

锻造生产中的感应加热

〔苏联〕B·H·包格达諾夫 C·E·雷斯金 A·H·沙莫夫著

張子公譯

中国工业出版社



本书研究了鍛工毛坯感应加热的物理基础，感应器的计算方法；詳細闡述了主要类型的鍛工感应加热器及其部件的结构和使用。对鍛工感应加热装置的供电系統和电路元件作了詳細的介紹。最后討論了采用感应加热的鍛工車間設計特点和經濟指标。

本书可供工业部門和設計院的有关工程技術人員、高等院校和中等技术学校的师生参考。

譯稿經西安交通大学金屬压力加工教研組陈楚杰、宋飞、邵大文、儲家佑、王丽秩等同志校改。

В. Н. Богданов, С. Е. Рыскин, А. Н. Шамов
ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ В КУЗНЕЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ
МАШГИЗ, 1956

* * *

鍛造生产中的感应加热

張子公 譯

*

机械工业图书編輯部編輯 (北京苏州胡同 141 号)

中国工业出版社出版 (北京佳明路 10 号)

(北京市书刊出版事业許可証出字第 110 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印張 $6 \frac{3}{8}$ · 字数 165,000

1964 年 9 月北京第一版 · 1964 年 9 月北京第一次印刷

印数 0,001—4,750 · 定价(科七)1.20 元

*

統一书号: 15165 · 2920(一机-609)

原 序

在重工业中，特别是在它的主要分支之一的机械制造业中，很多工艺过程都是和金属加热有联系的。

其中，在机械制造工艺中占有相当大比重的锻造生产，有大量的金属需要在锻造和模锻之前进行加热。直到目前为止还采用在重油及煤气火焰炉内加热金属，在相当大的程度上阻碍着锻造和模锻技术水平的提高。

毛坯电加热的应用，促使金属塑性变形的加工工艺不断地完善。

现在所采用的电加热法形式很多，其中主要的是感应加热和接触加热。

采用金属感应加热的最初的研究工作，是于1926年在列宁格勒基洛夫工厂，由伏洛琴 (В. П. Вологдин) 教授和别良也夫 (Беляев) 工程师进行的。

之后，这些工作就由伏洛琴高频电流研究所 (НИИ ТВЧ) 和其他组织继续下去并投入工业应用。

莫斯科某厂最先拟制出锻工感应加热器的模型。

第一国家轴承厂是在轱环和钢球横轧中采用金属感应加热的首创者。

工艺科学研究院拟制了毛坯加热用的感应加热器的系列。

最后，作为所有这些工作的结果，在莫斯科小型汽车厂建立了全部用增高频电流^①加热的锻工车间^②。

有关采用工业频率^③电流感应加热的研究工作，曾在下列单

① [增高频电流]是指频率在50~10000赫芝范围内的电流，以区别于10000赫芝以上的狭义的高频电流，所以也有人称它为中频电流。但在本书里[高频]和[增高频]有时并不严格分开。——译者

