

本书比较系统地讲述了金属在真空中加热时，在不同的温度和真空度下与炉内剩余气氛以及结构材料所发生的各种物理化学反应，并运用热力学和运动学的理论，根据大量数据进行分析。

书中详述黑色和最重要的有色、稀有以及难熔金属在真空中加热的特点，阐明真空热处理的适用范围，按不同的工艺要求将真空电炉加以分类，指出如何选择合理的结构并介绍设计新型电炉的远景。

此书可供从事热处理工艺的科研人员，真空热处理电炉的设计、制造或使用人员阅读，也可供高等院校热处理专业的师生参考。

ЭЛЕКТРОПЕЧИ ДЛЯ ТЕРМОВАКУУМНЫХ ПРОЦЕССОВ

Э. Н. Мармер С. Г. Мурованная

Энергия 1977

* * *

真空热处理电炉

〔苏〕 Э. Н. 马尔麦尔 С. Г. 穆罗凡娜娅 著

吴明义 译 戚竞存 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证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $6 \frac{5}{8}$ · 字数 145 千字
1979 年 10 月北京第一版 · 1979 年 10 月北京第一次印刷

印数 00,001—12,400 · 定价 0.54 元

*

统一书号：15033 · 4752

译者序言

真空热处理电炉近十多年来在世界各先进工业国家中得到了迅速发展。真空热处理所涉及的范围甚广，包括金属材料的真空退火、淬火、回火、渗碳和渗氮等热处理过程，难熔粉末金属加压烧结，电子器件的去气退火，航空机件的钎焊，钢材的金属扩散涂敷等等。随着核技术、空间技术以及其它尖端科学技术的发展，更需要在真空中制取新的无机材料和特纯物质。真空热处理过程能使被处理材料和工件的性能显著改善，材质得到充分利用，已显示出重大的技术和经济效果；加之无公害，所以国外真空热处理电炉比其它控制气氛电炉的发展快得多。

在真空电炉内，可以有效地防止金属表面氧化、脱碳，且能去气脱脂，其优点是显而易见的；但是在低压强下由于某些金属易于挥发，也会造成材质逸损或由于合金成分的变化而改变性能。另外，真空炉内并非绝对真空，被处理材料在加热过程中仍会同炉内的剩余气氛和结构元件在一定程度上相互作用。炉内存在着金属的挥发和沉积，氧化和还原，化合物的形成和分解，气体的吸附和解吸等复杂的物理化学过程，这些过程随材料的性质、真空度和温度的不同而显现其强弱，相互之间又可互相促进或制约。因此只有充分掌握这些变化规律，才能制订出合理的真空热处理工艺规范，设计或选择结构合适的真空热处理电炉。

限于译者的水平，译文中难免有疏误之处，请读者批评指正。

译者

附 表

书内的计量单位全部采用国际单位制。其中真空度的计量单位不再用“托”而用“帕”。以前国内编写或翻译的有关真空技术著作中绝大多数都采用“托”(Torr, 毫米汞柱), 而按照国际单位制, 压力单位应是“帕”(Pascal, 牛顿/米²), 所以真空度的单位也是“帕”。“托”和“帕”之间的关系是: 1 托 = 133 帕或 1 帕 = 0.75×10^{-2} 托。习惯于用“托”的读者在阅读本书时可按 1 帕 $\approx 10^{-2}$ 托进行粗略的换算。现附《国际单位制和工程单位制的换算表》和《压强单位换算表》, 供对照参考[⊖]。

