

现代大型铝电解槽文集

(第二册)

中国有色金属工业总公司 郑州轻金属研究院

81
24
2

现代大型铝电解文集

第二册

铝电解槽物理场

郑州轻金属研究院

一九九一年十二月

目 录

一、铝冶炼技术的数学模型	
[美国] A.R.Johnson	(1)
二、磁场的影晌	
[挪威] Reidar Huglen	(6)
三、考虑铁磁物质影响时电解槽中磁场计算模型	
Th.sele	(38)
四、V-350槽电磁最佳化	
[委内瑞拉] J.IMERY BUIZA	(48)
五、采用铁屏蔽以修正电解槽的局部磁场分布	
[意大利] G.Degan	(54)
六、磁隔离屏和厂房结构对电流效率的影响	
[埃及] J.H.Kent	(59)
七、铝电解槽的流体动力学(述评)	
[美国] Daniel K.Ai	(66)
八、铝电解槽金属与电解质流动形式和界面形状的数值计算	
[日本] Y.Arita,H.IReuchi	(73)
九、A-275磁流体的设计	
[加拿大] Vinko Potocnik	(82)
十、铝电解槽气动循环对氧化铝分布和界面运动的影响	
[美国] D.C.Chesonis A.F.Lacamera	(88)
十一、磁场和金属溶池的不稳定性	
[美国] N.Urata	(101)
十二、铝电解槽的稳定性——一个新的途径	
[法国] R.J.MOREAU	(107)
十三、铝电解槽电解质的传热与传质过程	
[澳大利亚] Kevin J.Fraser等	(116)
十四、用热计算模型计算铝电解槽结壳形状	
[西德] H.Pfundt等	(125)
十五、铝电解槽的二维热模型	
[美国] J.N.Bruggeman 和 D.J.Danka	(137)
十六、铝电解槽侧部炉帮与电解质间的平衡 基本原理	
[挪威] Jomar Thonstad 和 Svrre Rolseth	(148)
十七、不同电解槽的热损失	
[瑞铝] W.Schmidt-Hatting	(156)
十八、用数学模型确定预焙阳极的欧姆压降	
P.VARin	(167)

综 述 铝冶炼技术的模型

(美国) A. R. Johnson

沈贤春 译 干益人 校

摘 要

在过去的二十多年时间内,霍尔-埃尔特槽的模型工作,使研究者对制约这一由来已久的单元操作的基本规律有了更深刻的认识;由此增大了槽容量、提高了电流效率、改善了能量利用率、延长了槽寿命,使铝工业生产得到重大发展。可以确信,数字模型和物理模型必将继续成为今后铝冶炼技术进展的关键因素。

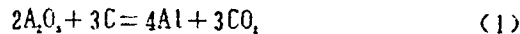
引 言

一个多世纪前,查理斯·马丁·霍尔和保尔·埃尔特开发了由金属氧化物还原生产原铝的工艺,虽然这一工艺沿用至今,本质上没有多大的变化,但单槽的容量却得到猛增,电解所需的总电流随之也相应增加;此外,生产1公斤金属所需的能耗,从70度下降到少于13度;在生产率和能量利用率方面取得的这些成就,一部分要归因于对制约该还原工艺的物理和化学基本定律的深刻认识。

最近几年,对整个工艺中的特定部分进行了描述的数学模型,被广泛应用来预测过程变化所产生的影响,来指导大容量、高效率的铝电解槽的设计。有两种数值技术较为常用,即有限差分法和有限元法。相对而言,有限元法具有较大的灵活性,特别是在处理复杂形状的时候;但难于建立。

热 平 衡

本还原工艺所需的总能量输入可以细分为生产金属所需的能量和由于电阻发热损失掉的能量。前者包括阳极和阴极上的各种过电压和下列反应:



的分解电压,分解反应和过电压总计约1.8伏或8.5度/公斤·铝;如果这一数值与当今最现代化铝冶炼厂的能量需求量相比较,本工艺最佳的能量利用率也只有50%,余下的5-9度/公斤·铝的部分,根据槽龄、热设计和操作效率的差异,以向环境散热的方式损失掉了。

在铝电解槽内,大部分热量来源于阳极和阴极之间的电极间隙。此处电压降与阳极电流密度、极间距尺寸有关。槽内衬的热设计总是一种折衷的方案,即在最大限度地减少能量损失和保持足够的极距以避免由于反应(1)的逆反应所造成的电流效率损失这二者之间权衡。

铝电解槽通过上部、侧部和底部散热,如图1所示。在总热损失量中,约有一半是从阳极和结壳部位损失掉的,而底部热损失只占10%左右。当能源丰富或电价便宜时,设计散热型的铝电解槽,使它在尽可能高的电流下进行操作更经济,因为此时产量最大;当能源紧张或价格昂贵或铝价便宜时,通过加强侧部和上部保温,最大限度地减少热损失可能更有利。

