

广州蓄能水电厂5#机发电机定子烧损事故分析

杨瑞棠

(中南勘测设计研究院)

摘要 5#发电机定子铁芯片间逐渐短路,发展到60到几百片短路,使通过铁芯片的短路电流高达2700~3200A,铁芯温度从1500℃到3000℃,铁芯片由熔化到沸腾,铁水从定子铁芯通风沟向定子外面流出。本文从铁磁物质的磁学、电学、热平衡原理进行了计算分析。

关键词 发电机定子铁芯 烧损 分析

1 引言

(1) 广州蓄能水电厂5#发电机组1998年10月12日启动开机。10月17日做发电机短路性能试验,投入励磁,定子电流达到5200A,经50min停机。

10月20日做了5小时多发电机短路温升试验,励磁电流 $i_f = 1200\text{A}$,定子电流10713A,定子绕组温度69℃,定子铁芯温度57℃。以上情况表明:在定子电流为5200~10713A做发电机短路试验时,由于有电枢反应,定子铁芯处于不饱和状态,即使定子铁芯存在隐患,局部过热也难于表现出来,温度也测不到,测到的定子铁芯温度只有57℃,是正常的。实际上是有局部过热的。

10月21日做发电机过电压保护试验时,发电机在空载情况下,励磁电流 $i_f = 1200\text{A}$,发电机电压升到18~18.72kV,经过约20min试验,发现有异味,立即停机,在场的人们认为是刹车板的气味。其实这时定子已由过热发展到开始烧损。

10月22日做保护信号监测时,发电机在空载运行,励磁电流 $i_f = 1288\text{A}$,发电机电压为18kV,约10min又闻到异味,立即手动退励磁并停机。这说明定子铁芯在烧损并进一步扩大了。

此后,进行现场检查,发现定子209#槽附近的铁芯轭顶部在1~6叠铁芯间的通风夹层中有铁芯片的熔渣,确认了铁芯已被烧损。对熔渣做了化验,其中含铜的成份明显增加。至此联营公司和西门子公司决定将5#发电机定子吊至安装间进行检查。

(2) 11月6日~9日将209#槽附近两个槽内的线棒拔出来检查,左侧齿部的1~6叠铁芯,在底层线棒的位置,被烧损成一个自上而下的长形洞槽,铁芯齿几乎被烧穿,见图1。对拔出的两根线棒进行检查,线棒绝缘层在靠近铁芯烧损的孔洞处,有烧损的痕迹,但绝缘层表面电阻有1000Ω(10~20mm)。绝缘层没有烧穿,线棒铜导体没有露出,线棒没有发生短路事故。以上情况表明:209#槽齿部铁芯烧损是铁芯片间短路,被短路环流烧坏。

(3) 11月8日中午,线棒拔出后,下午西门子公司5个督导带着工具在209#槽内做了清洁,并在被烧损的铁芯孔洞内塞入一块白布。督导拍照后退场。中方人员轮流观察

后退场。下午 4 时 30 分进行了定子铁芯磁化试验,在定子上绕了 7 匝电缆,加电压 1600V,电流约 450A(与以前试验相同),第一次合闸经 13~15s 停止,在此过程发现 209# 槽上部冒火花。第二次合闸经 20 多秒停止,仍有火花。第三次合闸经 2 分 40 秒~3 分钟,209# 槽孔洞处火花增大,停止试验后,触摸其铁芯片很烫手。试验过程还发现 6# 和 16# 槽在与 209# 槽孔洞位置相近的高程处,通风夹层有白黄色烟雾冒出。这又说明定子铁芯还存在铁芯片间短路的隐患。

值得注意的是:11 月 8 日下午,西门子 5 个督导和中方 10 多个人在场观察,都未发现 209# 槽在被烧孔洞旁(从上往下的第三叠)粘有铜泊。可是到 11 月 12 日却被电厂的同志发现在上述位置粘有铜泊。然而事出有因,值得思考。

(4) 1998 年 11 月 9 日工地指挥部会议决定立即进行 6# 定子的试验,合格后吊入 5# 机坑安装,替换 5# 机定子。同时准备 5# 主变在 12 月 15 日进行电网空载投切试验,力争在 12 月下旬并网发电。经过全体人员的努力,于 1998 年 12 月 10 日启动进行发电机开路温升试验。12 月 28 日机组在 300MW 发电 6h,各部温升正常,发电成功。

2 对 5# 发电机定子铁芯烧损的分析

2.1 定子铁芯烧损分析计算的主要依据

(1) 发电机定子第一次在空载额定电压 18~18.72kV 下进行电气试验,约 20min 后发电机有异味出来。

(2) 同(1)第二次试验约 10min 后,发电机又有异味出来。

(3) 在发电机定子 209# 槽的铁芯轭的外缘通风夹层处有铁芯熔渣和高温的烧痕。

(4) 1998 年 11 月 8 日进行磁化试验时,209# 槽烧损处冒火花,并发现 6# 和 16# 槽在与 209# 槽烧损位置相近的定子高程的通风夹层有白黄色烟雾冒出来。