② 参加建立该车间的有：国立汽车拖拉机工业设计院，高频电流研究所，西北工业电炉设计院以及莫斯科小型汽车厂。

③ [工业频率]往往简称为[工频]。——译者

4

位进行：苏联科学院烏拉尔分院、中央工艺及机器制造科学研究院（ЦНИИТМАШ）和列宁格勒加里宁工学院，在这里曾为感应加热的工业应用拟制了几种不同的装置。

在高尔基汽車厂探討了接触电加热的方法，及其所应用的工艺和必要的設備。

电加热装置在这几年的使用中表明，在最广泛的範圍內采用电加热是合理的。

在我国（苏联）随着强大的水电站系統的供电，将为工业中广泛采用金屬电加热創造很大的可能性。

本书所叙述的是感应加热装置（主要是用增高頻电流的装置）在实际应用中的一些問題的研究，同时也是在創建金屬感应加热工业装备中所积累起来的經驗总结。

作 者

2363/11

目 次

原 序

引 言	1
第一章 金屬感应加热	4
1. 感应加热的基础	4
2. 选择电流频率	7
3. 确定加热时间	9
4. 选择方形、矩形及管状毛坯的电流频率和确定加热时间	11
5. 用平行束的方法加热毛坯	12
第二章 感应加热装备的电路系统	14
6. 感应加热装置的电路	14
7. 发电机电压的自动调整电路	26
8. 增高频率发电机并列运行的特性	30
9. 感应加热装置供电电路的元件	31
第三章 各种毛坯的感应法加热	53
10. 毛坯的分类	53
11. 各类毛坯用的感应加热器的感应器和机构	55
第四章 加热装置的感应器的计算	65
12. 圆柱形多匝感应器的计算	65
13. 圈距不均匀的圆柱形多匝感应器计算	83
14. 加热断面毛坯用的感应器计算	87
第五章 感应加热装置的结构	88
15. 锻工感应加热器的基本元件及其分类	88
16. 锻工感应加热器的典型结构	118
17. 加热器的自动控制线路	133
18. 国外采用的锻工感应加热器	140
第六章 采用感应加热的锻工车间设计要点	153
19. 采用感应加热毛坯时, 锻造生产的工艺特性	153
20. 感应加热装置设计的技术任务	157
21. 锻工车间感应加热装置设计的程序	158

22. 采用感应加热的鍛工車間的特点	162
23. 机器制造厂鍛工車間感应加热装置設計的例題	164
第七章 感应加热装置使用中的某些問題	178
24. 鍛工車間感应加热装置的管理組織	178
25. 电动机-发电机組和感应加热装置的維護	180
26. 感应加热装置的調諧	182
第八章 在鍛工車間里采用金屬感应加热的經濟指标	189
27. 影响感应加热經濟的因素	189
28. 在莫斯科, 用火焰炉和感应法为鍛造和模鍛加热 1 吨 鋼料的成本的比較計算	192
参考文献	197

引 言

用电能来加热金属，有四种方法：

1. 在电阻炉内加热，金属装进炉膛里，电流流过加热元件发出热量，借辐射和对流使炉膛的温度升高，从而将金属加热。

2. 用接触法，电流由电源通过触头直接流过金属，使金属加热。

3. 将金属放入一定化学成分的电解液内，同时将直流电源的一极通入电解液，另一极通入待加热的金属^①。

在这种情况下，热量是在金属和电解液接触的边界上析出来的。

4. 用感应法，利用电磁感应，在金属内激励出电流，使金属加热。

在这种情况下，流过来自电源的电流的导体与被加热的金属之间，没有用导体联接起来，而是彼此之间离开一些距离。

金属在电阻炉里加热时，热量是从四周通过传热的方法进入毛坯的，因此，加热时间很长，并且有一系列的缺点。

用接触法^②加热毛坯是先进的，而且在所有形式的电加热中是最经济的，因此应该建议在一切可能的情况下最广泛地采用。接触加热的缺点是：应用范围有限制，因为它要求毛坯的断面和长度的尺寸有一定的比值；不能加热变断面的毛坯；很难使触头下面的金属均匀加热；平稳地调节加热速度有困难等等。上列缺点使得接触加热不能作为单一的加热方式用于锻工车间，而一定

① 这时，电解出来的气体附在金属表面，形成一薄层气膜，把金属和电解液隔开，于是金属和电解液之间就产生电弧，发出热量，使金属加热。——译者

② 有关在锻造生产中采用接触加热的研究工作，由高尔基汽车厂的工作者：工程师拉普辛（Лашин В. А.），纳坦松（Натанзон Е. М.），吉列诺夫（Тельнов Г. М.），波洛辛采夫（Положинцев В. М.）等在进行。

