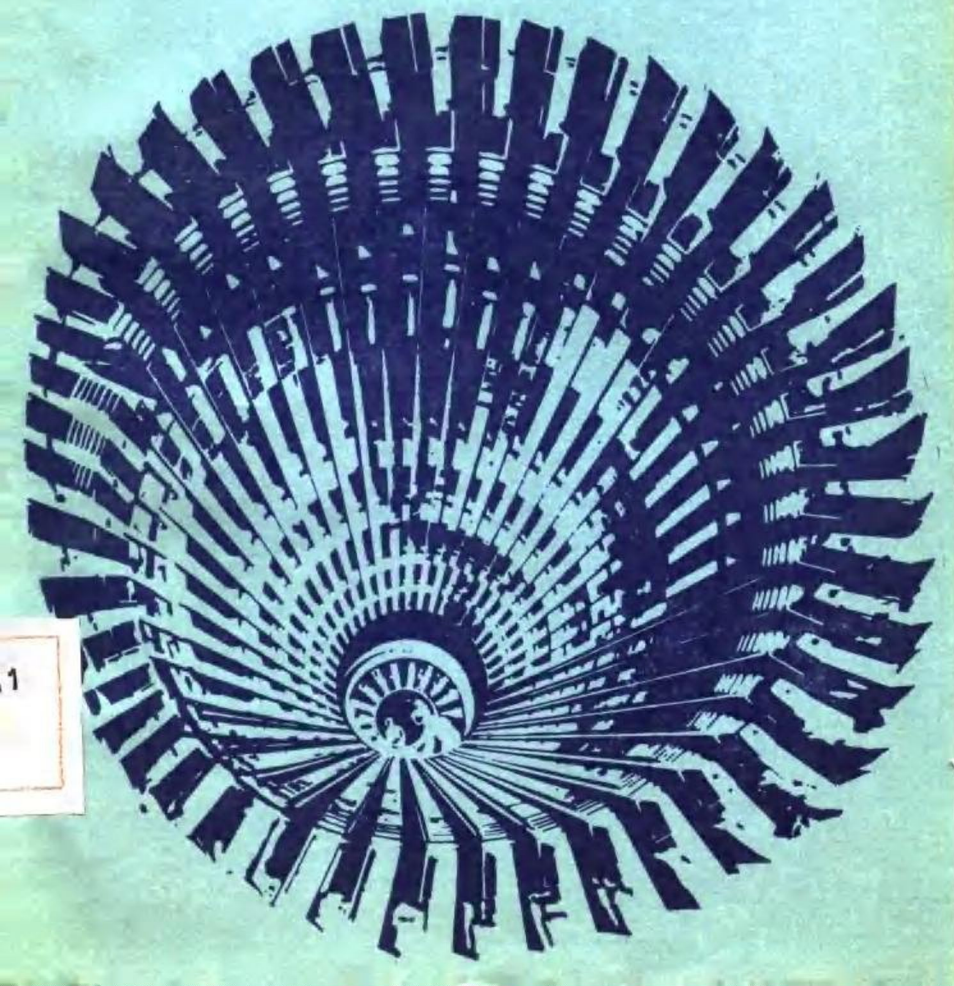


电机绕组制造

〔奥地利〕H. 泽昆茨



1

《电机绕组制造》包括电机绕组结构材料、同步电机和感应电机的定子绕组、汽轮发电机和异步电机的转子绕组、换向器电机的绕组、平面定子和盘形转子绕组以及绕组绝缘的试验与检查等六部分，系统地介绍了大、中、小型（包括特种）交、直流电机定、转子绕组的制造工艺和绕组绝缘的测试方法，集中地反映了西德西门子公司、通用电气公司、发电设备联合公司、瑞士勃朗保弗利公司、瑞典通用电气公司、英国电气公司、法国重型电工机械公司、澳大利亚依林公司等12个西欧厂家七十年代的绕组制造先进技术。参加编撰工作的都是电机绕组制造方面的知名人士。

本书为绕组制造工艺专著，也是一本难得的教科书。对电机制造业广大工程技术人员以及大专院校师生都有一定的参考价值。

《电机绕组制造》一书分别由刘彦清、崔恩林、邱建甫、韩在龙和武瀛涛同志按下列五部分译成：1）《电机绕组的结构材料》至《同步电机和感应电机的定子绕组》1.1.3.5.2；2）《同步电机和感应电机的定子绕组》1.2至《汽轮发电机和异步电机的转子绕组》1.2.1；3）《汽轮发电机和异步电机的转子绕组》1.2.2至《换向器电机的绕组》1.2.4.1；4）《换向器电机的绕组》1.2.4.2至《绕组绝缘试验和检查》1.1.6；5）《绕组绝缘试验和检查》1.1.7至1.4.9。全书由张静涛同志校订。

