

有色金属 焊接手册



(苏)C.M.古列维奇 著
邸 斌 刘中青 译

中国铁道出版社

有色金属焊接手册

[苏]C.M.古列维奇 著

邸 斌 刘中青 译

中 国 铁 道 出 版 社

1988年·北京

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了各种有色金属及其合金的物理化学性能及焊接工艺规范参数、焊接冶金过程、焊接材料、焊接方法、焊接设备、焊接质量检验等，并介绍了焊接实例和应用范围。本手册反映了苏联目前的焊接技术水平，内容丰富、实用性强。可供从事焊接生产的工程技术人员、工人使用、亦可供从事焊接理论研究人员、大专院校有关专业的师生参考。

СПРАВОЧНИК ПО СВАРКЕ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ С.М.ГУРЕВИЧ

Издательство «Наукова думка» 1981

有色金属焊接手册

邸 斌 刘中育 译

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 王雪芬 封面设计 王锦成

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：850×1168毫米★ 印张：17 字数：435 千

1988年10月 第1版 第1次印刷

印数：0001—6,000册 定价：6.60元

译 者 的 话

随着科学技术的发展，有色金属焊接已成为各部门不可缺少的一门技术，尤其是在航海、航天、原子能、宇宙工程、电子技术、化学工业等部门已成功地对铈、镨、钆、钼、钇、铈、铉、铊、铋及其合金进行了焊接。

有色金属焊接手册系统的总结了轻、重、化学活性和难熔金属及其合金的焊接生产实践，反映了目前苏联的焊接技术水平。

本书内容丰富、系统性强，对我国有色金属及其合金的焊接基础理论与指导焊接生产实践，具有一定的作用。可供从事焊接生产的工程技术人员、工人使用，亦可供从事焊接基础理论研究人员和大专院校的焊接、金属热加工和材料科学等专业的师生参考。

本书由邸斌和刘中青合译，其中第一章、第二章、第三章、第四章和第九章由邸斌翻译，第五章、第六章、第七章和第八章由刘中青翻译。

在翻译过程中，曾得到吉林工业大学周振丰教授、那学忠副教授，长春光机学院赖叔昌教授，吉林工学院卢光照教授、姜凤岐副教授等很大帮助，在这里深表谢意。

由于时间仓促，水平有限，译文中的缺点和错误在所难免，望读者批评指正。

1985年9月

目 录

绪 论	1
专用符号表	3
第一章 有色金属及其合金的分类和特性	8
第一节 物理化学性能和应用范围	8
第二节 有色金属与杂质相互作用的规律	50
第三节 有色金属合金化及有色金属合金	67
第二章 有色金属焊接方法和焊接设备	96
第一节 熔 焊	96
第二节 金属预热压力焊	144
第三节 金属不用外部热源预热的压力焊	161
第三章 有色金属焊接材料	171
第一节 焊丝和焊棒	171
第二节 电弧焊焊条	177
第三节 焊剂和药芯焊丝	187
第四节 气 体	196
第五节 非熔化电极	198
第四章 有色金属熔焊时物理冶金过程的特点	205
第一节 焊接热过程及母材和电极金属熔化规律性	205
第二节 焊缝金属的结晶和近缝区的组织	226
第三节 焊接冶金过程	233
第四节 焊接接头的应力和变形	243
第五章 轻金属及其合金焊接工艺	256
第一节 铝及铝合金	256
第二节 镁及镁合金	304
第三节 铍	312