国际单位制和工程单位制的换算表

参 数	国际单位制	工 程 单 位 制
压 强	帕(牛顿/米 ²)	1 毫米汞柱(托) = 133 帕
漏 气 速 率	厘米 ³ /秒	1 升·微米汞柱/秒 = 1.3×10^{-3} 厘米 ³ /秒
蒸发速度(氧化速度)	公斤/米 ² ·秒	1 克/厘米 ² ·秒 = 10 公斤/米 ² ·秒
出 气	厘米 ³ /克	1 厘米 ³ /100 克 = 10 厘米 ³ /公斤
机械应力(极限强度、 瞬时强度)	兆帕	1 公斤/毫米 ² = 9.8 兆帕
冲 击 韧 性	焦耳/米 ²	1 公斤·米/厘米 ² = 98 千焦耳/米 ²
扭 矩	焦耳	1 公斤·米 = 9.8 焦耳
磁 场 强 度	安/米	1 奥斯特 = 80 安/米
磁感应强度	特斯拉	1 高斯 = 10^{-4} 特斯拉(韦伯/米 ²)

压强单位换算表

	帕	托	大 气 压	达因/ 厘米 ²	巴	毫 巴
1 帕(牛顿/米 ²)	1	7.5×10^{-3}	9.87×10^{-6}	10	10^{-5}	10^{-2}
1 托(毫米汞柱)	133.322	1	1.316×10^{-3}	1333.22	0.00133	1.33322
1 大气压	101325	760	1	1013250	1.01325	1013.25

⊖ 此段为译者说明

目 录

译者序言

附 表

第一章 真空热处理概论	1
1-1 真空在热处理中的作用	1
1-2 真空电炉气氛特点	3
1-3 真空热处理的温度	7
1-4 金属同周围气体相互作用的热力学分析	10
1-5 金属及其主要化合物的热力学特性	19
1-6 金属同抽稀气体相互作用的运动学分析	28
1-7 抽稀气体与常用金属的相互作用	35
第二章 真空电炉的主要结构元件	78
2-1 对剩余气氛压强和成分的要求	78
2-2 加热器	81
2-3 隔热体	89
第三章 黑色金属的真空热处理和加热用电炉	93
3-1 退火和烧结工艺过程	93
3-2 淬火	129
3-3 钎焊	149
3-4 化学热处理	153
第四章 最重要的有色金属、难熔金属和稀有 金属的真空热处理和加热用电炉	155
4-1 加热铜的工艺过程和电炉	155
4-2 加热钛、锆和铪的工艺过程和电炉	156
4-3 加热钒、铌和钽的工艺过程和电炉	171
4-4 加热铬、钼和钨的工艺过程和电炉	179
参考文献	190

第一章 真空热处理概论

1-1 真空在热处理中的作用

按照 А. П. Гуляев 的看法〔1〕, 二十世纪末, 由于采用了金属在真空和惰性气氛中的热处理, 就可以排除周围气氛对被加热金属的氧化、脱碳和其它的有害影响。

抽稀薄了的气氛——真空, 正日益广泛地应用于金属的加热, 因为对于元素周期表中的 II ~ V 族的大部分金属而言, 还选择不到一种保护气氛, 在加热时可以完全不同它们发生反应。此外, 建立真空和调节压强比较方便, 也促进着真空热处理的发展。

Е. М. Савицкий 和 Г. С. Бурханов〔2〕认为难熔金属在超高真空 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 帕中热处理, 是提高塑性的最有效途径之一, 其主要原因是氧化物可以蒸发掉。

迄今为止, 曾经只能在大气压强下于氧化性或还原性气氛中进行的淬火, 目前已经趋向于在真空中加热, 在惰性气体的气流或在油液中冷却〔3、4〕。

化学热处理方面, 开始采用真空气氛供金属的渗碳、渗硼和渗氮之用。

越来越多的工艺过程, 甚至在空气中锻、轧和压制的金属坯件也要求预先经过真空加热。这对于加工化学性能活泼的第 IV a 和 V a 主族元素尤为重要。

在真空贯通式电炉中进行钢管热处理时, 每一吨产品的折算费用与氮分解的控制气氛炉中热处理相比, 降

低 1/3。另外奥氏体钢钢管在真空中加热后，没有晶间腐蚀的倾向〔5〕。

真空烧结的优点在于可以减少被烧结工件受氮和氧的沾污，改善它们的质量，保证最良好的扩散条件，排除挥发性杂质。

Я. Е. Герузин〔6〕指出，位于细孔内惰性气氛中的质点，烧结时间随压强的平方值而变；而当细孔内是高真空时，烧结速度只与烧结过程的动力参数：温度、蒸发潜热、扩散活化能量有关。这一点已由 Г. Хаузнер 关于钽烧结〔7〕和 В. М. Гропянов 关于在氩气及在真空中烧结特别难熔物质〔8〕等论述所证实。在这些著作中指出，工件在真空中烧结的气孔率比在氩气中烧结要低。