应用铝电解槽内衬和槽内腔室的两维有限差分模型是确定适宜的阴极设计的一个主

要因素。(在这种情况下,二维模型是充分的,因为槽的侧部和端部可以分别处理),在过去的一、二十年内,由于许多新型的抗电解质腐蚀的材料和设计技术已经得到应用,槽内衬的材料在腐蚀性电解质,其热特性不象早期设计的电解槽那样逐步恶化。本模型允许槽室按所需要的热流特性配置各种耐火材料和保温材料。

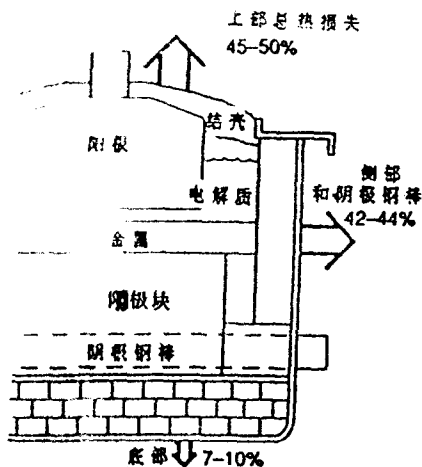


图1 霍尔槽典型的热损失分布

在热设计时,应该考虑在侧部内衬材料上形成一层保护性的凝固电解质;在底部内衬材料内,表示电解质凝固位置的临界等温线应该这样设置以便最大限度地减少阴极块应力和保护内衬材料的保温特性;铝电解槽典型的热流分析结果如图2所示。

热流问题的边界可以设置在槽四周任何方便的地方,但一般总是以槽壳和阳极上部复盖层为界;实质上这是一个自由边界问题。因为侧部炉帮的位置和形状本身就是待求解的一部分。模型把热传导、对流传热和热辐射三者关系结合起来,求出适宜的侧部炉帮和等温线位置。

本模型的主要缺点之一是电解质区域和金属区域的传热系数不确定。这些系数与局部流动状况高度相关,并且随着槽龄和槽条件不同有相当大的变化,因此,有必要对这些数据作出适当的选择,以便使它对现行的铝电解槽炉帮状况的反映是真实的。然后再将这些数据应用到其它设计中去。

最近十年,某些铝厂的能量消耗已经下降到一度/公斤·铝稍多一些。这是本模型的成功所在,除此之外,预期的槽寿命约增加了200至300天,这由安格利司铝厂的结果所证实。根据模型研究,该厂把氧化铝和捣固炭糊内衬改成更稳定的砖阴极设计。

磁 场

铝电解槽内,电流 J 和磁场 B 相互作用,对熔融电解质和金属产生一个净力。其方向垂直于电流和磁场,其表达式如下:

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2)$$

电解质和金属在该力作用下产生流动和界面变形;金属层流动既有对阴极表面冲刷

的不利一面,也有防止槽底形成结壳的有利一面,引起电解质/金属界面变形的作用力也能导致金属层表面上波动的增大,如果没有适当的办法加以消除,将造成铝电解槽的不稳定和电流效率的损失。

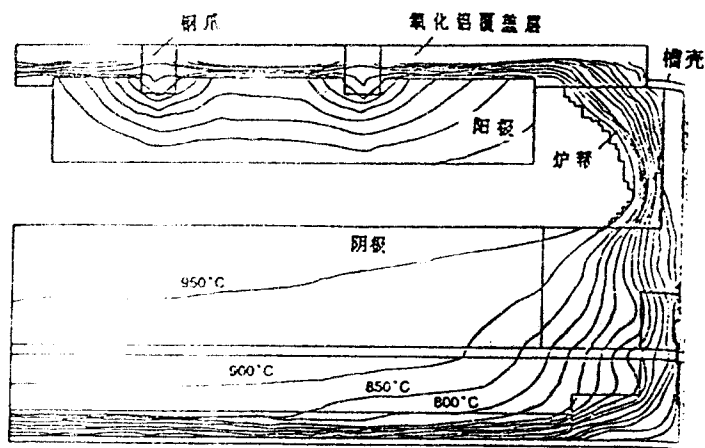


图2 热平衡模型示意的炉帮和等温线

铝电解槽内任意点上的磁场强度,取决于槽内外载流体流过的电流强度和载流体与该点的距离,这里载流体包括阳极和阴极母线、阳极组装件,电解质和金属以及槽的阴极。对于电流低于100KA的早期铝电解槽来说,磁场作用是微弱的,不必深究与此相关的问题,但在现代铝冶炼厂中,槽电流超过200KA,加深对磁场影响作用的了解,对于铝电解槽和相关的母线配置的正确设计是至关重要的。