要和其他的加热方式配合起来应用。

在电解液内的金属加热^①不可能得到大的加热速度，这是因为热量是在金属表面附近的一薄层电解液中生成的，而毛坯本体则依靠热传导进行加热。金属在电解液中加热需要很高的单位电能消耗。此外，由于要使用电解液，这种加热方式在锻工车间里应用是非常不方便的。上述种种，都说明在锻造生产中采用电解液加热金属是不适宜的。

在研究金属感应加热的时候，应该把它分成两种形式：第一种——用工业频率（50赫芝）的电流加热金属；第二种——用增高频率电流加热金属。

第一种形式的感应加热只有在毛坯直径为 150 毫米以及更大时采用才有利，所以运用工频电流加热金属不是通用的，而只能在重型机器制造中采用。此外，到目前为止，运用工频电流来加热金属还存在一些尚未解决的技术问题，例如：如何使毛坯在三相感应器中同时均衡地加热，这是三相系统中各相负载均衡所必须的；如何平稳地改变感应器的输入功率，也即改变金属加热的速度。由于上述种种，这种金属感应加热的形式目前不能推荐在工业中广泛采用。

第二种形式的感应加热——用增高频率电流加热金属，可以应用的毛坯尺寸范围比较广，并且是目前研究得比较多和采用得较为广泛的一种方法。较之用重油及煤气火焰炉加热毛坯，甚至较之其他形式的电加热，增高频率电流加热具有一系列的优点。金属感应加热的重要优点有：

1. 加热速度快，这就可以大大地提高加热装置的生产率，并可以将它和锻造、轧制及其他机器联成不间断的生产线。
2. 被加热的金属和电源没有直接的联系，这就为加热装置的机构的设计制造创造了方便的条件。
3. 加热规范稳定，这就保证了金属加热和零件加工过程自

^① 有关运用电解液内金属加热的研究工作，由斯大林奖金获得者、工程师雅斯諾戈罗德斯基（Ясногородский И. З.）领导下的专门设计局的成员们在进行。

自动化的可能性，簡化了自动綫及流水綫的生产組織。

4. 几乎完全沒有氧化皮，这能節約金屬，提高模具使用壽命，并有可能向零件的精密模鍛工艺过渡。

5. 加热的万能性，也即对于各种断面形状的、断面与长度尺寸比值不同的毛坯，都能均匀地加热。

6. 車間里沒有烟、熾热和烟灰，改善了鍛工的劳动条件。

除了上列的优点之外，金屬感应加热也有缺点，其中主要的是必須改变电流的頻率，在这上面要消耗掉所用电能的20~30%。

这就使得金屬加热的单位电能消耗增加，而且必須采用輔助設備。

但是由于前面所述的优点，感应加热在大多数情况下都是有利的，因此可以在大型鍛工車間里用来作为基本的金屬加热方式。

第一章 金屬感应加热

1 感应加热的基础

电流通过导体时，导体的周圍就形成磁場。当导体內流过交流电，也即电流的数值和方向都作周期性变化时，磁場同样也随着发生变化。

如果在交变磁場內放入一块金屬或其他导电体，那么它的里面就会出现电动势，在电动势的作用下，导体內就会产生交变电流。电流在金屬块內流动，就使金屬加热。

上述把金屬放入交变磁場的加热方法叫做感应加热，而最初通过交流电的导体就叫做施感导体或者感应器。施感导体的形状是多种多样的，比如說，可以是圓柱形的螺旋綫；扁圓形的螺旋綫；断面呈方形的螺旋綫；排成两个平行列的直綫导体（图1 a, 6, 8, 1）。

第一种形式——圓柱形的施感导体，用于加热圓柱形的毛坯（图1 a）；第二种形式——扁圓形的，用于加热板料、或者平行排列的均整圓柱形毛坯的端部（图1 6）；第三种形式——方形的，用于加热方形横断面的毛坯（图1 8）；第四种形式——縫状的，用于加热均整短毛坯的全长，以及成排的圓形或方形均整毛坯的端部（图1 1）。