在真空中烧结氮化钛〔9〕和氯化锆〔7〕时，可观察到烧结过程活化。

真空烧结对于新成分的材料研制也有很大意义。

对于基本元素和合金元素在处理温度下蒸发速度大的金属和合金，以在惰性气体中加热为佳。但是当采用惰性气体时不能不考虑到，除价格高外，其中还残留着活性气体（表 1-1）。

例如在牌号 А 的氩气中尚含有 0.003% 的氧，0.01% 的氮和 0.03 克/米³ 的水蒸气。当抽真空至 1~10 帕的剩余压强时，活性气体的浓度可降至这一等级。这在工业条件下是轻而易举的，而且还可使剩余压强降至 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 帕，这时活性气体的浓度，以氧为例，可降低至 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ % 以下。而在工业条件下要把惰性气体中氧的浓度降低和控制到这一水平还不可能。

技术经济计算表明，当采用保护气氛或真空若工艺上效

表1-1 惰性气体中的杂质含量

气 体	牌号, ГОСТ或TY	杂质成分最高值 (容积%)				水 蒸 气		价 格 卢布 /米 ³
		氮	氢	氧	碳化氢	(克/米 ³)	露点 (°C)	
氩	A, ГОСТ10157-73	0.01	—	0.003	—	0.03	-50	1.6
氩	Б, ГОСТ10157-73	0.04	—	0.005	—	0.03	-50	1.5
氩	В, ГОСТ10157-73	0.1	—	0.005	—	0.03	-50	1.4
氩	特纯, МРТУ 6-02-377-66	0.005	—	0.001	—	0.02	—	—
氩	工程用 МРТУ55-77-66	0.12	0.06	0.005	0.005	—	-50	8
氩	高纯度 МРТУ55-77-66	0.005	0.0025	0.002	0.003	—	-55	10

果等同, 从经济上考虑, 还是选择真空有利^[5]。

1-2 真空电炉气氛特点

真空电炉中剩余气氛的成分取决于一系列因素:

1. 众所周知在正常条件下, 空气中含有 79% 氮, 20% 氧和 1% 氩。此外空气中还存在着水蒸气。在 20°C 时水蒸气的极限含量为 18.5 克/米³ 或 2.3% (容积百分比)。当相对湿度为 50% 时水蒸气的浓度稍大于容积百分比的百分之一。

在各种类型的真空电炉中, 对剩余气氛的成分进行研究表明^[10], 在用油蒸气泵抽真空的炉子中可以观察到以下特点: (1) 假如在冷炉中水蒸气的含量为 80~90%, 当加热至 1000~1200°C 时, 会降低至 1~4%; (2) 氧的浓度在 1000°C 以上时低于 10^{-1} ~ 10^{-2} %, 也就是比在大气压强下的空气中低 2~3 数量级; (3) 在同样的温度下, 氮的相对含量降至 1~10%, 即比在空气中低 1~2 数量级; (4) 氢的浓度在室温时为千分之几, 而当在 1000°C 以上时, 可以增

加至 40~60%。

由此可见，真空电炉内剩余气氛的成分在加热过程中起了质的变化。一氧化碳和氢气的浓度增加了，它们对于在被加热金属表面上可能形成的多种形式氧化膜而言是还原性的。

具有氧化作用的气体（氧气和水蒸气）含量，在加热过程中大大减少。

2. 对炉子密封程度的要求取决于允许的漏泄速率，因为它能对剩余气体的成分产生显著的影响。

在大量试验的基础上，对外界空气在不同的压强下进入真空电炉的允许漏泄速率有个大致的规定： $10\sim 10^{-2}$ 帕时为 10^{-3} 厘米³/秒·米³（升·微米汞柱/秒·米³）； $10^{-3}\sim 10^{-4}$ 帕时为 10^{-4} 厘米³/秒·米³；当压强低于 10^{-5} 帕时为 $10^{-5}\sim 10^{-6}$ 厘米³/秒·米³。