在铝电解槽中,结构配置非常复杂,为了完全确定磁场和电流流向,需要三维模型,采用有限元分法计算可以确定槽内电位分布;采用有限差分法计算电流,而各点磁场根据把磁场强度与距计算点一定距离的电流联系在一起的毕奥-沙伐定率获得。根据方程(2)可以求得力;有了力的数据,由经典的奈维-斯托克斯方程可以确定熔体流动。

磁场模型在评估多种可供选择的槽设计和母线配置方面十分有用。显著减少磁场垂直分量,将使金属层平坦得多,四立柱和多立柱铝电解槽,正是人们加深对磁场认识而发展的结果,这些使槽电流增加到200KA以上成为可能。

实践证明,磁场模型在老厂旧槽改造设计方面也非常有用,当对母线配置作大的变更而需要化费巨大资额时,磁场模型能够给出节资的能降低垂直磁场的优选方案。现在,人们已经充分认识到,在一定条件下在电解质/金属界面将会产生波动并将继续发展下去,直到人为地增大极距或进行其它适当的操作才会消失;避免这种不稳定所需的操作条件和槽设计条件是根据对槽磁场的数学处理的结果而确定的,其结果是,虽然槽容量增大,但电流效率不会降低。

在华盛顿州塔科马铝厂,在设计和操作凯撒铝业公司的145KA原型试验槽时曾进

行过上述的研究。采用四立柱母线设计时，尽管垂直磁场降下来了，但槽固有的不稳定性没有变。在对磁场和感应产生的波动之间相互作用的模拟研究之后，加了端部立柱。结果稳定了槽操作，提高了能量利用率。图3表示垂直磁场的变化状况。图4则表示由于母线配置变化带来的电压和噪音改善的结果。

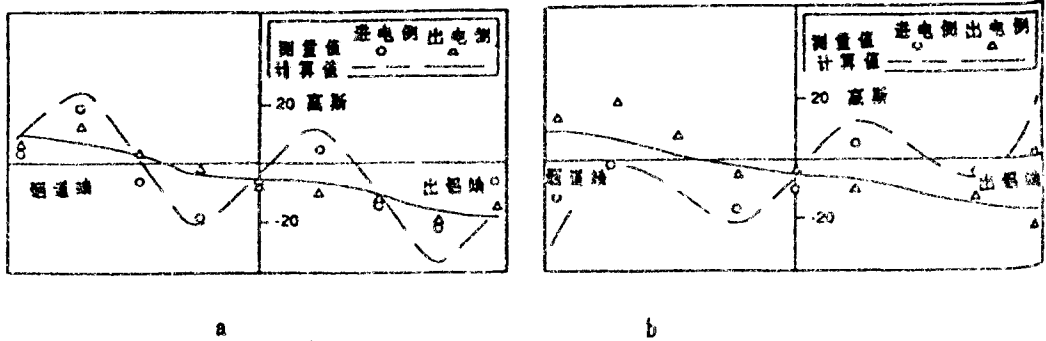


图3 铝电解槽垂直磁场的测量和计算结果

(a) 200KA 单立柱槽

(b) 195KA 四立柱槽

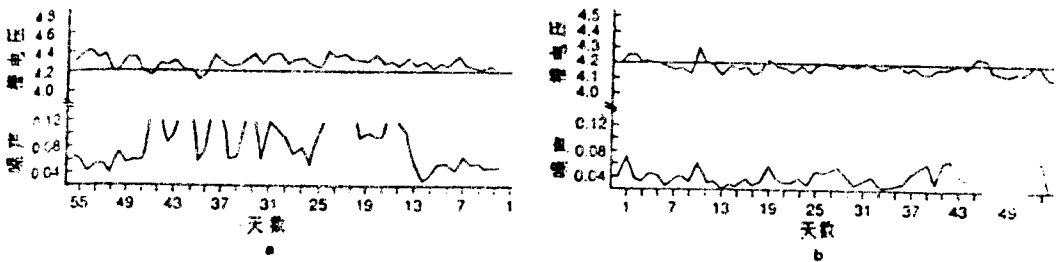


图4 槽电压和噪音

(a) 改进前

(b) 改进后

动态槽模型

由于上述提到的稳态模型不能完全表征一个典型的铝电解槽，所以又开发了铝电解槽的动态模型，来预测铝电解槽对输入参数(诸如槽电压、氧化铝、氟化铝、金属水平——为了模拟出铝，等等)逐步变化的动态响应，而把诸如槽电阻、电解质温度、分子比、金属和电解质水平、炉帮厚度等槽操作参数的反应作为时间的函数。