(5) 发电机定子的结构尺寸和有关的电磁参数。

(6) 铁芯片熔点的温度取 1535℃,沸点温度取 2500~3000℃。

2.2 由 209# 槽齿部的烧损,对铁芯片间短路回路的设想

图 2 是 209# 槽铁芯片间短路示意图。

(1) 图 2(a)为 209# 槽铁芯片间短路位置平面示意图,图中 O 点为烧损位置,A、B 为短路环流的途径。由于鸽尾棒与定子铁芯片是金属接触的,这就可能形成两个短路回路。其一是 209# 槽齿部烧损点处,称为短路回路①。其二是 209# 槽烧损点(O 点)与鸽尾棒短接的铁芯片形成短路,称为短路回路②,详见图 2(b)。它们分别对 209# 槽烧损点供给短路环流。

(2) 铁芯齿部的磁通密度大,回路短。铁芯轭部的磁通密度小,但回路长。计算表明回路①的短路环流比回路②的约大 3 倍。

(3) 铁芯的铁芯片两面都涂有约 0.005mm 的绝缘漆,但铁芯的周边是不涂漆的,当安装工艺不妥或其他原因,可使铁芯片间短路,形成短路回路。如图 2(c)所示,图中为定子齿部铁芯片被短路的片数及其电路图, r_n 为短路回路的电阻,+ 符号为进入每片的磁通量,没短路的芯片没画出,从图中可知,短路片数愈多,回路包围的铁芯片也愈多,与回路

交链的磁通增多,该回路的感应电势随短接的片数增多而增大。本分析计算,以两个通风夹层间的60片铁芯片为计算单元,其感应电势最大。集肤效应也随着短路片数增多而增大。由于回路包围的铁芯截面积增大,即使计及集肤效应,回路的电阻还是在逐渐地减小,短路环流逐渐增大,而且增大得比较快,铁芯片的温度可达到很高。这样可使芯片表面的绝缘漆烧毁,铁芯片短路的片数迅速扩大。这就导致铁芯片熔化而沸腾流出。

2.3 计算方法概述

主要采用磁路、电路和热平衡原理进行计算。

(1) 铁芯片间短路,短路回路中感应电势,可按下面式(1)计算,参见电路图2(c)。

$$e_n = \sqrt{2} \pi f n B S N \times 10^{-3} \quad (\text{mV}) \quad (1)$$

式中 n ——铁芯片短路的片数;

f ——工频, $f = 50\text{Hz}$;

B ——磁通密度 Wb/m^2 ,按短路回路所处位置计算 B 值;

S ——短路回路的平面与磁通正交的截面积, m^2 ;

N ——短路回路与磁通量交链的匝数,取 $N = 1$ 。

短路回路①和②的感应电势 e_n 分别见表2、图3、表3、图4。

(2) 定子铁芯集肤效应系数的计算,定子铁芯片是铁磁材料,具有强烈的集肤效应。铁芯片间的短路,短路环流使铁芯片的温度升高,表面绝缘漆被烧毁,短路片数随即增多,并且不断地增多,铁芯片从薄片逐渐成为大块铁磁体,集肤效应也愈强烈。铁磁体会出现“空腔现象”,它影响铁芯片的电阻和短路回路中的环流。计算铁磁材料的集肤效应系数是比较复杂的,一般是采用试验计算法得到。本分析计算只能利用许瓦兹变换作近似的计算。计算结果见表1和图3。

表1 定子铁芯集肤效应系数(k_{fn})计算结果

n (片数)	2	6	10	20	30	40	50	60
k_{fn}	1.02	1.045	1.1	1.23	1.42	1.65	1.92	2.16

(3) 短路回路中短路环流 I_n 的计算。短路环流中包括有功分量和无功分量,根据国内外的试验,铁磁材料在磁场的作用下,计及无功损耗时,铁磁材料的功率损耗为有功功率损耗的1.166倍。由图2(c),铁芯片的功率损耗按下面式(2)计算。

$$I_n = 1.166 \frac{e_n}{2r_n} = 0.583 \frac{e_n}{r_n} \quad (2)$$

$$r_n = \frac{\rho_{20}(1 + 0.00455)(\theta dn - 20)}{S_n} k_{fn} l_n \times 10^{-3} \quad (\text{m}\Omega)$$

(4) 定子铁芯片短路发热温度的计算。为便于对铁芯烧损事故的分析,首先按绝热过程计算,然后考虑铁芯片的热功率传导和铁芯片表面通风散热。

按绝热过程计算:定子铁芯片间短路,铁芯片的发热量等于铁芯片温度升高所需的热量,则有

$$\frac{k_{fn}\rho_{20}[1 + \alpha_{20}(\theta_{dn} - 20)]}{S_n} i_{dn}^2 dt_{dn} = \rho S_n C_{20} [1 + \beta_{20}(\theta_{dn} - 20)] d\theta_{dn}$$

$$\text{整理得 } \frac{1}{S_n^2} i_{dn}^2 dt_{dn} = \frac{\rho C_{20} [1 + \beta_{20}(\theta_{dn} - 20)]}{k_{fn}\rho_{20} [1 + \alpha_{20}(\theta_{dn} - 20)]} d\theta_{dn}$$

$$\text{积分之 } \frac{1}{S_n^2} \int_0^{t_{dn}} i_{dn}^2 dt_{dn} = \frac{\rho C_{20}}{k_{fn}\rho_{20}} \int_0^{\theta_{dn}} \frac{1 + \beta_{20}(\theta_{dn} - 20)}{1 + \alpha_{20}(\theta_{dn} - 20)} d\theta_{dn}$$