第六章 重金属及其合金焊接工艺	317
第一节 铜及铜合金	317
第二节 镍及镍合金	356
第三节 铅	372
第四节 锌	378
第五节 贵金属(银、钯、铂、金)	380
第七章 化学活性金属、难熔金属及其合金焊接工艺	386
第一节 钛及钛合金	386
第二节 锆、铪	444
第三节 钽、铌、钼	448
第四节 钨、钨和铬	455
第八章 焊接接头缺陷及防止缺陷的方法	462
第一节 焊接接头缺陷的特征	462
第二节 防止气孔的方法	468
第三节 焊接接头中的裂纹及防止裂纹的方法	475
第四节 焊接接头质量检验	478
第九章 有色金属焊接接头特点	499
第一节 合理的焊接接头	499
第二节 推荐的机械设备、辅助设备和夹具	503
第三节 有色金属焊接的劳动保护和安全技术	507
参考文献	517

绪 论

科学技术的进一步发展，与有色金属应用范围（其中包括焊接件的生产）的不断扩大有着密切的联系。

目前，越来越多的采用地壳中分布最广的金属铝制成的铝合金代替钢，生产各种用途的构件。铝合金的密度小，比强度大，因而首先在航空制造、运输机械制造和建筑中得到成功的应用。

在二、三十年前还被认为是未来的新金属——钛，作为结构材料，按其产量和应用范围，现已迅速升至第二位，仅次于铝。由于地壳中钛的含量多（按自然分布，钛占第四位，次于铝、铁和镁）以及近年来在冶金方面所取得的成就，所以有充分根据可将钛列为目前不可缺少的金属。在所有重要的工业部门中，特别是航空制造业、化学工业都已经开始采用钛。在这些部门中，钛的特殊的物理化学性能（密度小、耐腐蚀性强等）可以得到充分的发挥。镁合金和传统的有色金属——铜及铜合金，在现代技术中仍起着很大的作用。耐蚀材料——镍及镍合金的需求量进一步增多。目前，对难熔金属及其合金的研究不断引起重视，有许多专题论文和文章专门研究在1000℃以上工作的新高强度难熔合金的物理化学性能和机械性能。另外，对在航空、宇宙工程、核能、化学工业和其它工业部门中的应用有着广阔前景的铌合金、钽合金、钼合金和钨合金也给予了很大的关注。

在苏共二十六大批准的1981~1990年的社会经济发展的基本方针中，明确规定要大大增加有色金属的生产。扩大有色金属产品品种，提高产品质量，因此就要增加有色金属的焊接结构及有色金属零、部件的生产。焊接件在低温、高温、浸蚀介质、高压和其它条件下的使用寿命，主要取决于焊接接头的质量。

由于有色金属具有特殊的物理化学性能，所以焊接有色金属

及其合金是相当困难的。但是，现在所拥有的焊接技术可以克服各种困难，获得良好的焊接接头。新的有效焊接方法（微束等离子弧焊、电子束焊、电渣焊、真空压力焊等）的出现，为使用各种厚度的有色金属焊接结构，开辟了广阔的前景。

许多科技文章中对有色金属焊接的报导都是很零碎的。苏联和国外出版的手册包括有各种金属的焊接资料，但其中对有色金属焊接的叙述很简要。通常，根据这些资料根本不能做到正确的选择合适的焊接方法及焊接材料，也不能焊接出性能满足要求的焊接接头。

本书是对轻、重、化学活性和难熔结构金属及其合金焊接实践的首次总结。本书只阐述了有色金属焊接的基础理论，读者可在书末文献目录所提供的文献中查阅更详细的资料。由于有色金属焊接手册是首次出版，其缺点、错误在所难免。作者诚心接受读者的一切批评和指正。

作者对审阅者——技术科学博士、教授Л.Н.拉利柯夫和技术科学硕士、副教授H.A.高尔佩廖克以及主编——技术科学博士、教授B.П.契尔内斯所提出的宝贵意见表示衷心的感谢。