根据漏气速率采用不同抽气速率的真空泵可以保持炉内压强恒定。

漏气速率、温度和剩余压强实质上表示出了某一工艺过程的特征。

3. 从炉子结构元件表面解吸的气体对剩余气体的成分具有影响。尤其是当结构元件采用陶瓷和碳素石墨这类吸附气体能力强的材料时影响更甚。

这些结构元件与在装出料过程中进入炉内的空气或其它气体接触时间的长短，会显现出重大的影响。

4. 真空电炉的抽气方法对剩余气体的成分也有影响。因油蒸气泵和机械泵的油蒸气会返入炉内，吸附作用泵（放电式、离子式、低温式）抽气时具有选择性。

由此可见剩余气氛的成分取决于许多因素，要考虑周全

是很难的。当压强低于 10^{-3} 帕时,可以用ИПДО-1,ИПДО-2,МСХ-3М等质谱分析仪来测定剩余气氛成分的连续变化情况。

对于较高的压强则可以利用压强变换器的原理进行测量。文献[10]作者所设计的专用装置可以用来测定炉内压强高于 10^{-2} 帕时的气体成分。

气体逸入加热室的原因繁多,下面按不同的气体分别叙述。

氧气 它显现在炉内的原因:炉内充入空气时吸附在物体表面上的氧气解吸,氧化物和含氧物质分解以及空气经过炉子密封不良处漏入。

氧气从陶瓷材料上解吸在所有温度下都会发生,而从金属、碳素石墨等材料上解吸则只在 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ 时发生。高于这一温度后,由于化学反应,氧是以气态化合物,通常是以一氧化碳、二氧化碳和易挥发的金属氧化物的形态释放出来的。在较高的温度下,在物体表面上的吸附氧气和化学吸附氧气与氢气和含碳气体之间会产生相互反应。

氧化物和含氧化合物的分解是在最高的温度区域中,即实际上在加热室中发生。分解生成物会对加热器和被加热材料产生影响。耐火材料炉衬,承受电压的电瓷绝缘器,陶瓷料架等都属于用含氧化合物制造的炉子结构元件。将这些氧化物与在加热器和被加热材料上形成的氧化物的分解蒸气压强作一比较,表明在原则上采用氧化物陶瓷材料作为炉子结构元件的可能。

例如主要供制造真空炉陶瓷零件用的氧化铝的分解压强在 1723°C 时为 1×10^{-3} 帕[98]。在这一温度下,氧化铈的分解蒸气压强为 10^{-5} 帕,而氧化钨则为 10^{-2} 帕。因此在上述温

度和氧的分压强为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 帕时，炉内可以采用氧化铝耐火砖于加热钼，却不可以用于加热铌。

假如在最高温度区内发生氧化物分解的话，那么经过炉子密封不良处逸入炉内的氧气必须透入加热室内与被加热的元件和被处理材料才能发生化学反应。很明显，氧的分子实际上是不可能直接穿入由隔热屏或陶瓷隔热体所构成的加热室的。氧气分子在同它们的热表面碰撞时，按其热力特性会与这些表面发生反应，因而进入加热室与被处理材料接触的机率很小。

在不采用隔热体的场合，例如在直接电接触加热装置中或者炉料是在与加热室分隔开的单独冷却室中冷却时，氧与被热处理材料可以毫无阻碍地相互作用。

水蒸气 真空炉内的水蒸气主要是从炉子的结构元件上解吸出来的，特别是从陶瓷材料上，因为它们与空气接触时，会吸收潮气。在真空电炉中，如前所述，水蒸气的浓度在加热前达到 $70 \sim 80\%$ 。随着温度升高，至 1000°C 时，水蒸气由于与炉内被加热元件发生反应而降低至 $1 \sim 4\%$ 以下。

