 轴的惯性矩       |
| $I, I_{\text{eff}}$ | $[\text{A}]$             | 电流、有效电流                    |
| $i_m$               | $[\text{J/g}]$           | 单位质量熔化物质的热含量,即单位质量的焓       |
| $\Delta i$          | $[\text{J/g}]$           | 单位质量热含量的变化,即单位质量焓的变化量      |
| $i$                 | $[-]$                    | 数的序列,对于张量指数, $i=1, 2, 3$   |
| $i$                 | $[-]$                    | 焊道数(图 196)                 |
| $j$                 | $[-]$                    | 数的序列,对于张量指数 $j=1, 2, 3$    |
| $j$                 | $[-]$                    | 焊道数(图 196)                 |
| $j$                 | $[\text{A/mm}^2]$        | 焊条芯(或电极)横截面上的电流密度          |
| $K$                 | $[\text{N/mm}^2]$        | 压缩(弹性)模量                   |
| $K_1$               | $[\text{mm}^2/\text{N}]$ | 相变塑性因子〔式(128)〕             |
| $K$                 | $[-]$                    | 材料的蠕变特性〔式(236)〕            |
| $[K_T]$             | $[\text{J/sK}]$          | 热传导矩阵                      |
| $K_{1c}, K_{1c}^*$  | $[\text{N/mm}^{3/2}]$    | 断裂韧度,参考材料的断裂韧度             |
| $K_0(u), K_1(u)$    | $[-]$                    | 第二类 and 零阶或一阶修正贝塞尔函数       |
| $k, k_1, k_2, k_3$  | $[1/\text{mm}^2]$        | 正态分布热源的集中系数                |
| $k$                 | $[\text{J/mm}^3]$        | 比例系数〔式(143)〕               |
| $k^*$               | $[-]$                    | $\Delta t_{8/5}$ 的几何条件修正系数 |
| $k_t$               | $[-]$                    | 电弧燃烧时间系数〔式(104)〕           |
| $k_m$               | $[-]$                    | 测量误差的修正系数〔式(104)〕          |
| $k$                 | $[-]$                    | 压曲的几何因子〔式(187)〕            |
| $k_b$               | $[-]$                    | 反翘系数〔式(181)〕               |
| $k_n, k_i$          | $[-]$                    | 多道焊和断续焊的修正系数               |
| $l$                 | $[\text{mm}]$            | 焊缝的长度,板、壳、带的长度,应变长度        |
| $\Delta l$          | $[\text{mm}]$            | 板材的伸长,杆件的长度,纵向收缩           |
| $l_{pl}$            | $[\text{mm}]$            | 塑性区的长度                     |
| $l_{s1}, l_i$       | $[\text{mm}]$            | 断续焊道的长度或间距长度               |
| $l_w, l_w^*$        | $[\text{mm}]$            | 焊缝的长度,焊接熔池长度               |

|              |                      |                                     |
|--------------|----------------------|-------------------------------------|
| $l_c$        | [mm]                 | 焰心的长度                               |
| $l_e$        | [mm]                 | 焊丝(电极)的伸出长度                         |
| $l^*$        | [mm]                 | 加热带的长度                              |
| $l_t$        | [mm]                 | 过渡区与热源的距离                           |
| $l_e, l_c$   | [mm]                 | 槽内焊缝末端的长度, 中心截面的长度(3.3.2节)          |
| $l_a$        | [mm]                 | 电弧的长度                               |
| $l_m$        | [mm]                 | 熔池的长度                               |
| $l_r$        | [mm]                 | 焊波滞后的长度                             |
| $M_1, M_2$   | [N]                  | 圆周单位长度上的弯矩(图 141)                   |
| $M^*$        | [N/mm <sup>2</sup> ] | 式(133)中的系数                          |
| $\Delta M_z$ | [mmN]                | 相对于 $z$ 轴的合成力矩的增量                   |
| $M_{st}$     | [mmN]                | 横向收缩力矩                              |
| $M_{st}^*$   | [N]                  | 焊缝单位长度上的横向收缩力矩                      |
| $M_{sL}$     | [mmN]                | 纵向收缩力矩                              |
| $m$          | [-]                  | 硬化指数〔式(125)〕                        |
| $m$          | [-]                  | 材料的蠕变特性〔式(233)〕                     |
| $m$          | [-]                  | 压曲波的数目                              |
| $m_i, m_j$   | [-]                  | 角收缩的修正系数〔式(180)〕                    |
| $\dot{m}_e$  | [g/s]                | 焊条的熔化速率                             |
| $\dot{m}_d$  | [g/s]                | 工件上的焊着速率, 或称熔敷速率                    |
| $n$          | [-]                  | 材料的蠕变特性〔式(232)〕                     |
| $n$          | [-]                  | 板材或焊道的序数, 干涉线级次                     |
| $n^*$        | [-]                  | $\Delta \varepsilon_{8/5}$ 算式中的几何因子 |
| $P$          | [mm]                 | 棒的圆周长度                              |
| $p$          | [-]                  | 效率的修正系数〔式(70)〕                      |
| $p_0$        | [N/mm <sup>2</sup> ] | 与 $\sigma_0$ 有关的径向压强〔式(158)〕        |
| $p_a$        | [N/mm <sup>2</sup> ] | 电弧压强                                |
| $p, p_0$     | [N/mm <sup>2</sup> ] | 氢的分压, 环境空气压强                        |
| $p^*$        | [N/mm <sup>2</sup> ] | 圆柱形壳圆周线上的压强                         |
| $p^*$        | [W/mm <sup>2</sup> ] | 功率密度                                |
| $Q$          | [J]                  | 净热值, 含热量                            |
| $\bar{Q}$    | [J]                  | 总热值                                 |
| $Q_{li}$     | [J]                  | 极限热含量                               |