在鍛工車間的感应加热装置中，最常采用圓柱形单层螺旋綫的感应器，被加热的毛坯放在它的里面。

无論是在感应器中，或者在被加热的毛坯中，交流电在断面上的分布都是不均匀的。在导体的表面上，电流密度具有最大值，并按指数关系向导体中部下降。但是在感应加热的实践中，为了使問題簡化，在一定的条件下可以认为，交流电仅仅在明显划

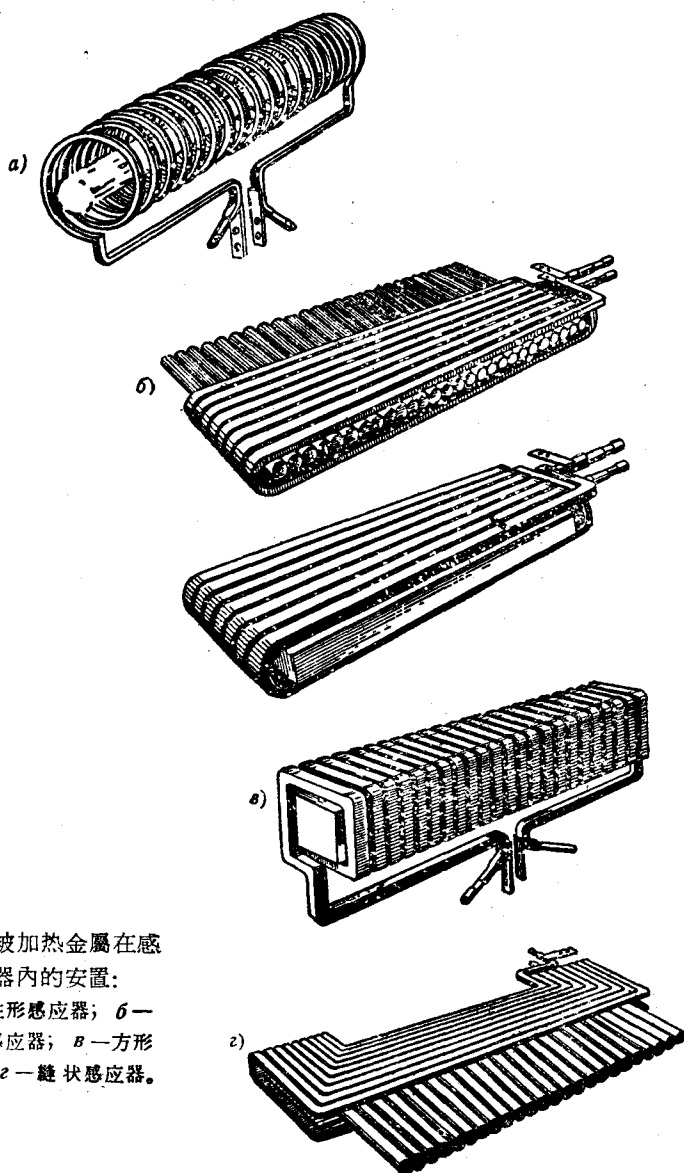


图 1 被加热金属在感应器内的安置:

a—圆柱形感应器; *б*—扁圆形感应器; *в*—方形感应器; *г*—缝状感应器。

分开的某一表面层内流动，而导体的中心则完全没有电流。

交流电流过的那一层的厚度叫做电流透入深度，可由下式决定：

$$\Delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \text{ 厘米,}$$

式中 f —— 电流频率(赫芝)；

μ —— 导磁率；

ρ —— 材料的电阻系数 (欧姆·厘米)。

很多种金属及合金的毛坯，都可以采用感应加热，特别适宜的是：各种牌号的钢、黄铜、镍、白铜。

按磁性的不同，所有的金属及合金可以分成两类：1) 铁磁性金属及合金，它的导磁率比真空导磁率大得多；2) 反磁性和顺磁性金属及合金，它们的导磁率接近于真空导磁率。

碳钢及一些其他的钢、镍等等都是铁磁性金属及合金。耐热钢、黄铜、铝、白铜等等则属于反磁及顺磁性金属与合金。

反磁及顺磁性金属与合金在加热过程中，只有电阻系数发生变化，导磁率实际上保持不变。因此，当反磁及顺磁性材料加热时，仅由于电阻系数的增高，才使电流透入深度有少量的增加。