自动控制系统动态模型对开发能够最大限度地减少过程变化和干扰对槽平稳操作的不利影响的自动控制系统的控制方法最有用，随着槽温、分子比、氧化铝浓度和阴、阳极极距波动的减少，电流和能量利用率提高，出现低效率的不正常槽况的可能性也将减少。

大多数现代铝冶炼厂都能取得94—95%的电流效率。对这些电流效率的改善只有在偏离既定工艺目标的槽操作条件下才有可能。(即低分子比、低温)，在该条件下，动态模型将是过程控制的关键部分。

物理模型

除了采用数学模型来处理该还原工艺外，还建立了一些物理模型来探索本工艺的特性和制约本工艺操作的基本规律。采用不锈钢和铜材料，按一定比例加工了一台带有模拟阳极铝电解槽模型槽。本模型槽使用了吴德(Wood)金属，该金属在电磁力作用下产生流动。通过这种方法，考察了各种槽参数和非正常条件(如冷阳极、沉淀等)对液体金属运动的影响。

极距、电流密度、电解质运动和阳极状态对铝电解槽中气泡生成、逸出的影响也可以采用物理模型进行模拟，在该物理模型中，包括一个装有水和铝“阳极”的玻璃箱体。空气气泡通过有机玻璃板上的小孔来模拟铝电解槽中的气体生成。

译自《Journal of Metals》1988.10.p11-13

磁场影响

Reidar Huglen

王建恩译 干益人校

摘要

作为序言，将电磁理论的基本原理与铝电解槽中磁场的描述及磁性材料影响一并予以概述。然后讨论熔融金属和电解质中电磁驱动力的产生和平衡他们的原理。评述了影响金属中电流分布的因素以及电解槽中的金属流动和不稳定性。最后阐明了不同的母线设计和磁场补偿的方法。

序言

对铝电解槽磁场的理解已是最近二十多年中提高电流效率和降低能耗的主要因素。

可以找到一些关于铝电解槽中磁场影响的论文，但是还没有发现全面综合处理的论述。本章试图讨论磁场影响的几个方面，并给出磁场影响的概括性介绍。本章不侧重于讨论磁场的数学模拟。虽然在本章应用一些复杂的数学知识，但它并不超出理解该题目所必须的范围。本章只涉及基本向量，微分和积分计算方面的处理。

2.1 定义

当电流通过一个导体时就产生磁场。电流I磁场B之间的定量关系被称做安培定律，如下式：

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I \quad (1)$$

磁场向量B叫做磁感应强度。

对闭合线积分， $\oint d\vec{l}$ 是 $2\pi r$ ，r是半径。现取方程(1)为熟悉的形式：

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r} \quad (2)$$

式中 μ_0 称做真空中磁导率常数。B的单位是特斯拉，与其它物理量的关系如下：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 特斯拉} &= 1 \text{ 韦伯} \cdot \text{m}^{-2} = \frac{1 \text{ 牛顿}}{\text{库伦}(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})} = \frac{1 \text{ 牛顿}}{\text{安培} \cdot \text{m}} = 10^4 \text{ 高斯} \\ &= 10^8 \text{ 麦克斯韦} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned}$$

安培定律中磁导率常数值为

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ 韦伯}(\text{安培} \cdot \text{m})^{-1} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ 亨利} \cdot \text{m}^{-1}$$

在铝工业中磁感应强度的通用单位是高斯

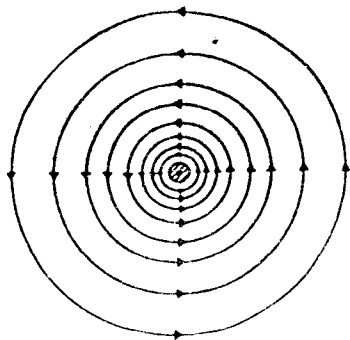


图2·1

绕长圆柱线周围的磁场分布，电流方向为垂直离开纸面的方向，用中心点指示。

长圆柱线附近代表磁场 \vec{B} 的磁感应分布示于图2·1。

为了帮助记住磁场方向，我们采用两个定则，即左手定则和右手定则。如图2·2所示，这取决于图2·2中所示的电流定义。通常电流定义是正电荷的流动。在此情况下磁场的方向是这样确定的：如果你的右手姆指表明电流方向，其余四指握住导线，则你的四指就将指明磁场的方向。反过来，如果你的左手姆指指明电子流动方向，则你的握住线的左手四指指明的便是磁场方向。如果电流的分布很对称容易解线性积分方程(1)，则可以用安培定律进行计算磁场。这种要求限制了安培定律在实际问题中的可用性。