作 者

专用符号表

- A —— 火焰能率 (I/h)
 a —— 混合比, 接头间隙 (mm), 点阵常数 ($\text{\AA}$)
 a_k —— 冲击韧性 ($\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$)
 B —— 板材宽度 (mm), 焊缝宽度 (mm)
 b —— 母材厚度 (mm), 药皮厚度 (mm)
 C —— 电容 (μF)
 c —— 比热 [$\text{cal}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$]
 D —— 爆燃速度 (km/s)
 d_{np} —— 填充焊丝直径 (mm)
 $d_{..}$ —— 电极直径 (mm)
 $d_{...np}$ —— 电极填充焊丝直径 (mm)
 d_F —— 电子束斑点直径 (cm)
 d_c —— 碳极直径 (mm)
 E —— 弹性模量 (kgf/mm^2)
 $F_{..}$ —— 轴向顶锻力 (kgf)
 G —— 规范刚度, 自由能 (kcal/mol)
 G_r —— 气体流量 (l/min)
 G_u —— 熔敷平均质量速度 (g/s)
 G_p —— 电极熔化平均质量速度 (g/s)
 H_u —— 金属熔滴热焓 (cal/g)
 $H_{.r}$ —— 焊接开始温度时焊丝的热焓 (cal/g)
 $H_{..}$ —— 熔化熵 (cal)
 h —— 熔深 (mm)
 I —— 电流 (A)
 $I_.$ —— 电子束电流 (mA)

- I_{nn} ——正极性时的平均电流 (A)
- I_{oe} ——焊接电流 (A)
- I_{on} ——反极性时的平均电流 (A)
- I_{xp} ——临界电流 (A)
- $I_{0.2x}$ ——维弧电流 (mA)
- J ——惯性矩 (cm^4)
- j ——电流密度 (A/cm^2)
- K_{np} ——强度系数
- k ——经验系数
- k_{ac} ——焊接电流不对称系数
- k_{nep} ——过渡系数
- L ——液 相
- L_n ——伸出长度 (mm)
- L_k ——贮能电容 (μF)
- L_{sa} ——焊条长度 (mm)
- L_{wos} ——焊缝长度 (mm)
- l ——拖罩长度 (mm)
- M ——元素, 金属的克分子量 ($\text{g}\cdot\text{mol}$)
- M_u ——弯曲力矩 ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)
- m_o ——电极末端脱落熔滴的质量 (g)
- m_k ——过渡前电极末端悬浮的熔滴质量 (g)
- m_n ——过渡熔滴的质量 (g)
- m_{ep} ——悬浮熔滴的平均质量 (g)
- N ——正向力 (kgf)
- P ——功率 (W)
- P_x ——锻压力 (kgf)
- P_{oe} ——轴向单位顶锻压力 (kgf/mm^2)
- P_{nn} ——表面张力 (N/m)
- P_{cp} ——抗剪力 (kgf)
- P_T ——切向力 (kgf)

- $P_{\kappa p}$ ——临界压力 (kgf/mm²)
 P_n ——电子束功率 (W)
 $P_{c.s.}$ ——射线有效功率 (kW)
 $P3M$ ——稀土金属
 q ——线能量 (J/cm)
 q_n ——辅助功率 (W)
 $q_{e.s.}$ ——电弧传给焊丝的热量 (cal)
 R ——焊件上某点距热源的座标距离 (mm)
 r ——电极半径 (cm)
 S ——熵 [cal/(°C·mol)], 面积 (mm²), 钝边厚度 (mm)
 T ——温度 (°C)
 $T_{\text{з.к}}$ ——淬火温度 (°C)
 $T_{n.n}$ ——晶型转变温度 (°C)
 $T_{n.s}$ ——熔点 (°C)
 T_n ——扩散焊焊接温度 (°C)
 $T_{\text{ног}}$ ——预热温度 (°C)
 $T_{c.s.}$ ——焊接温度 (°C)
 $T_{\kappa p}$ ——临界温度 (K)
 $T_{\text{х.н}}$ ——沸腾温度 (°C)
 T_{max} ——最高温度 (°C)
 $T_{\text{э.н}}$ ——实验温度 (°C)
 T_n ——电极加热温度 (°C)
 t ——时间 (s)
 t_n ——金属的加热时间 (s)
 $t_{c.s.}$ ——焊接时间 (s)
 $t_{\text{о.р}}$ ——冷却时间 (s)
 t_s ——金属在熔池中的停留时间 (s)
 t_n ——间歇时间 (s)
 $t_{\text{ш.п}}$ ——周期 ($t_{\text{ш.п}} = t_{c.s.} + t_n$)
 $t_{\text{с.р}}$ ——平均时间 (s)