$$\begin{aligned} \text{令 } \int_0^{t_{dn}} i_{dn}^2 dt_{dn} &= I_n^2 t_{dn} \\ &= \frac{\rho C_{20} S_n^2}{k_{fn}\alpha_{20}\rho_{20}} \left[\left(1 - \frac{\beta_{20}}{\alpha_{20}}\right) \ln \frac{1 + \alpha_{20}(\theta_{dn} - 20)}{1 + \alpha_{20}(\theta_{do} - 20)} + \beta_{20}(\theta_{dn} - \theta_{do}) \right] \end{aligned}$$

$$\text{故有 } t_{dn} = \frac{\rho C_{20} S_n^2}{k_{fn}\alpha_{20}\rho_{20} I_n^2} \left[\left(1 - \frac{\beta_{20}}{\alpha_{20}}\right) \ln \frac{1 + \alpha_{20}(\theta_{dn} - 20)}{1 + \alpha_{20}(\theta_{do} - 20)} + \beta_{20}(\theta_{dn} - \theta_{do}) \right] \quad (3)$$

参数取下列数值:

- 式中 ρ ——铁芯片的质量密度, $7.85\text{g}/\text{cm}^3$;
 ρ_{20} ——铁芯片在 20°C 时的电阻率, $0.139\Omega\text{mm}^2/\text{m}$;
 α_{20} ——铁芯片在 20°C 时的电阻温度系数, $0.00455/^\circ\text{C}$;
 C_{20} ——铁芯片在 20°C 时的比热, $0.452\text{J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$;
 β_{20} ——铁芯片在 20°C 时的比热温度系数, $1/^\circ\text{C}$;
 S_n ——被短路的铁芯片, 平均导电的横截面积, mm^2 ;
 I_n ——铁芯片短路的短路环流, A ;
 θ_{dn} ——铁芯片熔点温度取 1535°C , 沸点温度 $2500 \sim 3000^\circ\text{C}$;
 θ_{do} ——铁芯片间短路的起始温度, 现场测量取 49°C ;
 t_{dn} ——铁芯片间短路达到某温度的时间, min 或 s 。

将这些参数中的常数量代入式(3)得

$$t_{dn} = \frac{5610 \times S_n^2}{k_{fn} \times I_n^2} \left[0.868 \ln \frac{1 + 0.00455(\theta_{dn} - 20)}{1.132} + 0.0006(\theta_{dn} - 49) \right] \quad (\text{s}) \quad (4)$$

式(4)按下述方法使用:

I_n 为根据铁芯片的短路回路计算求得, 它有三组数据。单独计算齿部短路回路①时为 I_{1n} ; 单独计算轭部短路回路②时为 I_{2n} ; 回路①和回路②环流迭加后计算时为 $I_{(1+2)n}$ 。

首先按 I_{1n} 和设定的 θ_{d1n} 计算 t_{d1n} , 计算所得 t_{d1n} 值应在定子空载试验时烧损的时间范围内, 即在 $20 \sim 10\text{min}$ 的范围内。

然后在已确定的 t_{d1n} 时间内, 按 I_{2n} 值计算定子铁芯轭部的温度, 由于 t_{d1n} 时间较短, I_{2n} 值较小, 约为 I_{1n} 的 $1/3$, 铁芯轭部的温度较低约 250°C 。这里应该说明的是: 在 t_{d1n} 时间内, 位于轭部的短路回路②就已与齿部的短路回路①同时短路了。因此单独计算轭部的 t_{d2n} 和轭部的温度 θ_{d2n} 无实际意义, 但可供分析参考, 计算结果见表 3 和图 4。

具有实际意义的分析计算是短路回路①与回路②的环流迭加后的计算。此时 I_n 取 $I_{(1+2)n}$, $t_{d(1+2)n}$ 取与 t_{d1n} 相同。先按绝热过程计算, 然后考虑齿部有热功率传导给轭部, 轭

部还计及通风夹层有通风散热。其结果是:209#槽齿部烧损点处的温度要降低,轭部温度有所提高,特别在靠近齿部附近的轭部温度升高较多,计算结果见表4和图5。

铁磁材料的导热率 λ ,根据以前的试验取 $\lambda = 0.586\text{W}/(\text{cm}\cdot^\circ\text{C})$ 。

铁磁材料表面散热系数 α 与通过铁芯片表面的风速有关。按发电机定子通风夹层的风速取为 $3.5\sim 4\text{m/s}$ 。实测发电机出口风温为 38°C 。根据以前的试验,当风速是横吹越过表面时 α 取 $0.0043\text{W}/\text{cm}^2\cdot^\circ\text{C}$ 。

以上所有计算都较为复杂,因铁磁材料是非线性的,需按给出的条件用试算法计算。在此不详述了。

2.4 209#槽铁芯齿部铁芯片间短路烧损按绝热过程进行计算

这里单独计算铁芯齿部短路回路①[见图2(b)]按绝热过程的发热烧损情况。计算结果见表2和图3,供初步分析参考。

表2 铁芯齿部短路回路①发热烧损计算结果

n (片数)	2	6	10	20	30	40	50	60
e_{1n} (mV)	15.9	47.6	79.3	159	238	317	396	475
k_{fn}	1.02	1.045	1.1	1.23	1.42	1.65	1.92	2.16
I_{1n} (A)	29.3	131	252	605	1087	1514	1985	2419
t_{d1n} (min)	325	136	86	32	17.6	7.4	6.2	5.4
θ_{d1n} ($^\circ\text{C}$)	197	610	840	1340	1545	1670	1730	1845