毕奥—沙伐(Biot-savart)定律克服了上述问题，在该定律中，任何一点上的 \vec{B} 计算是采用把电流导体分成许多电流单元，计算每个电流单元在P点上的磁场分布 $d\vec{B}$ 。因此，在任何点上的磁场 \vec{B} 可以通过对整个电流模型的磁场分布的积分来进行计算；即

$$\vec{B} = \int d\vec{B} \quad (3)$$

毕奥沙伐(Biot-Savart)定律以向量形式写成下式

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi \cdot r^3} \quad (4)$$

式中 \vec{r} 是从该单元到P点的位移向量。记住 $d\vec{l} \times \vec{r}$ 等于 $d\vec{l} \cdot r \cdot \sin\theta$ ，这里 θ 是 \vec{r} 和 $d\vec{l}$ 间的夹角， $d\vec{B}$ 的量值为：

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{dl \sin\theta}{r^2} \quad (5)$$

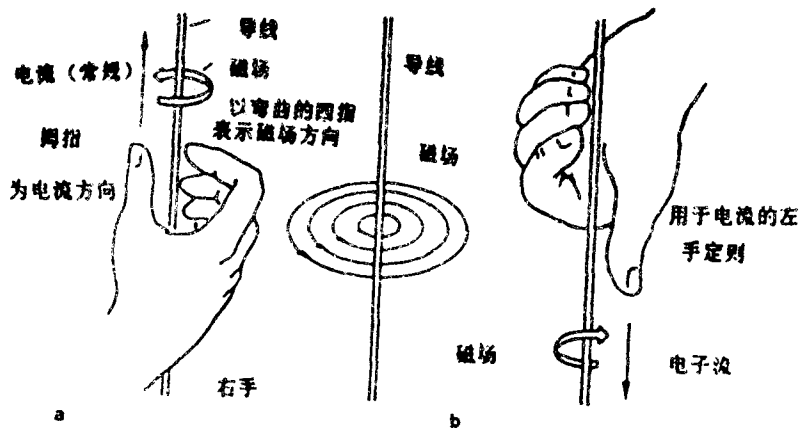


图2.2 磁场方向和电子流动方向

2.1.1 在长圆柱导线的情况下。

毕奥沙伐(Biot-Savart)定率的一个应用实例是由流经长圆柱导线中的电流所产生的磁场B的计算。图2.3示出其几何图形。电流单元dx引起的磁场dB的量值是由方程(5)得到的。

对于所有电流单元在P点磁场dB方向是相同的，即垂直方向进入到图面里。因此方程(3)向量积分成为标量积分：

$$B = \int d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \frac{\sin\theta}{r^2} dx \quad (6)$$

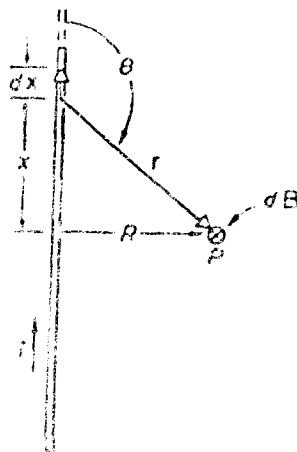


图2.3 根据毕奥沙伐(Biot-Savart)定率计算来自长圆柱导体产生的磁场B的几何图示

根据图2.3X、 θ 和r的关系如下

$$r = \sqrt{x^2 + R^2}$$

$$\sin\theta = \frac{R}{\sqrt{x^2 + R^2}}$$

因此B的表达式为

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R dx}{(x^2 + R^2)^{3/2}}$$

$$= \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \left[\frac{x}{(x^2 + R^2)^{1/2}} \right]_{x=-\infty}^{x=\infty} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{1}{R}$$

如果现在我们取电流为 I_p KA的铝电解槽的一条母线，则得到下列的表达式：

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{I_p \cdot 10^3}{R} \quad (\text{韦伯} \cdot \text{m}^{-1})$$

用高斯作测量单位，我们得到磁场计算的近似法则：

$$B = \frac{2I_p}{R} \quad (\text{高斯}) \quad (7)$$

2.1.2. 铝电解槽中的磁场

为了说明铝电解槽磁场的形成情况，可大致简单地按两步考虑。金属和电解质内的水平磁场分量主要决定于垂直的电解电流的向下流动。首先要考虑在一个非限定长度的矩形导体内均匀分布的电流所产生的磁场的模型。图2.4所示是在没有铁磁材料存在时该导体在外边界面产生的磁场。

第2步考虑与经阴极棒出槽的电流相当、分成等量的两路外向水平电流的电流。它也影响水平磁场，但如图2.5所示明显产生垂直磁场。若要说明阳极母线、阴极母线、立柱母线、阳极吊架(或导杆)和邻近槽所产生的磁场的模型，还可再分几步。