- U ——电压 (V)
 U_d ——焊接电压 (V)
 U_{vc} ——加速电压 (V)
 V ——体积 (cm^3)
 V_{κ} ——氧气体积 (m^3)
 V_F ——可燃气体体积 (m^3)
 $V_{\cdot}$ ——熔池体积 (cm^3)
 v_{cs} ——焊接速度 (m/h)
 v_{oc} ——顶锻速度 (mm/s)
 v_{nod} ——填充焊丝送进速度 (m/h)
 v_n ——电极焊丝送进速度 (m/h)
 v_{cd} ——位移速度 (mm/min)
 $v_{\partial\epsilon}$ ——变形速度 (s^{-1})
 α ——弯曲角 (度)
 α_m ——线胀系数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
 α_p ——熔化系数 [$\text{g}/(\text{A}\cdot\text{h})$]
 γ ——密度
 Δ_{np} ——纵向收缩量
 Δ_{non} ——横向收缩量
 ΔG ——自由能增量 (kJ/mol)
 ΔS ——熵增量 [$\text{cal}/(\text{mol}\cdot^{\circ}\text{C})$]
 ΔH ——焓增量 (cal/mol)
 ε_T ——温度变形系数
 η_H ——热源加热效率 (%)
 λ ——导热系数 [$\text{cal}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})$]
 ρ ——电阻率 ($\Omega\cdot\text{cm}$)
 ρ_0 ——电极焊丝在 0°C 时的电阻系数 ($\Omega\cdot\text{cm}$)
 ρ_{ep} ——电极焊丝的电阻系数 ($\Omega\cdot\text{cm}$)
 σ_b ——抗拉强度 (kgf/mm^2)
 σ_s ——屈服强度 (kgf/mm^2)

- $\sigma_{0.2}$ ——条件屈服强度 (kgf/mm²)
 $\sigma_{\sigma p}$ ——平均强度 (kgf/mm²)
 $\sigma_{\sigma \sigma m}$ ——残余应力 (kgf/mm²)
 $\sigma_{\sigma T p}$ ——断裂强度 (kgf/mm²)
 $\sigma_{\sigma m}$ ——母材强度 (kgf/mm²)
 ψ ——断面收缩率 (%)
 ψ_n ——损失系数 (%)
 ω ——瞬时冷却速度 (°C/s)
 δ ——延伸率 (%)

第一章 有色金属及其合金的分类和特性

第一节 物理化学性能和应用范围

除铁及其合金（钢、铸铁）为黑色金属以外，其它大多数结构金属均属于有色金属。因此，有色金属亦称为非铁金属。

有色金属具有各种不同的性能。在有色金属中，除易熔金属（铅）和轻金属（铝、镁）以外，还有不少难熔金属和重金属（钨、钼）。有些有色金属（银、铜、金、铝）具有优良的导电、导热性，而另一些有色金属（钛、锆等），特别是合金（镍铬合金等）具有大的电阻和低的导热率。