Herstellung der Wicklungen elektrischer Maschinen

H. Sequenz

Springer-Verlag

Wien, New York 1973

* * *

电机绕组制造

[奥地利] H. 泽昆茨 著

刘彦清 崔恩林 邱建甫 译

韩在龙 武瀛涛

张静涛 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 $\frac{1}{32}$ ·印张 13 $\frac{1}{8}$ ·字数 283 千字
1984年3月北京第一版·1984年3月北京第一次印刷

印数 00,001—10,400·定价 2.00 元

*

统一书号：15033·5524

译 序

建国以后，国内也出版过一些有关国外电机绕组的中译本。这些书对我国社会主义建设曾起到了一定的作用。但是，近二十年来，电机单机容量急剧增长；绝缘技术飞速发展；新型绝缘材料不断涌现。面对这些新情况，已版的那些专著已经不能全面地反映世界各国电机绕组制造的当代水平。据此，我们选择了奥地利H. 泽昆茨主编的《电机绕组制造》1973年版全部译出，以供参考。该书原拟作为H. 泽昆茨电机绕组著作的第四卷。前三卷分别为《交流电机电枢绕组》、《换向器电机电枢绕组》和《交流电机特种绕组》，先后于1950、1952和1954年问世。

本书详尽地阐述了西德、瑞士、奥地利和世界其他国家的电机绕组材料、制造工艺以及绝缘试验与检查；涉及到同步电机、异步电机、直流电机定、转子绕组以及平面定子与盘形转子绕组。它可供我国电机制造业及其科研单位的广大工程技术人员参考；对有关大专院校的教学也有一定的参考价值。

《电机绕组制造》在翻译过程中得到了哈尔滨大电机研究所和哈尔滨电站设备成套设计研究所的大力支持，在此表示衷心地感谢。

由于水平有限，译文中错误恐难避免，请批评指正。

目 录

电机绕组的结构材料

1. 导线材料——铜、铝和合金 R. 诺布洛克	1
1.1 导线材料的分类	1
1.1.1 常用材料	1
1.1.1.1 铜	1
1.1.1.2 铝	3
1.1.1.3 合金	4
1.1.2 有关标准	5
1.1.3 按电导率分类的材料	7
1.2 物理和技术性能	8
1.2.1 疲劳强度和蠕变性能	9
1.2.1.1 振动疲劳强度	9
1.2.1.2 蠕变强度	28
1.2.1.3 持久强度	28
1.2.2 机械成形的冷作硬化	32
1.2.3 热处理	33
1.2.4 再结晶	34
1.2.5 热稳定性	36
1.2.6 腐蚀	37
1.3 材料的连接	39
1.3.1 软焊	39
1.3.2 硬焊	40
1.3.3 熔焊	40

1.3.4 钎焊和熔焊的填充材料标准	41
参考文献	42
2. 绝缘材料和绝缘材料等级, 绝缘线 W. 奥博格	43
2.1 绝缘材料和绝缘材料等级	43
2.1.1 绝缘材料的用途	43
2.1.2 绝缘材料的结构	44
2.1.3 绝缘材料的电气性能	46
2.1.3.1 击穿强度	46
2.1.3.2 介电常数	48
2.1.3.3 介质损耗因数和介质损耗	49
2.1.3.4 电阻	49
2.1.4 化学性能	50
2.1.5 抗能量辐射	51
2.1.6 热性能	51
2.1.7 电气绝缘寿命	53
2.1.7.1 耐热等级	54
2.1.7.2 温度指标	59
2.1.8 绝缘材料的成分和类型	61
2.1.8.1 虫胶、沥青、植物油	62
2.1.8.2 云母和云母纸	63
2.1.8.3 石棉	64
2.1.8.4 纸和压制纸板	64
2.1.8.5 棉花、丝、麻	64
2.1.8.6 玻璃纤维、玻璃织品、玻璃毡	65
2.1.9 塑料	66
2.1.9.1 纤维素塑料	67
2.1.9.2 酚醛塑料	67
2.1.9.3 丙苯树脂和醇酸树脂	68
2.1.9.4 不饱和聚酯树脂和环氧树脂	68