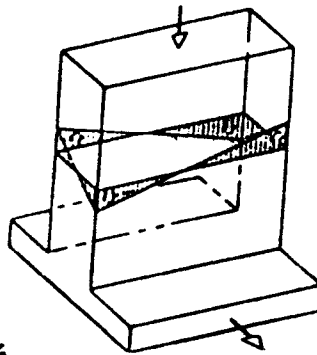
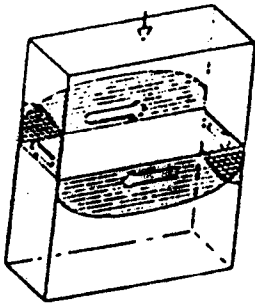


图2.4(左):非限定长度矩形电导体的水平磁场

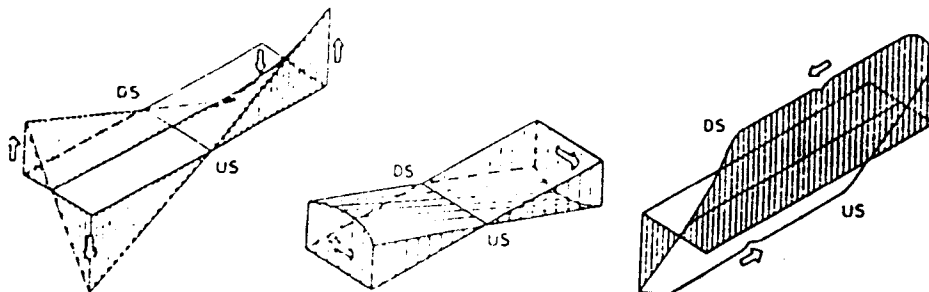
(参考文献1)

图2.5(右):电解槽电流模拟的第2步的垂直磁场

(参考文献1)

图2.6是铝电解槽的垂直、横向和纵向磁场模型示意图。磁场量值是垂直绘制的。这些假定磁场看起来都对称于电解槽中心，而实际电解槽往往并不如此，成为造成磁扰动的主要原因之一。后面将详细讨论这个问题。

图2.6 铝电解槽磁场模型示意图(参考文献2)
(Ds为出电端, Vs为进电端)



左:垂直磁场

中:横向磁场(磁场强度垂直表示)

右:纵向磁场(磁场强度垂直表示)

2.13 铁磁材料对磁场的影响

槽内磁场是由槽膛内外的全部电流决定的。但是，磁场分布的改变除受电解槽磁性材料的影响外，在一定程度上还受建筑结构及移动的车辆和吊车等磁性材料的影响。

对于5种铁磁元素(Fe、Co、Ni、Gd和Dy)及其与其它元素生成多种合金有一种特殊形式的相互作用，即交换耦合。其磁矩是平行刚性耦合。如果温度高于一定的临界值—居里温度，交换耦合就会突然消失，这种材料就变成了顺磁性材料。铁磁性转变温度为770℃。由于磁性材料的非线性特性及复杂几何关系，它们的行为也很复杂。如果将一磁性材料置于一磁感场内，它所产生的磁场改变了原来的磁场，那么在处理这种问题

时，通常采用两种磁场矢量，即磁化强度 \vec{M} 和磁场强度 \vec{H} (二者单位均为安培/米)。

磁感应矢量 \vec{B} 与这两个新矢量的关系为：

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \quad (8)$$

安培定律方程(1)可写成下式

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (9)$$

该方程在有磁性材料存在的情况下使用，其中 I 为实际电流。也就是说，它不包括

与M有关的磁化电流。 \vec{B} 值可用一个霍尔磁通计测得， \vec{H} 值则依照方程(9)计算出。然后通过方程(8)确定出M的值。有两个边界条件在解这一问题时很有用。已知在两界质之间的界面处与表面相切的 \vec{H} 分量及与表面正交的 \vec{B} 分量在该表面的两侧的值相等。

铁磁材料的非线性特性如图2.7的曲线1所示，该图表明了一种有可能用作槽壳的典型冷轧钢的 \vec{B} 与 \vec{H} 的关系。对于顺磁性和抗磁性材料， \vec{B} 与 \vec{H} 成正比关系：

$$\vec{B} = K_m \mu_0 \vec{H} \quad (9)$$

其中 K_m 为磁性介质的相对导磁率。铁磁材料的 K_m 远非线性。实验表明， K_m 不仅与 \vec{H} 值有关，而且由于磁滞作用还与钢的磁和热的经历过程相关。有许多原因会引起磁性改变。具体变化决定于材料的组成及其经历的过程，不过这种改变有一个大致趋势，如图2.7中的曲线1、2和3所示。其中有3个重要原因已证实与铝电解槽有关。正如前面所讲到的，当钢的温度接近居里温度时，有一种热效应造成其磁性消失。