氮气 在剩余气体成分中氮的来源可能是炉内结构元件和炉料在同空气接触后，从其表面上解吸，经过炉子密封不良处漏泄入炉或是由于制造炉衬、电绝缘材料和承受摩擦部件的氮化物发生分解而产生。例如，在 1500°C 时氮化硼的分解蒸气压强为 10^{-1} 帕，而氮化铌则为 10^{-4} 帕。氮化钼的蒸气压强在 1500°C 时等于 4×10^0 帕。因此当加热铌时，不能采用氮化硼，而加热钼时却可推荐使用。

碳和含碳气体 当氧和水蒸气同石墨和其它含碳物质起反应以及碳化物分解时会形成二氧化碳。在真空炉中出现其它含碳物质是由于真空泵的工作液体系真空油（指油扩散泵、

油增压泵和前级油封机械泵) 所造成。

采用苏联的油蒸汽真空泵时, 油蒸汽向被抽容器中的返油速率为 $1 \sim 5 \times 10^{-3}$ 克/厘米²·时, 利用各种形式的挡油器后, 可以使返油速率降至 $0.1 \sim 0.02 \times 10^{-3}$ 克/厘米²·时〔12〕。

这样, 在中型的真空电炉中, 当用总抽气速率为 5000 升/秒的油蒸气真空泵抽真空, 若不用冷阱时, 每一小时的返油量为 1~5 克, 而采用冷阱时只有 0.1~0.003 克。

真空油是高分子的有机物质。在其蒸气的组成成分中, 分子量为 56~154 的成分占大多数。当油蒸气与加热至 300~400℃ 以上的表面接触时就会分解, 放出氢、碳和各种成分的碳氢化合物。因此在 1000℃ 以上, 当用油蒸气真空泵抽真空时, 电炉内的剩余气体成分几乎是一样的, 而与隔热材料的类型(用氧化铝制造的隔热屏和石墨隔热体) 无关。在剩余气体中要避免碳的存在, 可以采用无油抽气装置〔13〕。

碳和含碳气体会同加热器、隔热屏和被加热的材料相互作用, 在一定的条件下形成碳化物。因此要确定含碳气体的允许分压强时, 应该参照第二章中的推荐值。在真空炉中必须达到的剩余压强应根据气体的分压强之和而定。分压强又应根据每一种具体气体对被加热炉料和制造加热室材料的影响来选择。

1-3 真空热处理的温度

在真空中将金属加热供热处理、压力加工、去气和烧结以及化学热处理等需要, 这些都属于真空热处理的范围。

金属和合金的热处理在于人为地改变它们的组织结构。结构的变化取决于金属的原始状态和热处理规范: 温度、加热和冷却速度、保温时间和周围气氛的特点。

A. A. Бочвар 建议热处理种类划分如下〔14〕:

1. 第 I 类退火——指消除内应力、再结晶或均匀化。
2. 第 II 类退火——在接近平衡条件下使相变再结晶。
3. 淬火——固定高温相或过渡的非稳定状态。
4. 回火或时效——变更淬火所造成的状态。
5. 化学热处理——在加温时用化学方法渗入各种合金元素。

还必须补充热机械加工类,它是把热处理与压力加工相结合。

进行各种热处理的温度范围取决于金属本身、工件制取的方法(铸造、锻造、轧制、金属陶瓷烧结)和前一道的加工方式(加压、切削等)。

A. A. Бочвар 推出一个法则,按此法则所有金属的开始再结晶温度 $T_{\text{рекp}}$ 可以近似地取作 $0.4 T_{\text{пл}}$ ($T_{\text{пл}}$ 为相应的熔化温度)。在此温度下金属的结构在 0.5~1 小时内发生变化。