2.1.9.5	聚氨酯	69
2.1.9.6	聚氯乙烯、聚乙烯	70
2.1.9.7	聚乙烯醇缩醛	70
2.1.9.8	聚对苯二甲酸乙二醇酯, 聚碳酸酯	70
2.1.9.9	硅树脂	71
2.1.9.10	氟聚合物	72
2.1.9.11	聚酰胺	73
2.1.9.12	聚酰亚胺和其他杂环芳香族聚合物	73
2.1.9.13	未来的塑料	75
2.1.10	电机的绝缘材料	75
2.1.10.1	绝缘漆	75
2.1.10.2	浸渍过的纤维材料及组合	77
2.1.10.3	层压制品	79
2.1.10.4	云母和云母纸绝缘材料	80
2.2	绝缘导线	81
	参考文献	86
3.	编织线棒 (罗贝尔线棒) 的理论和构造	
	G. 奈特霍夫	88
3.1	概要	88
3.2	典型的罗贝尔线棒	90
3.3	具有进一步磁场平衡的罗贝尔线棒	91
3.3.1	槽部和绕组端部特种换位	94
3.3.2	线棒端头的交叉连接	97
3.4	多重罗贝尔线棒	99
3.5	罗贝尔线棒的涡流损耗	102
3.5.1	由横向磁场产生的电流趋肤效应损耗	102
3.5.2	径向磁场损耗	105
	参考文献	105
4.	浸渍剂 W. 梅顿斯	107

VII

4.1 引言	107
4.2 浸渍剂系统	109
4.2.1 绕组和绝缘的浸渍剂	109
4.2.1.1 浸渍漆	109
4.2.1.2 浸渍化合物	111
4.2.1.3 无溶剂浸渍树脂	111
4.2.1.3.1 浸渍树脂系统	112
4.2.1.3.2 滴浸树脂系统	112
4.2.1.3.3 真空浸渍树脂系统	113
4.2.2 粘合包绕材料的树脂	115
4.3 浸渍剂的试验	116
4.4 电工行业对浸渍剂系统发展的影响	117
参考文献	117

同步电机和感应电机的定子绕组

1. 圈式绕组	119
1.1 低压电机 (6 千伏以下) M. 布吕特林克	119
1.1.1 概述	119
1.1.1.1 绕组型式的分类	119
1.1.1.1.1 穿入或拉入式绕组 (图 36)	120
1.1.1.1.2 下在闭口槽中的 U 型线圈绕组	121
1.1.1.1.3 Z 型线圈绕组 (图 37)	121
1.1.1.2 绕组型式的选择	122
1.1.2 圆线绕组 (圆线散嵌绕组)	124
1.1.2.1 线圈的制造	124
1.1.2.2 绕组嵌线	125
1.1.2.3 绕组机械嵌线和绕线机	128
1.1.3 型线绕组 (成型线圈)	132
1.1.3.1 概述	132

1.1.3.2	导线的安排	134
1.1.3.3	线圈的成形	135
1.1.3.4	主绝缘	138
1.1.3.5	线圈的嵌装	140
1.1.3.5.1	型线散嵌绕组的嵌装	140
1.1.3.5.2	开口槽中型线绕组的嵌装	142
参考文献		144
1.2	高压电机 (6 kV) O. 豪斯	144
1.2.1	导线材料与导线绝缘	144
1.2.2	线圈成形	146
1.2.3	包线圈主绝缘	149
1.2.4	线圈嵌装	153
1.2.5	绕组端部的固定	155
1.2.6	接线和连接工艺	158
1.2.7	温度检测器的装置	161
1.2.8	绕组的修理	163
参考文献		163
2.	棒形绕组 A. 威奇曼	164
2.1	导线的制造	164
2.1.1	间接冷却的编织线棒	164
2.1.2	多股导线的线棒	166
2.1.3	直接氢冷线棒	167
2.1.4	液冷导线	169
2.1.5	测试	170
2.2	线棒的绝缘	171
2.2.1	非连续绝缘	172
2.2.1.1	槽绝缘的包绕	172
2.2.1.2	端部绝缘	173
2.2.2	连续云母带绝缘	174