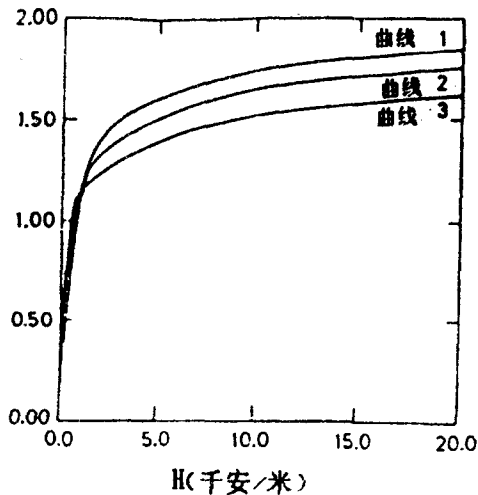


图2.7 钢的典型磁化曲线(B-H曲线) (参考文献1)

曲线1: 300°C冷轧钢

曲线2: 含1%以上碳的钢(或500°C)

曲线3: 含2%以上的钢(或600°C)

碳含量及碳-铁相型可改变钢的磁性。在钢壳温度较高时，碳衬中的碳成分以较高扩散速率扩散到钢壳中。在200到300°C，估计经过10-40年时间，钢的碳含量就会达到2%。在300-400°C的温度下，估计需要1-15年，而在400-500°C的温度下仅需0.1-2.0年。尽管机理较为复杂，钢的含量氮也是能使磁性减弱的第三个原因。百分之零点几的氮含量与百分之一的碳含量所引起的钢的磁性变化相似，见图2.7。

一般情况下，如果在导电母线和计算点的附近或之间的磁性材料存在，而计算时又忽略了它，那么母线系统的实际值就比计算值要小。但是，磁性材料可对磁场产生有害影响。安培定律表明，槽壳某部分的磁场强度的计算值的任何衰减，必然伴随着包围全部电解电流的槽壳其它部分磁场的增强。

图2.8表明了铁磁物质对磁场的反作用。图2.8a不存在铁磁材料，在与柱面电流 I 中心相距 r 处的磁场表达式为：

$$\vec{H}_0 = \frac{I}{2\pi r} \quad \text{和} \quad \vec{B}_0 = \mu_0 \cdot \vec{H}_0 \quad (11)$$

当电流 I 被以它为中心的铁屏蔽环绕时(如图2.8b所示)，磁场强度 \vec{H} 与没有磁性材料存在时的一样，即 $\vec{H} = \vec{H}_0$ 。非磁性材料的磁通密度也与以前的一样，即 $\vec{B} = \vec{B}_0$ ，而磁性材料的磁通密度则可在假定整个磁性材料的相对磁导率不变的情况下由方程(9)给出。

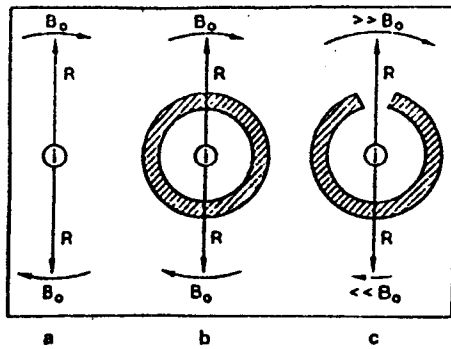


图2.8 简单的几何形状的铁磁材料对磁场的影响 (参考文献1)

- a) 无铁磁材料的情况
- b) 有铁环存在的情况
- c) 有缺口铁环存在的情况

如果铁环上有空气缺口(如图2.8c)，磁场分布就会大大改变。由于磁通密度在磁性材料处要大的多并具有连续性，缺口处的磁感应矢量 \vec{B} 及磁场强度 \vec{H} 肯定大于不存在磁性材料时同一位置的值。假定 K_m 值约为100，则空气缺口处的磁场强度就接近于：

$$\vec{H} = \frac{I}{d} \quad (12)$$

式中 d 为空气缺口尺寸。

这比无磁性材料存在时大 $2\pi r/d$ 倍。在通过空气缺口的径线上分布的磁场强度比没有这种磁性材料的存在时大的多，而在其它方向的径线上分布的磁场强度却小得多。

2.2 阴极槽壳外部的电流所引起的磁场的近似计算方法

计算方法

计算槽外母线系统在阴极槽壳内引起的磁场可采用两步近似法。第一步考虑平行和接近于一块无限厚的磁性材料表面的电流 I ，如图2.9所示。磁场可表示为假定由在磁性材料中与 I 同一位置的电流 I_{MM} 所产生的磁场。等效电流 I_{MM} 由下式给出：

$$I_{MM} = \frac{2I}{DK_m + 1} \quad (13)$$

式中 DK_m 为微分相对导磁率(假定在整个磁性材料内不变)。微分相对导磁率描述随磁场强度 H 变化的磁通密度 B 的变化, 如图 2.10 所示。其中三条曲线与图 2.7 同出一处。