金属的焊接性（可焊性）主要是取决于它的物理化学性能，因此在焊接有色结构金属件和选择焊接规范时，必须考虑到金属特殊的物理特性（表 1—1）〔381〕。

表 1—2 列出了有色金属的机械性能（近似值）。由于金属中的杂质（主要是指氧、氮和氢）含量不同，所以大多数金属的强度和塑性不是固定的。

有色结构金属，根据其密度、熔点、沸点和在高温下，特别是在熔融状态下的化学活泼性可分为三类：

第一类 轻金属

轻金属有铝、镁和铍。轻金属的密度最小，不大于 2.7g/cm^3 （表 1—1）。轻金属中最轻的金属是镁。

第二类 重金属

重金属有铜、镍、铅、锌、金、银、钨和铂。重金属的密度不小于 7.0g/cm^3 。密度最大的重金属是铂。后四种金属（金、银、钨和铂）为贵重金属。

有色结构金属与铁物理性能比较

表 1—1

金 属 (符号)	原 子 序 数	原子量	γ , g/cm ³	$T_{m.s.}$, ℃	$T_{f.m.s.}$, ℃	C , (20℃) cal (g·℃) [J/(kg· K)]	λ , (20℃) cal/(cm ·s·℃) [W/(m ·K)]	$\alpha_{m.s.}$, ×10 ⁻⁶ / ℃	ρ , (20℃) MkΩ·cm (×10 ⁻⁸ Ω·m)
铝(Al)	13	26.98	2.7	660	2327	0.215 (900)	0.538 (225)	24.3	2.66
铍(Be)	4	9.01	1.85	1284	2450	0.43 (1830)	0.45 (188)	11.7	3.6
钒(V)	23	50.94	6.1	1950	3309	0.119 (501)	0.074 (31.0)	10.9	24.8
钨(W)	74	183.85	19.35	3395	5900	0.031 (130)	0.31 (130)	4.98	5.5
铪(Hf)	72	178.49	13.31	2222	5400	0.034 (142)	0.053 (22.2)	5.9	40
铁(Fe)	26	55.84	7.87	1539	2880	0.153 (640)	0.177 (77)	11.7	9.7
金(Au)	79	196.97	19.32	1063	2677	0.032 (134)	0.744 (311)	14.2	2.25
镁(Mg)	12	24.31	1.74	650	1107	0.2416 (1030)	0.376 (155)	26	4.47
铜(Cu)	29	63.54	8.94	1083	2360	0.092 (384)	0.923 (391)	16.8	1.68
钼(Mo)	42	95.94	10.22	2620	4830	0.061 (255)	340 (145)	5.44	5.2
镍(Ni)	28	58.70	8.90	1453	2730	0.106 (435)	0.220 (92.5)	13.3	68
铌(Nb)	41	92.91	8.57	2468	5127	0.065 (272)	0.125 (52.5)	7.1	15.22
钯(Pd)	46	106.4	12.02	1552	2937	0.058 (263)	0.170 (71.3)	11.1	9.96
铂(Pt)	78	195.09	21.45	1769	3800	0.032 (134)	0.174 (72.8)	9.1	10.3
铅(Pb)	82	207.2	11.34	327.4	1740	0.031 (130)	0.083 (34.7)	27.56	20.63
银(Ag)	47	107.87	10.5	960.8	2184	0.057 (250)	1.01 (423)	19.51	1.47
钽(Ta)	73	180.95	16.65	2996	5300	0.033 (136)	0.130 (54.5)	6.55	12.4
钛(Ti)	22	47.9	4.51	1668	3280	0.125 (525)	0.036 (15.1)	8.5	42
铬(Cr)	24	51.99	7.19	1875	2148	0.11 (462)	0.16 (67.1)	6.2	12.8
锌(Zn)	30	65.38	7.14	419.5	907	0.09 (378)	0.265 (110)	32.5	5.75
锆(Zr)	40	91.22	6.51	1855	4330	0.069 (289)	0.050 (21)	5.89	45