在铁磁性金属及合金的加热过程中，除了电阻系数变化外，其导磁率也在变化。

当金属从原始温度加热到磁性转变温度时，导磁率变化不大，一超出磁性转变点(居里点)，导磁率就下降到接近真空导磁率的数值，这个数值一直保持到加热終了。

铁磁性金属及合金从原始温度到磁性转变温度的加热规范，通常叫做〔冷〕规范，而从磁性转变温度到锻造温度的加热规范叫做〔热〕规范。

和这些规范相应，电流透入深度也分为〔冷的〕和〔热的〕两种。

在计算感应加热装置时，必须知道在温度为50~55°C时感应器铜线内的电流透入深度，以及已加热到锻造温度的钢内的电流

透入深度。

这些数值为：銅在55°C时—— $\Delta_1 = \frac{7}{\sqrt{f}}$ 厘米；鋼在1200°C时—— $\Delta_2 = \frac{60}{\sqrt{f}}$ 厘米。

在施感导体的螺旋綫内部，磁場的分布是不均匀的，在中間部分，磁場强度最大，而在边缘部分（一般指两端——譯者），其强度值則降低。这个现象叫做感应器的边缘效应。由于磁場强度不均匀，因而导致感应器内不同区域的金属加热强度的不一致。为了消除这种加热的不均匀性，在所有的情况下，感应器的长度应该比被加热毛坯的长度稍大一些。感应器长度与被加热毛坯长度的差值取决于它們之間直径的比值。

2 选择电流频率

为了有效地进行感应加热，并且使經濟上合理，感应加热装置必須具有較高的总效率。

金属感应加热时，有下列几种能量损失：由于电流流过感应器的銅綫而引起的能量损失；从被加热的毛坯、穿过感应器热絕緣跑走的热量损失；从被加热的毛坯散入四周介质的热量损失。前两种形式损失的能量，是所有损失中的主要部分，它被流过感应器銅管的冷却水带走，并可以用計算及試驗的方法求得。第三种形式损失的能量被流动着的空气带走。它的数值很难用計算和試驗的方法求得。

考虑到电流流过感应器銅綫而引起的能量损失、这种效率叫做电效率。如果考虑到透过感应器热絕緣的热损失以及在加热装置工作过程中輻射走的热损失，这种效率就叫做热效率。

这两个效率的乘积就是加热装置的总效率（图2）。

在金属穿透感应加热时，效率基本上决定于电流频率的正确选择。

感应加热装置的电效率随着频率的升高而提高，并以渐近綫接近自己的极限值。对于圆柱形毛坯，加热装置的电效率在这样

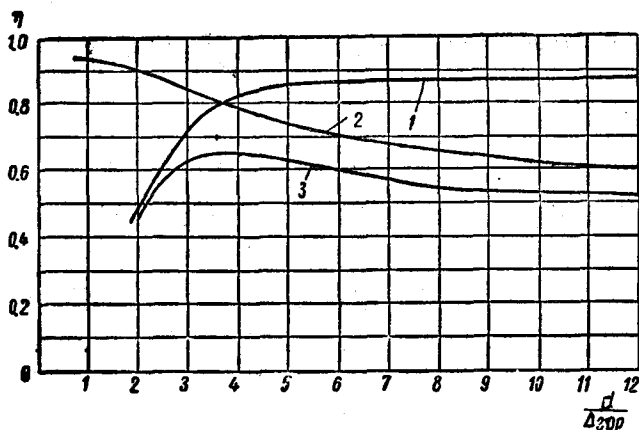


图2 感应加热装置的电效率、热效率及总效率与比值 $d/\Delta z_{0p}$ 的关系特性 (d —毛坯直径, Δz_{0p} —热态钢内的电流透入深度):