2.2.3 真空浸渍的云母带绝缘	174
2.2.3.1 线棒的包绕	175
2.2.3.2 干燥、浸渍、成形、固化	176
2.2.3.3 模浸	177
2.2.3.4 整浸	177
2.2.4 环形引线的绝缘	178
2.2.5 测试	179
2.3 防晕屏蔽	180
2.3.1 内防晕屏蔽	180
2.3.2 外防晕屏蔽	180
2.3.3 端部防晕屏蔽	181
2.3.4 防晕屏蔽的测试	183
2.4 绕组的嵌装	184
2.4.1 线棒在槽中的固定	184
2.4.2 端部固定	186
2.4.3 连接线的制造与绝缘	189
2.4.4 绕组嵌装时的试验	190
参考文献	192

汽轮发电机和异步电机的转子绕组

1. 汽轮发电机的转子绕组 D. 拉姆布累脱	194
1.1 绕组的材料、结构形式和冷却	194
1.1.1 导线材料	194
1.1.2 绕组的结构形式	195
1.1.3 线圈的结构形式与冷却	196
1.1.3.1 冷却方式	196
1.1.3.2 冷却介质 (评价的根据)	198
1.2 线圈和导线的制造	201
1.2.1 导线的制造	201

1.2.2	导线的冷却介质进出开口	203
1.2.3	线圈制造	205
1.3	线圈和导体的绝缘	209
1.3.1	槽绝缘	209
1.3.2	绕组端部绝缘	212
1.3.3	匝间绝缘	213
1.4	绕组装配	214
1.4.1	嵌线与绕组绝缘	214
1.4.2	接线与连接工艺	216
1.4.3	绕组的压型与固定	220
1.4.4	绕组的试验	222
1.5	阻尼绕组	224
1.6	绕组的固定	226
1.6.1	绕组端部的线圈间隔垫块	226
1.6.2	绕组对离心力的固定	227
1.7	引线	227
	参考文献	228
2.	异步电机的转子绕组	230
2.1	绕线型转子绕组 M.布吕特林克	230
2.1.1	概述	230
2.1.2	圆线绕组	231
2.1.2.1	线圈制造	231
2.1.2.2	绕组的嵌入	231
2.1.2.2.1	穿入绕组	231
2.1.2.2.2	散嵌圆线绕组	231
2.1.3	扁线绕组与条形绕组	232
2.1.3.1	概述	232
2.1.3.2	线棒的制作	233
2.1.3.3	线棒的嵌入	234