有色结构金属机械性能

表 1—2

金 属	E , kgf/mm ² (MPa)	E_s , kgf/mm ² (MPa)	δ , %	ψ , %	依据文献
钼	7200 (70600)	8~11 (78~108)	40	80	[134]
铍	30000 (295000)	14 (138)	2		[134]
钒	13500 (132500)	18~45 (176~442)	25~40	50~60	[169]
钨	38000 (374000)	120~140 (1180~1375)	脆的		[324]
铪	14200 (139000)	35~45 (345~442)	20~30	30~40	[54]
金	7900 (77500)	14~16 (138~157)	30~50	90	[178]
镁	4360 (42800)	(18~25) (176~245)	8~17	10~20	[298]
铜	13200 (128700)	22~24 (216~235)	60	75	[298]
钼	29200 (286000)	40~70 (393~686)	15~30	12~40	[302]
镍	20500 (201900)	40~50 (393~491)	40	70	[352]
铌	9080 (89100)	35~50 (345~491)	30~40	50~60	[169]
钽	12300 (121500)	18~20 (176~196)	25~40	80	[178]
铂	17320 (169000)	15~17 (147~167)	30~50	90	[178]
铅	1600 (15700)	1.1~1.3 (10.8~12.7)	30~40	92~100	[298]
银	7600 (74500)	10~15 (98~149)	40~50	90	[173]
钽	17830 (174800)	20~45 (196~442)	30~50	40~60	[169]
钛	11200 (108000)	25~35 (245~345)	40~55	55~70	[63]
铬	25000 (245000)	30~70 (294~686)	12~40	3~30	[321]
锌	1100 (10800)	11~15 (108~147)	5~20	15	[352]
钴	8960 (87800)	25~40 (245~393)	30~50	40~50	[101]

第三类 化学活性金属及难熔金属

化学活性金属和难熔金属有钒、钨、铪、钼、铌、钽、钛、锆和铪。这类金属在高温下，特别是在熔融状态下与其它元素（主要是大气中的气体）的化合反应能力相当强烈。

熔点最高的金属——难熔金属也属于第三类金属。但至今究

竟哪些金属是难熔金属还没有统一的认识。通常认为熔点比铬(1875℃)高的金属属于难熔金属[134]。按熔点增高程度,可将难熔结构金属排成下列顺序:铬、钒、铌、钼、钽、钨。

化学活性和难熔金属及其合金的特殊性能,给金属的加工和金属的焊接带来一定困难。

有色金属可以进行各种压力加工和机械加工。用有色金属也可以焊接(或钎焊)成零、部件。有色金属一般是制成半成品(线材、棒料、板材、扁材、型材、带材、箔片等)应用,其中的也可以铸成铸件。有色金属的合金化可在很大范围内改变它的性能。热处理对有色金属及其合金的性能也有很大影响。

下面阐述有色结构金属的特性和它的应用范围。在这里,主要叙述各种特性对金属焊接性能的影响。

一、有色轻金属

(一) 铝

铝在地壳中的蕴藏量为8.8%[336],约为铁含量(5.1%)的1.7倍[336]。不论是按铝在地壳中的蕴藏量,还是按铝的产量和应用范围,铝均是一种最广泛的有色金属。

铝无同素异构转变。铝具有面心立方点阵,点阵常数 $a = 4.041 \text{ \AA}$ [335]。铝的密度($\gamma^{1000} = 2.289 \text{ g/cm}^3$) [352]随铝的纯度增高而减小。铝具有很高的塑性和良好的焊接性,易于进行压力加工(轧制、锻造、冲压和拉伸)和切削加工。铝具有优良的导热、导电性,其导电率为铜的60~65%。由于铝的密度只有铜的 $\frac{1}{3}$,所以在电阻相同时,铝线比铜线轻。杂质及合金元素使铝的导电率降低,其中锰、钒、铬、钛的降低作用最大,而镍、硅、锌、铁、铜的降低作用较小(图1—1)。

铝是一种弱顺磁性物质。在 $T = 1.2 \text{ K}$ 时,铝转变为超导体[335]。

铝具有吸收中子的特殊性能,从而使铝在原子反应堆中得到应用。根据测定表明,金属吸收热中子的截面积(测量单位为靶