1—电效率; 2—热效率; 3—总效率。

一个频率时达到最大值: 在这个频率下, 毛坯直径与热金属内电流透入深度之比等于10。

由于感应电流只沿着被加热毛坯的表面层流动, 所以热量也仅产生在这一层。锻造和模锻要求毛坯整个断面均匀加热, 这时, 在活性放热层下的金属层, 仅能从表面层按导热方式来加热。

这样的传热需要较多的时间, 这就增加了透过热绝缘而散入四周介质的热损失, 也就是降低了热效率。为了提高加热装置的热效率, 必须缩短加热时间, 其方法是降低电流的频率, 因此, 也就是增加被加热金属内的电流透入深度。

理论计算及实验都指出, 对于任何断面尺寸的圆柱形毛坯, 当直径与电流透入深度之比在 3~5 的范围内时, 加热装置的总效率达到最大值。

实际上, 假如被加热毛坯的直径与电流透入深度之比在 2.5~6 的范围内, 所选的频率已能满足要求。

对于各种直径的圆柱形毛坯的感应加热, 利用上列的比值,

就能方便地計算出标准电流頻率的合理应用範圍。

表 1 各种直徑的圓柱形鋼毛坯感应加热时,
标准电流頻率的合理应用範圍

电 流 頻 率	50	500	1000	2500	8000	射頻
毛坯直徑(毫米)	150 及更大	70~160	50~120	30~80	15~40	20 及更小

在鉄磁性材料的毛坯加热时, 为了提高加热速度和减小单位能量消耗, 可以利用两种頻率的电流。开始时, 也即在金屬加热到磁轉变点以前, 可以采用比較低的頻率 (对于直徑为60毫米及更大的毛坯, 用 50 赫芝)。而在热规范时, 則按前述原則选取頻率。但是在感应加热中, 只有当能够証明这种双頻率是經濟的, 并且不需要用复杂装置的时候才能采用。

3 确定加热時間

为了使感应加热装置得到最大的生产率, 加热時間应尽可能的短。

可以把金屬感应加热的过程看作是: 1) 在电流透入深度範圍內的金屬, 直接依靠流过的电流而加热; 2) 位于电流透入深度範圍以外的、毛坯中心部分的金屬, 依靠从表面层的热傳导进行加热。

要减少加热時間, 主要應該依靠縮短內层的加热時間——这一层的加热是依靠从表面层的傳热的方式进行的, 但这就引起毛坯表里間溫度差的增加 (在电流頻率不变的条件下)。这个溫差不允許超过一定的数值。通常采用下述的规范作为提高加热速度的极限——即在加热終了时, 也即当表面层达到鍛造溫度时, 毛坯中心的溫度比表面层溫度低 100°C 。这个规范也就限定了毛坯感应加热的時間。对于各种断面尺寸的毛坯、用不同頻率的电流加热时, 加热時間是不同的。

在規定的溫度差下, 金屬穿透加热的最短允許時間, 可以用

理論方法計算。但在實際上，運用試驗數據更方便些。

在以伏洛琴教授命名的高頻電流研究所里，曾做了大量的試驗，在這些試驗的基礎上，繪制了各種直徑毛坯的最短允許加熱時間曲線。為了得到這些資料，採用了幾種標準頻率的電流來加熱不同直徑的毛坯。同時，用熱電偶測量毛坯表面及中心的溫度。先用一種頻率的電流加熱毛坯，而以不同的單位功率輸入感應器，使之達到上述規定的溫度差。所得到的時間記錄下來並畫在圖上。仍用同一個頻率的電流，類似地對另一個直徑的毛坯進行加熱，並在圖上得到新的點。沿這些點聯成的曲線，就可以在這一頻率下、用來選擇各種直徑毛坯的加熱時間。