第 II 类退火温度的特点是略高于金属的相变温度。

淬火的温度也取决于相变温度。

金属的性能可以靠改变回火的温度和时间来调节,以获得必需的硬度、强度和塑性。

化学热处理的温度,通常根据保证零件有良好使用性能的条件(一定的渗透深度,以及对基体金属有足够的附着强度等)加以选择。

金属压力加工前加热,通常要多次反复进行,直至零件达到规定的尺寸和形状为止。

在电真空和电子工业上广泛使用的去气加热可以看作是一种独特的加热类型。去气加热的温度一般接近再结晶退火

的温度；但是在下面将要讲到的一些场合下，可以接近熔化温度。

分析文献资料后，可以把真空加热划分为两个基本的温度范围。第一个范围包括消除应力、再结晶、去气以及压力加工加热的各种退火规范，它们通常是在相对温度 $T_{\text{отн}}$ （处理温度同熔化温度之比）为 0.45~0.65 范围内进行的。同 Бочвар 法则相比退火温度相对提高了一些，这是因为为了提高热处理的经济指标必须强化加热过程的缘故。第二个范围则以烧结过程和某些高温退火为其特征，它们是在相对温度为 0.8~0.9 条件下进行的。在表 1-2 中列出了某些金属在上述相对温度时的加热温度值。

表1-2 某些金属在相对温度0.45、0.65、0.8
和 0.9 时的加热温度值

金 属	各相对温度下的加热温度(°C)			
	0.45	0.65	0.8	0.9
铜	340	610	815	950
银	280	530	720	840
金	330	600	800	930
钛	600	1000	1280	1480
锆	680	1100	1420	1630
钨	850	1350	1725	1970
钒	700	1150	1450	1700
铌	950	1500	1900	2200
钽	1200	1850	2350	2650
铪	710	1150	1475	1690
钼	1000	1600	2000	2350
铈	1400	2100	2650	3000
铁	540	910	1180	1360
钴	520	880	1145	1320
镍	505	850	1110	1280

1-4 金属同周围气体相互作用的热力学分析

加热金属时需要考虑的主要问题之一，就是选择一种对被处理金属根本没有影响或者影响甚少的气氛。

气氛选择不当，会使被加热工件的表面发生变化：产生氧化皮，渗入气体或使合金的某些成分挥发。如钢的脱碳或其中的铬和锰挥发，以及黄铜中的锌挥发等。

当被加热金属与氧、氢、氮、含碳和含氧气体组成的气氛相互作用时，气体会溶解于金属中，或者同它形成化合物。

在多相系统中是否可能进行物理化学过程，原则上取决于等压等温势 ($Z_{p,T}$) 的变化特点。假使 P 和 T 不变，当系统的等压等温势减小时 ($\Delta Z_{p,T} < 0$) 物理化学过程可能进行；若增大时 ($\Delta Z_{p,T} > 0$)，则不能实现。

在一般情况下当金属与气体相互作用时，等压等温势的变化取决于方程式：

$$\Delta Z_{p,T} = \Delta Z_r^0 + RT \left(\sum_i n_i \ln a_i - \sum_j n_j \ln a_j \right) \quad (1-1)$$

式中 ΔZ_r^0 ——标准状态下系统等压势的变化；

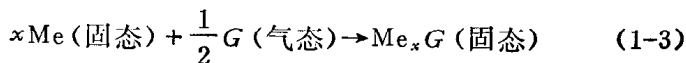
a_i, n_i ——反应生成物的化学活性和克分子数；

a_j, n_j ——材料原来的化学活性和克分子数。

标准等压反应势的变化（在 10^5 帕时）：

$$\Delta Z_r^0 = \sum_i n_i (\Delta Z_r^0)_i - \sum_j n_j (\Delta Z_r^0)_j \quad (1-2)$$