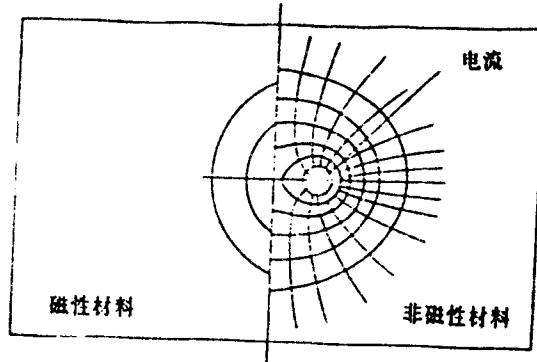


图 2.9 平行于无限厚磁性材料表面的外部电流所引起的磁场。(参考资料1)

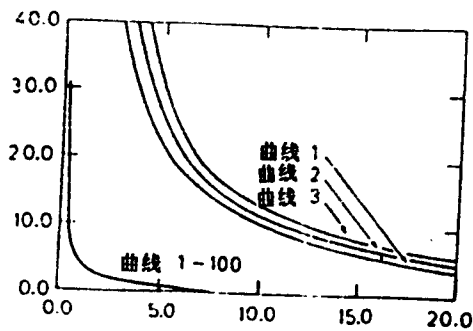


图 2.10 微分相对导磁率(DK_m)曲线图。

(图 2.7 有曲线 1-3 的说明) (参考资料 1)

第 2 步近似考虑磁性材料内部电流 (I_{MM}) 并计算出它在无限厚磁性材料表面以外所引起的磁场(如图 2.11 所示)。磁性材料外的磁场可表示为由于 I_{MM} 相同位置的非磁材料内的电流 I_{EQ} 所产生的。等效电流的计算式为:

$$I_{EQ} = \frac{2 \cdot DK_m \cdot I_{MM}}{DK_m + 1} \quad (14)$$

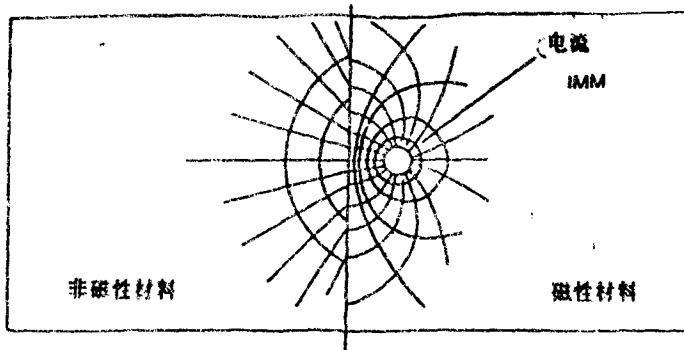


图2.11 平行于无限厚磁性材料表面的内部电流所引起的磁场 参考资料1

上述两步近似结合起来可得出电流 I 在钢壳的另一面所产生的磁场。似乎它是由电流 I 引起的而被磁衰减系数 MAF 减小了。

$$MAF = \frac{4 \cdot DK_m}{(DK_m + 1)^2} \quad (15)$$

就上述三组代表不同衰减程度的微分相对导磁率 DK_m 来说，磁衰减系数表现为磁场强度的函数，如图2.12所示。其典型值域为约0.1(屏蔽良好的相对非饱和钢)到0.4左右屏蔽差的磁退化的饱和钢)。

磁衰减系数的计算值比实际值小(假定屏蔽效果好)，因为在两步近似计算中假定的钢板都无限厚(和长度)的。但是，由于非线性磁性关系、热量及成分的影响，磁性材料的影响显然也不应期望计算得很精确。

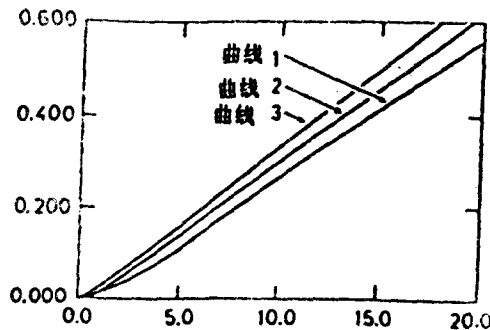


图2.12 磁衰减系数与磁场强度的关系曲线

(图2.7有曲线1-3的说明) (参考文献1)

2.3 有关磁性材料对磁场的影响时更加复杂的计算

电解槽钢架包括大量的复杂构件。为了用数学的方法模拟它们，有必要：

- a) 简化真实钢架，以便把模型体积和计算工作保证在合理限度内。
- b) 使模拟的构件单元形状能够通过合理的手段进行数学处理。