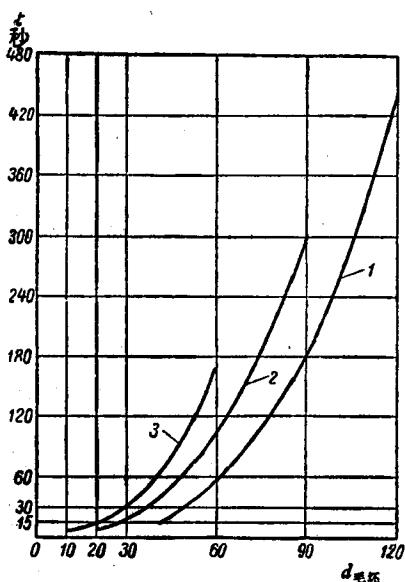


圖3 毛坯穿透感應加熱的最短允許時間和毛坯直徑的曲線關係，加熱終了時表層和中心的溫度落差為 100°C ；

1—電流頻率為1000赫芝；2—電流頻率為2500赫芝；3—電流頻率為8000赫芝。

對另一些標準頻率進行了同樣精確的試驗，並畫出相應的曲線。圖3為各種直徑的圓柱形毛坯感應加熱的最短允許時間曲線，所用的電流頻率為1000，2500及8000赫芝。在試驗過程中，曾用示波器記下了毛坯表面及中心溫度的升高過程。在溫度升高的示波圖中，可以看出感應加熱時毛坯斷面上溫度分布的特性（圖4）。

加熱時間比圖示的數值（圖3）延長一些是可以的，但是加熱裝置的熱效率就要降低一些。

如果加熱時間少於圖示的數值，則在加熱終了時，毛坯表面和中心的溫差會超過 100°C 。

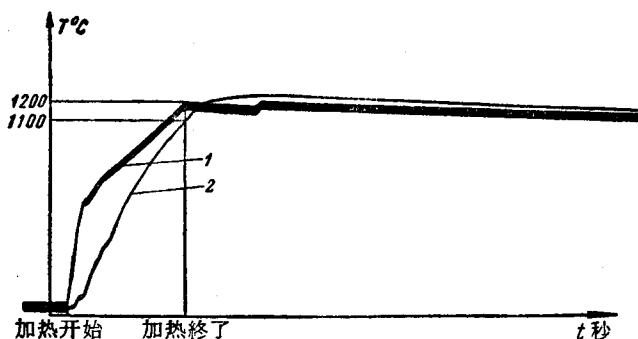


图4 毛坯温度升高的示波图:

1—在表面上; 2—在中心。

4 选择方形、矩形及管状毛坯的电流 频率和确定加热时间

对于非实心圆柱形的毛坯, 在选择电流频率及加热时间时, 其原则是和实心圆柱形毛坯决定这些数值的时候一样的, 也就是: 必须得到尽可能高的效率; 在断面上保持允许温度差的条件下, 得到尽可能高的金属加热生产率。

矩形断面的毛坯在选取电流频率及加热时间时, 可以利用圆柱形毛坯的那些关系 (选择频率用表1, 决定加热时间用图3)。但这时必须把断面的短边当作圆柱形毛坯的直径。

管子感应加热时, 选择频率必须遵循两个条件:

$$1) \quad f \geq \frac{30000}{d_{mp}^2};$$

$$2) \quad 0.35\Delta_{zop} < a < 2\Delta_{zop}$$

式中 d_{mp} ——管子内径 (厘米);

a ——管壁厚度 (厘米);

Δ_{zop} ——热金属内的电流透入深度。

在决定管子加热时间时, 和实心圆柱形毛坯一样, 也可以用图3, 但这时应把管壁厚度看作是实心圆柱形毛坯的半径。

最困难的问题是选取变断面毛坯的电流频率和加热时间。

由于这类毛坯的断面形状式样很多, 因而要对电流频率及加