对于金属 (Me)——气体 (G) 系统形成化合物的最简单反应



已知, $\Delta Z_r^0 = (\Delta Z_r^0) Me_x G$ 。

也即是, 在 10^5 帕压强下, 相互作用的可能性决定于 $(\Delta Z_r^0) Me_x G$ 的符号。

在大气压强和较低的压强下, 化学活性可以通过反应气体的压强来表示, 若是混合气体时, 则以反应气体的分压强来表示。

气体的压强对等压等温势的影响可按式确定:

$$\Delta Z_{p,r} = (\Delta Z_r^0) Me_x G - RT \ln \sqrt{P} \quad (1-4)$$

化合物的分解蒸气压强表示其热力稳定性, 可按以下比值决定:

$$P_{Me_x G}^* = \exp \left[\frac{2 (\Delta Z_r^0) Me_x G}{RT} \right] \quad (1-5)$$

当 $P_G > P_{Me_x G}^*$ 时, 金属将同气体发生反应, 而当 $P_G < P_{Me_x G}^*$ 时, 化合物则会分解。

因此金属同气体的反应是否可能, 可以将这时形成的化合物的分解蒸气压强同相应气体的分压强作一比较而评定。这一方法对分析真空气氛中的相互作用很方便。

因为加热金属时, 通常气氛是由各种未分解的分子所组成, 所以在研究相互作用时通常不考虑同原子状态气体的反应。金属与气体的相互作用有不同的阶段: 气体吸附在表面上, 气体溶入金属; 产生新的相——化合物晶核; 形成晶体和薄膜; 膜的厚度增加。

要定出表面质量的标准是十分困难的, 因为它们取决于工艺要求, 难以统一。例如某些钢的异常层厚度允许达 0.1 ~ 0.15 毫米, 因为在热处理后还要进行磨削; 若对电真空器件, 如果异常层这样厚只能报废。

由于不少工艺过程的要求差异颇大, 比较适宜的评定金

属表面质量的主要标准是在给定的温度和工艺过程时间下，当金属同周围气体相互作用时，其表面上所形成化合物的可能和多寡。附加的标准是研究气体在金属中的溶解度。当溶解度高时，金属的晶格畸变，其热物理性能和强度也会随之

表1-3 氢气同周期

周 期	族			
	I	II	III	IV
2	Li O. Г.	Be 700°~0.4H.B.		
3	Na O. Г.	Mg 20°~30 H. B.	Al <1 H. B.	Si H. B.
4	K O. Г.	Ca O. Г.	Sc H. B.	Ti 300°~4·10 ⁴ 1100°~4·10 ³ O. Г.
	Cu 900°~2.4	Zn H. P.	Ga H. B.	Ge H. B.
5	Rb O. Г.	Sr O. Г.	Y O. Г.	Zr 300°~2.8·10 ⁴ 1100°~4·10 ³ O. Г.
	Ag 900°~0.5	Cd H. P.	In H. B.	
6	Cs O. Г.	Ba O. Г.	La 300°~1.9·10 ⁴ 1200°~4·10 ³ O. Г.	Hf O. Г.
	Au H. P.	Hg H. P.	Tl H. B.	Pb H. P.

代号含义：O. Г. —形成氢化物，H. B. —不同氢气相互作用，H. P. —金
度(厘米³/100克)。

而变化。

金属同氢气的相互作用

在表 1-3 中提供了各种金属同氢气相互作用的资料中金属的相互作用

V	VI	VII	VIII			
V 300°~5.2·10 ³ O. Γ.	Cr 1~2 H. B.	Mn H. B.	500° 1200°	Fe 1 8	Co 0.8 5	Ni 4 13H. B.
As H. B.	Se H. B.					
Nb 300°~4.2·10 ³ O. Γ.	Mo H. P.	Tc H. P.	Ru H. P.	Rh H. P.	Pd 500~10 1200°~8O. Γ.	
Ta 300°~3.2·10 ³ O. Γ.	W H. P.	Re H. P.	Os H. P.	Ir H. P.	Pt 1200°~1	
Bi H. B.	Po O. Γ.					

属实际上不溶解氢气，化学符号下的数字表示温度(°C)和在这一温度下的溶解