注 n 为逐渐短路的片数。

2.5 209#槽铁芯轭部铁芯片间短路发热,分别按绝热过程和考虑通风散热进行计算

这里按图2(b)中短路回路②,计算铁芯轭部发热情况,供初步分析的参考。结果见表3和图4。

表3 铁芯轭部短路回路②发热计算结果

n (片数)	2	6	10	20	30	40	50	60
e_{2n} (mV)	56.3	169	281	563	844	1126	1407	1688
I_{2n} (A)	8.5	49.7	98	245	391	525	663	802
t_{d2n} (min)	2943	756	513	294	225	191	161	140
θ_{d2n} ($^\circ\text{C}$)	210	340	620	954	1210	1430	1509	1640
θ'_{d2n} ($^\circ\text{C}$)		42.8	53.8	117.3	228	378	574	819

注 1. k_{fn} 同表2;

2. θ'_{d2n} 为有通风散热时,铁芯轭部的温度。

表4 短路回路①和②环流迭加后发热计算结果

n (片数)	2	6	10	20	30	40	50	60
$I_{(1+2)n}$ (A)	37.8	180.7	350	850	1478	2039	2648	3221
$t_{d(1+2)}$ (min)	325	136	86	32	17.6	7.4	6.2	5.4
$\theta_{d(1+2)n}$	325	660	952	1440	1790	2090	2430	2760
$\theta'_{d(1+2)n}$	295	564	855	1290	1610	1881	2187	2512
$\theta''_{d(1+2)n}$			95	138	366	585	936	1368

注 $\theta_{d(1+2)n}$ 为齿部烧损点 O 点,按绝热过程计算齿部的温度。

$\theta'_{d(1+2)n}$ 为齿部烧损点 O 点,有热功率传导给铁芯轭部时,齿部 O 点温度的计算值。

$\theta''_{d(1+2)n}$ 为铁芯轭部接受了齿部传导的热功率,又有经通风夹层散出去的热功率时,铁芯轭部温度的计算值。

2.6 209#槽铁芯齿部和轭部铁芯片间短路环流迭加后,分别按绝热过程、考虑有热功率传导和通风散热,计算铁芯发热烧损

按图2(b)在齿部烧损点O,短路回路①与②的环路环流二者迭加后为 $I_{(1+2)n}$ 进行计算,计算结果见表4和图5。它具有实际参考的意义。

3 分析与小结

(1) 定子铁芯片短路的可能起因:

(a) 5#机定子209#槽齿的烧坏和6#、16#槽冒烟,都是在定子上部相近的高程发生的。不能排除铜粉落入槽内引起铁芯片短路烧坏的可能性。幸好发生事故的槽很少,否则事情就糟透了。

(b) 从7#机定子安装来看,线棒表面加了环氧、碳粉和固化剂的混合胶粘层,线棒嵌入时,挤压不均匀形成间隙。曾对208#、215#、4#槽用0.1~0.15mm的塞尺从上往下插入检测,线棒两边或一边,能插入45~90mm,侧面塞尺几乎能全插入。说明底层线棒是有间隙的,给铜粉落入造成机会。落入铜粉多,事故很快会出现,落入的少则形成隐患,短期不会暴露出来。

(c) 嵌线棒时,过份的敲打也可能损伤铁芯片造成短路。

总之,在安装的现场打磨线棒铜排和包扎绕组汇流铜排绝缘的工艺,是不可取的,也是产生隐患的根源。

(2) 铁芯片短路回路的形成:

(a) 铁芯片与鸽尾棒的尾部是金属接触的,一旦铁芯片在某处短路即构成短路回路。严重时会发生过热,使铁芯片表面漆层烧毁,短路将延续发展。

(b) 定子槽齿铁芯片短路是很危险的,除了自身会构成短路回路外,还会与鸽尾棒构成短路,增加齿部短路点环流,可导致如209#槽烧坏事故的重演。因此,一旦发生,铁芯齿烧坏成自上而下的孔洞是必然的了。要杜绝槽齿铁芯片间的短路。

(c) 铁芯片间短路的片数是由少到多,由慢到快地发展起来的,可在几十分钟内把铁芯烧坏。5#机定子209#槽烧坏的过程就是这样,从量变到质变,从过热到烧坏。

(3) 本计算表明:当只考虑短路回路①[见图2(b)],209#槽齿部铁芯片短路的片数发展到30~40片时,铁芯片的温度(O点)可达到熔化温度1545℃时间约17.6min,并很快就发展到60片短路,温度达到1845℃。事实上,鸽尾棒处短路回路②的短路环流,一定会在O点迭加,此处铁芯温度在短路30片时可达1610~1881℃,并迅速发展短路60片,铁芯温度将达到沸点2512℃,铁芯片熔化成铁水。

(4) 计算表明:在靠近209#槽齿部的铁芯轭部的地方,温度可达1368℃,有局部烧损或严重过热的可能。在拆5#定子过程中要注意观察,尤其对6#、16#槽的情况要详细检查。