Ⅺ

参考文献	236
------------	-----

2.2 鼠笼型转子绕组 E.法艾顿	236
-------------------------	-----

2.2.1 概述	236
----------------	-----

2.2.2 浇注的鼠笼型绕组	237
----------------------	-----

2.2.2.1 压力铸造	237
--------------------	-----

2.2.2.2 金属模铸造	240
---------------------	-----

2.2.2.3 试验	241
------------------	-----

2.2.3 组合式鼠笼型转子绕组	241
------------------------	-----

2.2.3.1 笼条与端环的初步加工	242
--------------------------	-----

2.2.3.2 装配与连接	243
---------------------	-----

2.2.3.3 试验	247
------------------	-----

换向器电机绕组

F.梅尔	248
------------	-----

1. 电枢绕组	248
---------------	-----

1.1 结构特点	248
----------------	-----

1.1.1 绕组元件	252
------------------	-----

1.1.2 槽形区别特征与端部连接线	252
--------------------------	-----

1.2 工艺流程与制造方法	254
---------------------	-----

1.2.1 绕组制造简述与按制造方法对绕组分类	255
-------------------------------	-----

1.2.2 手工成形的绕组	256
---------------------	-----

1.2.2.1 穿入式绕组	256
---------------------	-----

1.2.2.2 手嵌绕组	256
--------------------	-----

1.2.3 机制绕组	257
------------------	-----

1.2.3.1 半自动化的绕组制造	257
-------------------------	-----

1.2.3.2 全自动化绕组制造	258
------------------------	-----

1.2.4 成形绕组	268
------------------	-----

1.2.4.1 散嵌式绕组	271
---------------------	-----

1.2.4.2 成形线圈	273
--------------------	-----

1.2.5 条形绕组	279
1.2.5.1 实心线棒	282
1.2.5.2 编织线棒	286
1.2.6 均压绕组和辅助绕组	286
1.2.6.1 交叉或环形连接形式排列的均压线	287
1.2.6.1.1 多路波绕组	289
1.2.6.1.2 多路叠绕组	290
1.2.6.2 电枢铁心的无磁场空间中均压线的布置	290
1.2.6.3 布置在槽底的均压线——S 连接线	292
1.2.6.4 辅助绕组	294
2. 换向器	296
2.1 结构设计和特征	296
2.1.1 圆筒形或盘形换向器表层的布置	297
2.1.2 换向片固定	297
2.1.2.1 具有明显接触压力的鸽尾形换向器	297
2.1.2.2 换向片两端支撑无明显接触压力的鸽尾形 换向器	298
2.1.2.3 热套绑环换向器	298
2.1.2.4 塑料换向器	300
2.1.3 绕组与换向器的连接	301
2.2 工艺过程和制造方法	301
2.2.1 有接触压力鸽尾形换向器制造	301
2.2.2 热套绑环换向器的制造	302
3. 定子绕组	306
3.1 概要及结构特征	306
3.2 工艺过程与制造方法	306
3.2.1 圈式绕组	306
3.2.1.1 分层绕组	306
3.2.1.2 盘形线圈	307

XN

3.2.1.3 边绕绕组	307
3.2.1.4 主极线圈	307
3.2.1.5 换向极线圈	307
3.2.2 分布绕组、条形绕组	310
参考文献	312

平面定子和盘形转子的绕组

H. 泽昆茨	318
1. 平面定子的绕组	318
1.1 具有环形定子的圆盘传动式静电发电机	318
1.2 行波场电机	319
2. 圆盘形的转子绕组	323
2.1 圈式绕组	323
2.2 印刷和冲制绕组	323
参考文献	327

绕组绝缘试验和检查

A. 维希曼	328
1. 绝缘试验的目的	328
1.1 直流电压非破坏性试验	329
1.1.1 绝缘电流和再充电电流与时间的关系	330
1.1.2 再充电电流和绝缘电流与电压的关系	332
1.1.3 泄漏电流的叠加	334
1.1.4 直流电流值与温度的关系	336
1.1.5 吸收比	339
1.1.6 外部影响	342
1.1.7 绕组烘干	342
1.1.8 绝缘的时间常数	343

1.1.9	高直流电压下的绝缘电阻	344
1.2	用交流电压进行非破坏性试验	350
1.2.1	测量介质损耗	350
1.2.2	温度与损耗因数的关系	352
1.2.3	热老化时的损耗因数	353
1.2.4	湿度对损耗因数和电容的影响	357
1.2.5	损耗因数与电压关系	358
1.2.6	损耗因数的增高与空气含量	360
1.2.7	损耗因数—验收条件	362
1.2.8	损耗因数增量作为老化的标志	365
1.3	用高频测试法对局部放电的检定和位置的确定	369
1.3.1	交流电压下的局部放电	369
1.3.2	局部放电位置的确定	372
1.3.3	直流电压时的局部放电	375
1.4	耐压试验及其对绝缘试验的意义	377
1.4.1	用耐压试验判断绝缘强度	378
1.4.2	电气强度和寿命	379
1.4.3	绕组绝缘老化后的耐电压强度和寿命	381
1.4.4	耐压试验的结果	385
1.4.5	直流电压试验	387
1.4.6	直流和交流电压试验时击穿强度的比值	389
1.4.7	低频 (0.1 Hz) 试验	391
1.4.8	用 50 Hz 半波进行耐压试验	393
1.4.9	匝间及冲击电压试验	394
	参考文献	398

电机绕组的结构材料

1. 导线材料[⊖]——铜、铝和合金

R. 诺布洛克 (R. Knobloch)

1.1 导线材料的分类

电机和电器用导线材料的主要性能是它们的电导率，也即电阻率。此外对这些材料还提出了机械和耐热性能的要求，在选用它们时，这些要求就成为考虑的条件。最后还要考虑工艺的影响，这些影响可能对某些金属和合金材料能否使用起决定性作用，例如在腐蚀性大气中的应力腐蚀、含氧铜硬焊时的氢脆性、机械成形产生的冷硬化、热处理时产生的脆化等等。

除了技术方面的必要性外，还应注意考虑经济效果，对此，用价值分析方法是有所帮助的。

1.1.1 常用材料

1.1.1.1 铜

在电工技术中，铜 (Cu) 是最主要的导线材料。

把含铜量低于 4% 的矿石冶炼出来的粗铜通过精炼作为

⊖ 在本节中所采用的度量衡单位符合1969年7月2日米制会议的协议和关于度量衡的德国法规。

从标准和其他方面引用的弹性数据和强度数据用系数10(代替9.80665)由 kg/mm^2 换算成 N/m^2 ，以得到更凑整的数值。硬度数据仍保持迄今延用的数值，不用国际标准单位或其他单位。

加工半成品所需要的原材料。铜的精炼形式分两种：高温炉精炼铜——铜在精炼炉中通过适当的反应从不纯物中分离出来；电解精炼铜——在电解中分解出的铜叫做电解铜，即通过电解把铜由不纯物中分离出来。电工技术中的导线通常用电解铜。

就电导率而言，在室温下铜仅次于银，居第二位。同样它具有良好的热传导、好的冷成形性与热成形性和高的耐腐蚀性。铜在通常的状态下是“软”的，并且只能通过冷成形使它达到较高的强度值和具有较大的硬度。铜强度的提高取决于其变形量，从 $\sigma_s = 200 \text{ N/mm}^2$ （软的）到 $\sigma_s = 370 \text{ N/mm}^2$ （硬的），也即布氏硬度从 $\text{HB} = 45$ 到 $\text{HB} = 100$ 。添加少量的银（0.025~0.25%重量的银）提高了铜的再结晶温度，由此使硬度持久性提高。尤其是在冷硬化后的软化温度有显著提高和在高温下的蠕变强度有显著改善。而电导率仅受到很小的影响。银的含量超过重量的 0.25%，性能实际上不再能进一步改善。加入少量的附加元素，例如镉、镁、锰和铬等，便可以有效地改善铜的强度值。然而，这时电导率会或多或少地降低。工程技术上用的纯铜在室温（20℃）的情况下，最高电导率为 $58 \times 10^6 \text{ 西/米}$ 。电导率随着温度的升高而降低，在 230℃ 时约为 $30 \times 10^6 \text{ 西/米}$ ，而在 500℃ 时仅为 $20 \times 10^6 \text{ 西/米}$ 。同样，由于合金成分或杂质也会使电导率降低〔2, 3, 5〕。

按照 DIN 1708 和 DIN 1787（注：DIN——西德工业标准）用于半成品的铜可以分成三类：

含氧铜类：这类铜含有一定量的以氧化铜（ Cu_2O ）形式存在的氧，氧化铜作为独立的组织成分存留在晶界上，而且在显微磨片中就能看见。在铜中仅可溶约 0.002% 的氧。

无氧铜类：不是还原的，就是说将阴极铜在惰性大气中再熔炼，以防止吸收任何氧。

无氧铜类：用磷脱氧，磷残余含量为 0.002~0.05%。磷可以全部或部分地用其他氧化剂，例如锂（Li）来置换。

按照 VDE 0201/1934——电工技术用铜规范——规定如下：

§ 2 铜导线必须要用电工技术用铜制造。

§ 3 对于电工技术用铜在 20℃ 时，电阻率不允许超过下列数值（单位为 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ）：

1. 对于退火软线为 $1/57 = 0.01754$ ，
2. 对于冷拔线强度高于 $30\text{kgf}/\text{mm}^2$ ($\approx 300\text{N}/\text{mm}^2$)；
直径 $\geq 1.0\text{mm}$ 为 $1/56 = 0.01786$
直径 $< 1.0\text{mm}$ 为 $1/55 = 0.01818$

此规范主要适用于强电导线和强电电缆。

1.1.1.2 铝

铝是继铜之后导线材料中另一种最重要的金属，除了硅之外，它是地壳中最多的有代表性的金属。工业上提炼它的最重要原料是铝土矿。对此，第一步要生产出一种尽量纯的铝矾土（氧化铝 Al_2O_3 ），第二步通过电解把这种铝矾土还原成金属铝。特别是由于它的比重小、导电性、导热性和成形性好而表现出其优越性。铝的强度值低于铜的强度值，在 $\sigma_b = 40 \sim 170\text{N}/\text{mm}^2$ 之间。特别是在机械负荷作用下铝要比铜容易蠕变得多。

由于它与氧具有很大的亲合力，所以铝总是覆有一层氧化层，这层氧化层能防止继续受侵蚀。

由于电化学接触电位序中的铝的位置，使得它在不采取特殊防护措施下，不应和贵重金属或合金（如铜、黄铜、锡、