(5) 现在5#机的定子(原6#机定子),不排除有隐患存在的可能性,但近期内不会表现出来,3~5年期间要注意监视检查。

由于资料不多,材料特性不确切,分析方法也不一定正确,本文仅提供分析事故的参考。

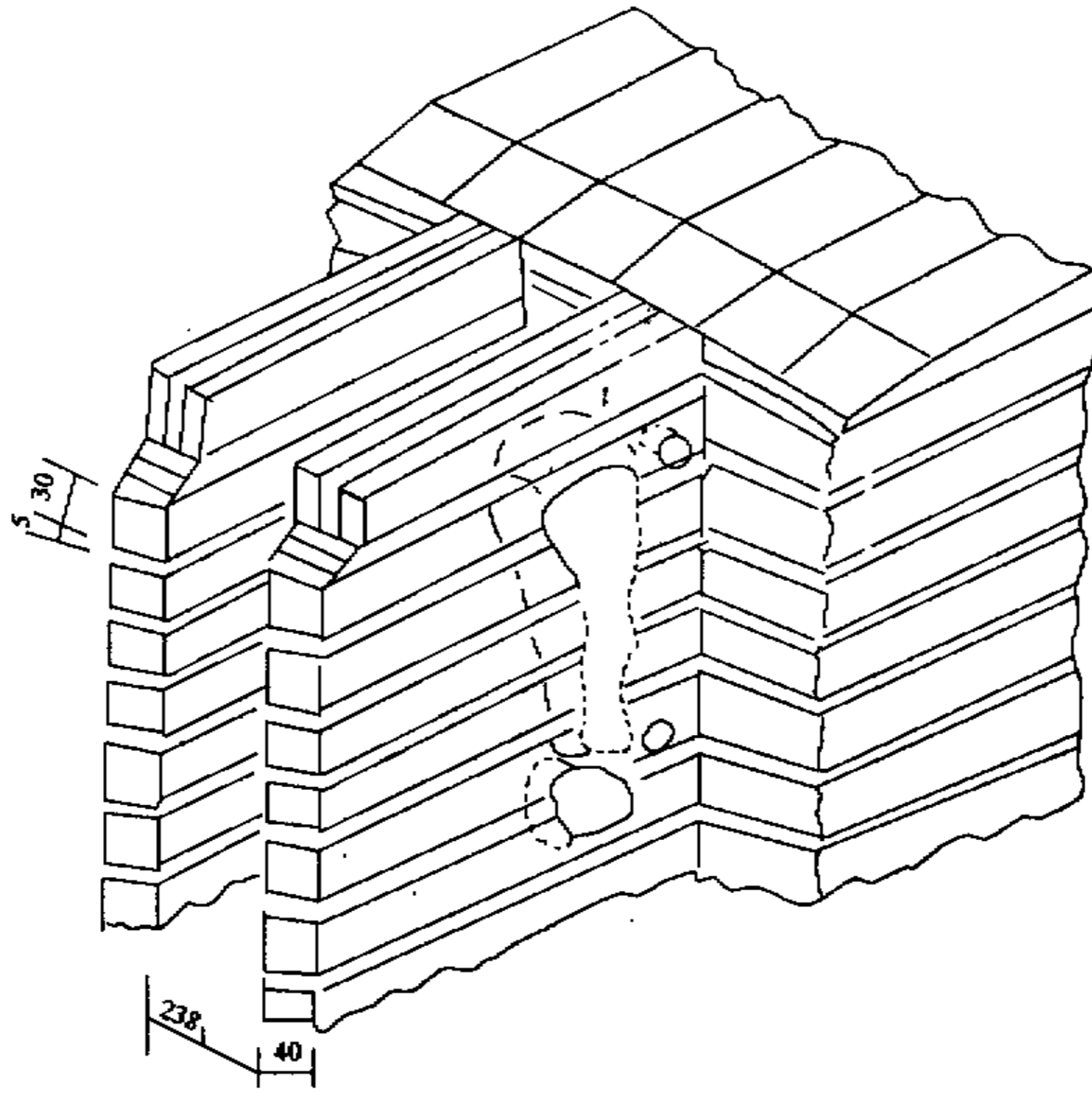


图 1 209[#]槽齿部铁芯烧损轴测图 (单位: mm)

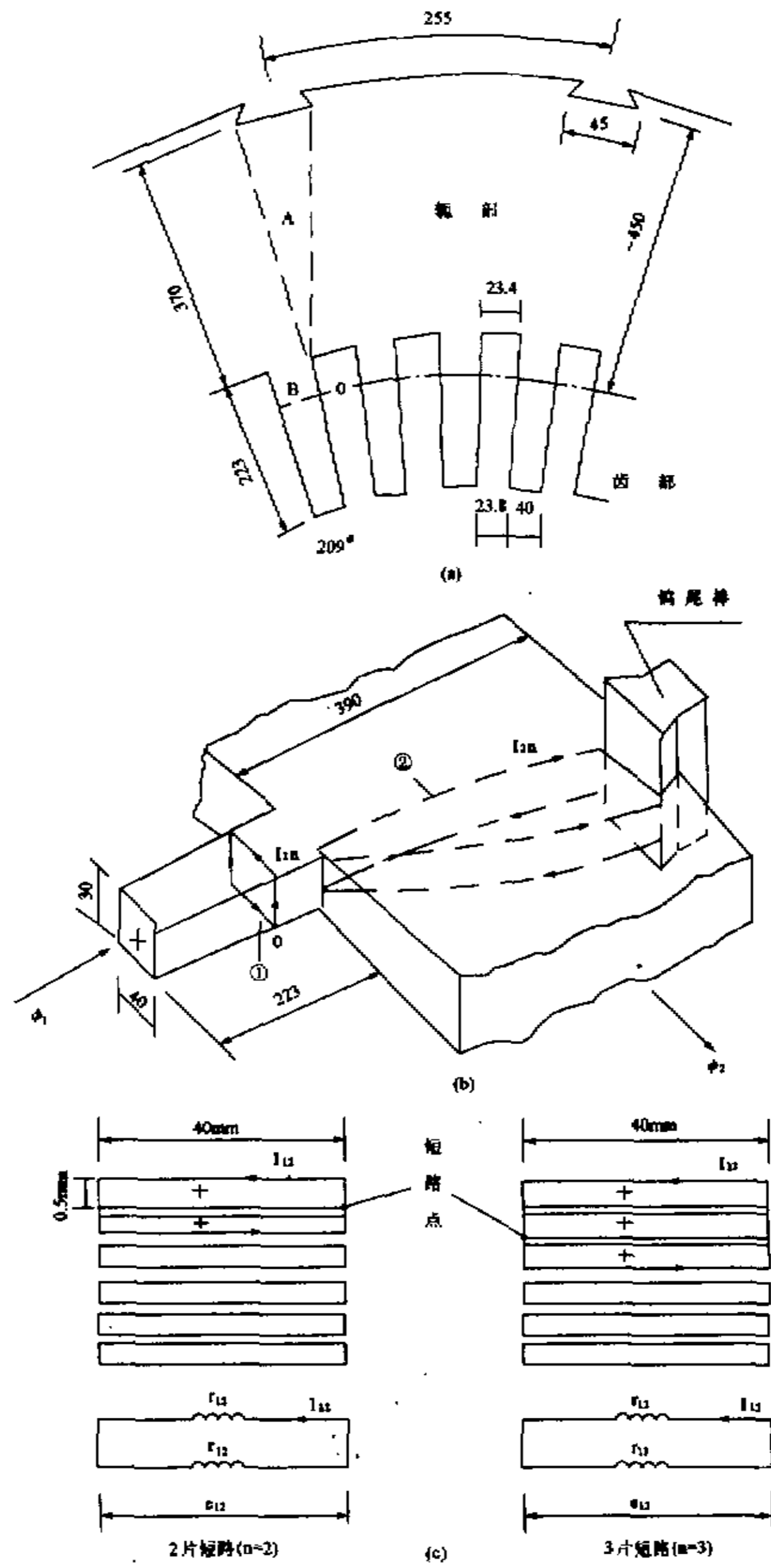


图2 209#槽铁芯片短路示意图

- (a) 209#槽铁芯片短路位置平面示意图(0点为绕接位置,A、B为短路环流途径);
 (b) 209#槽铁芯片短路回路轴测图(I_{1n} 为回路①的环流, I_{2n} 为回路②的环流);
 (c) 铁芯片短路及其等值电路图(图中符号+为磁通进入方向)

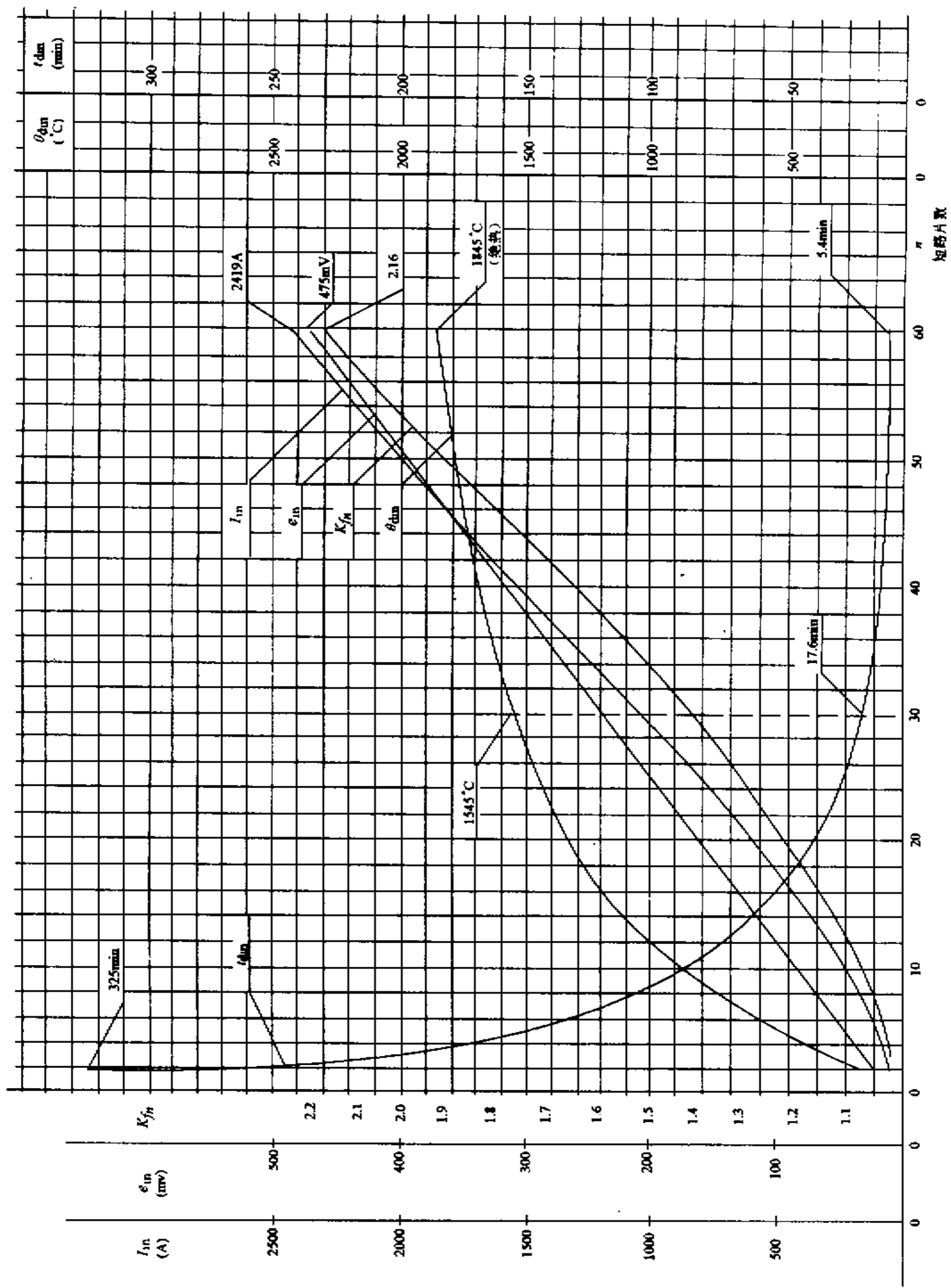


图 3 209 槽齿部铁芯片短路回路① 烧损曲线

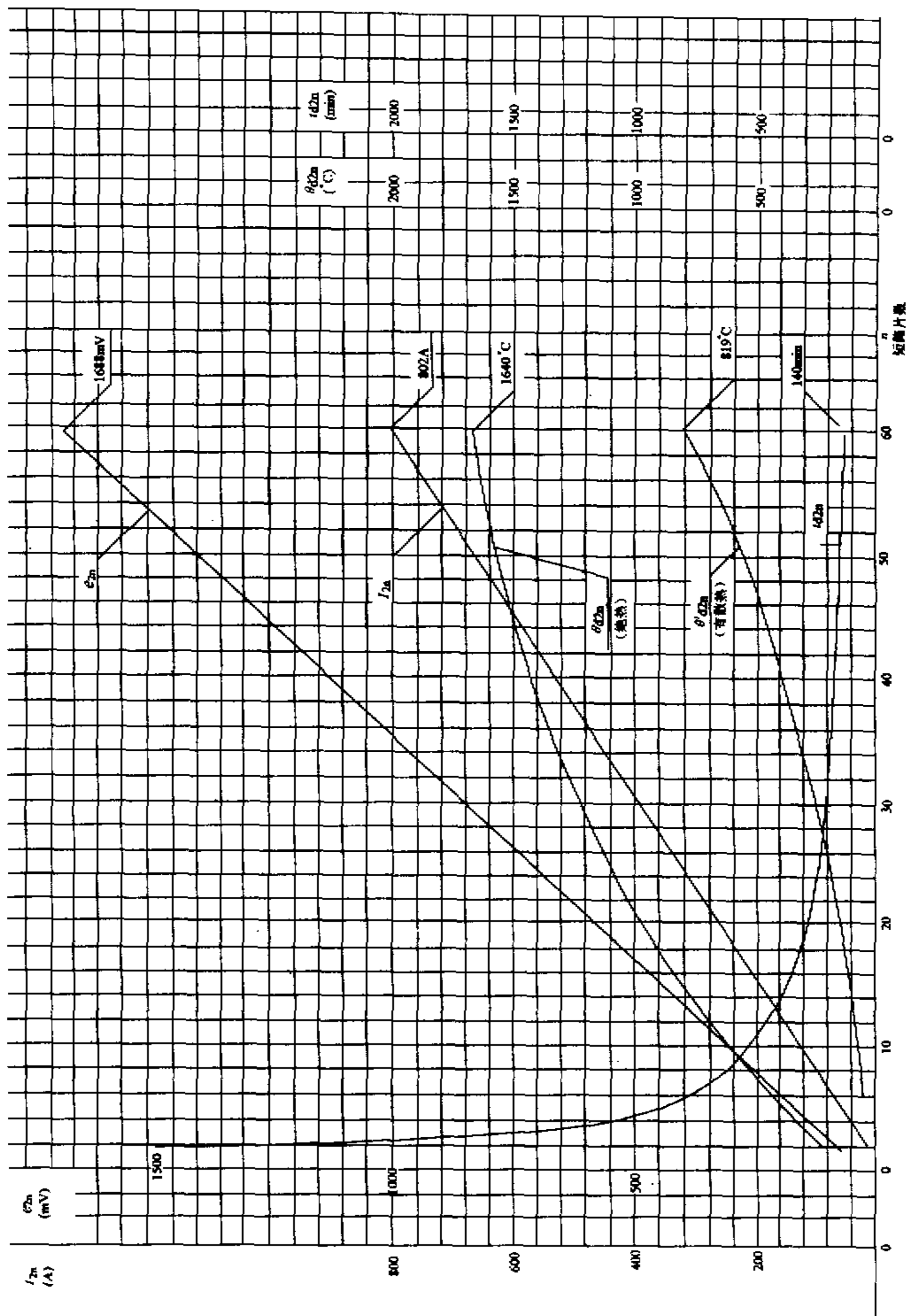


图 4 209 槽铁芯绕组短路回路② 发热曲线

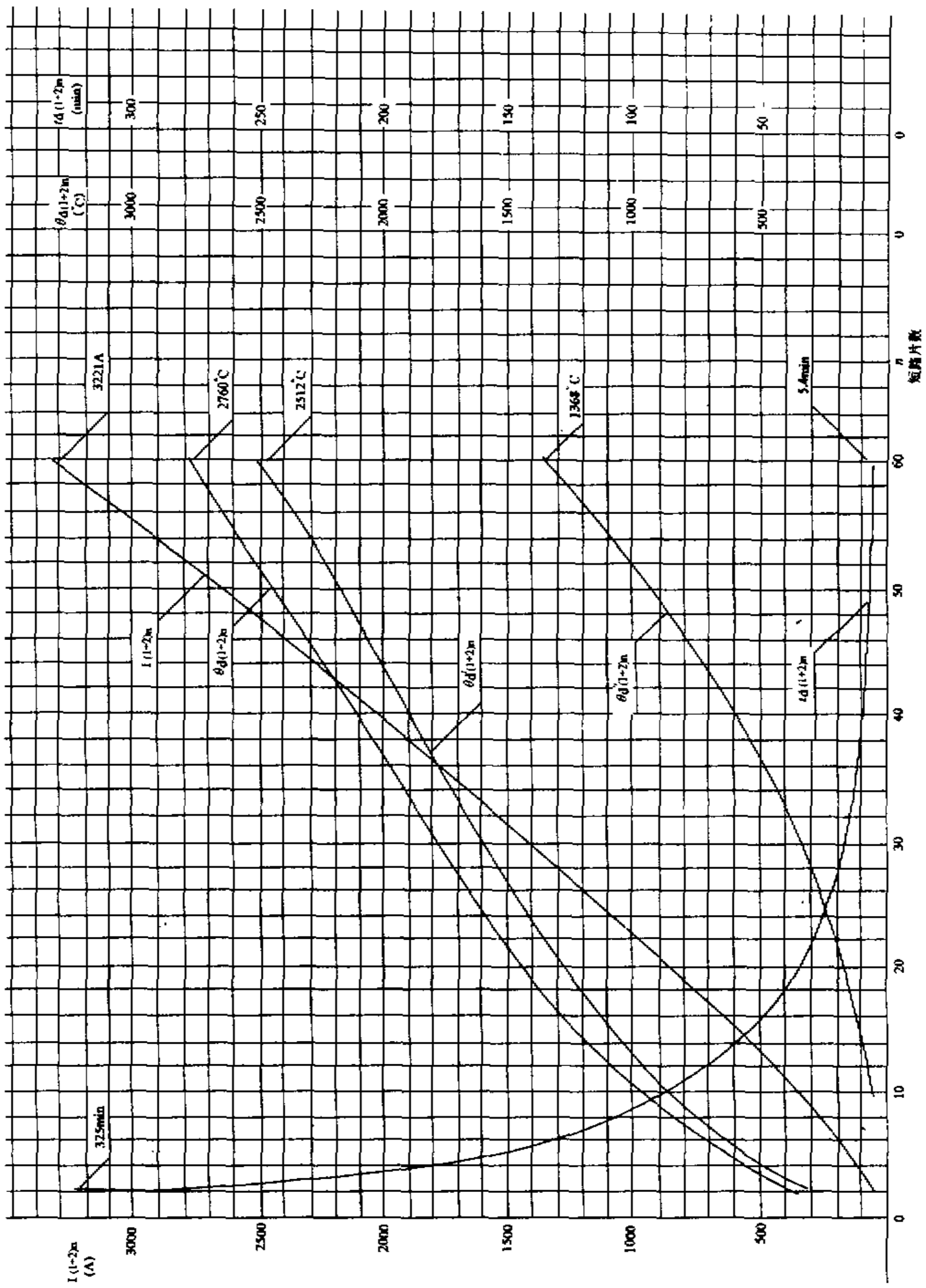


图 5 209[#] 槽齿部短路回路①、②环流迭加计算烧损曲线

作者:

[杨瑞棠](#)

作者单位:

[中南勘测设计研究院](#)

本文读者也读过(10条)

1. [何松林, 吴瑞清](#) 广蓄电厂5号机组转子磁极故障分析与更换方案[会议论文]-2010
2. [程军, 高发廷, 郭庆波](#) 一种简易实时车辆动力学系统模拟器的开发[会议论文]-2000
3. [田泽祥, 肖文键, 甄海](#) 副油箱输油的控制、显示与故障[会议论文]-2000
4. [杨瑞棠](#) 对广州蓄能水电站500kV高落差充油电缆的评价[会议论文]-2000
5. [王学信](#) 大河家水电站2#机组发电机转子扫膛的修复[期刊论文]-甘肃水利水电技术2003, 39(1)
6. [王文金](#) 8米×6米风洞弹射座椅、人体试验技术研究概况[会议论文]-2000
7. [张玉良, 于光明](#) 试论安徽省林业生态工程建设问题[会议论文]-2000
8. [黄春梅, 苏宛新](#) 89C205L单片机在传动系统中的应用[会议论文]-2000
9. [黄建, 钟显成](#) 一种基于80C196kB单片机实现的高精度转角测量系统[会议论文]-2000
10. [周经渊](#) 水力自控翻板门[会议论文]-2000

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_38562.aspx