



CQC 产品认证技术要求

CQC-5TR-C02-2016

铜铝复合母线(水平连铸工艺)在低压成套 设备中的应用规范

Implication specification for Copper Aluminum compound bus
bars(horizontal continuous casting process) used in low-voltage
switchgear assemblies

2016-11-07 发布

2016-11-07 实施

中国质量认证中心 发布

前 言

本规范是低压成套设备 CCC 认证中使用铜铝复合母线(水平连铸工艺)的技术依据。

本规范按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

为落实国家发改委、商务部、质检总局、国家标准委、中国电器工业协会和中国有色金属协会等机构联合提出的“推广铜铝复合母线的指导意见”的政策和要求，在 CCC 产品认证中引导企业的“节能、节材”技术应用，特制定本规范。

本规范根据我国低压成套设备应用铜铝复合材料的现状制定。

本规范由中国质量认证中心提出并归口。

本规范由中国质量认证中心发布，版权归中国质量认证中心所有，任何组织及个人未经中国质量认证中心许可，不得以任何形式全部或部分使用。本技术规范作为 CCC 认证中使用铜铝复合母线(水平连铸工艺)的技术依据，未通过中国质量认证中心认证的产品不得明示符合此规范。

本规范主要起草单位：中国质量认证中心

本规范参与起草单位：上海电器科学研究所、烟台孚信达双金属股份有限公司、上海理工大学。

本规范主要起草人：陈昕

本规范参与起草人：陈剑，赵晓华，陈建兵，徐虹，易颖，蔡晓玮，宋小兰，王连忠，刘强，董晓文，兰占军，廉洋子。

铜铝复合母线(水平连铸工艺)在低压成套设备中的应用规范

1. 适用范围

本规范适用于采用烟台孚信达双金属股份有限公司生产的水平连铸工艺铜铝复合母线的低压成套设备（主要包括低压成套电力开关设备和控制设备和母线干线系统）。烟台孚信达双金属股份有限公司生产的铜铝复合母线，铜包覆层体积比分别为 25%与 30%，密度分别为 4.25g/cm^3 与 4.56g/cm^3 ，界面结合强度不低于 35MPa，公司生产的铜铝复合母线系列产品实现宽度 30~120mm、厚度 3~20mm 全系列覆盖（产品工艺、参数及规格详见附录 C）。本规范规定了铜铝复合母线替换铜母线的截面对照表，给出了固定母线绝缘夹间距的计算方法。

2. 规范性引用文件

下列标准对于本规范的应用是必不可少的。凡是注日期的引用标准，仅注日期的版本适用于本规范。凡是不注日期的引用标准，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

GB7251.1-2013 低压成套开关设备和控制设备 第 1 部分:总则

GB7251.5-2008 低压成套开关设备和控制设备第 5 部分: 对公用电网动力配电成套设备的特殊要求

GB7251.6-2015 低压成套开关设备和控制设备 第 6 部分: 母线干线系统（母线槽）

GB7251.12-2013 低压成套开关设备和控制设备 第 2 部分:成套电力开关和控制设备

GB/T9327-2008 额定电压 35kV($U_m=40.5\text{kV}$)及以下电力电缆导体用压接式和机械式连接金具试验方法和要求

GB/T24277-2009 评估部分型式试验成套设备（PTTA）短路耐受强度的一种方法

GB/T25840-2010 规定电气设备部件（特别是接线端子）允许温升的导则

GB/T30586-2014 连铸轧制铜包铝扁棒、扁线

DL/T247-2012 输变电设备用铜包铝母线

IEC60865-1-2011 短路电流效应计算 第 1 部分: 定义和计算方法

IEC60865-2-2015 短路电流效应计算 第 2 部分: 计算举例

IEC60890-1987 低压开关设备和控制设备部分型式试验组合装置用的外推温升评估方法

3. 术语和定义

下列术语和定义适用于本规范。其中 3.1 引自 GB/T 30586-2014 “连铸轧制铜包铝扁棒、扁线”， 3.3 引自 DL/T 247-2012 “输变电设备用铜包铝母线”，3.4 至 3.9 引自 GB 7251.1-2013 “低压成套开关设备和控制设备 第 1 部分:总则”， 3.10 引自 GB7251.6-2015 “低压成套开关设备和控制设备 第 6 部分：母线干线系统（母线槽）”。

3.1 连铸轧制铜铝复合母线（引自 GB/T 30586-2014 第 3.1）

连铸轧制铜铝复合母线为采用两种金属同时连铸生产复合坯料，经轧制成型的具有冶金结合（指铜铝两种金属界面之间产生了原子相互扩散，形成一定厚度过渡层的结合）界面、较高结合强度的双金属复合导体，亦称连铸轧制铜包铝排或连铸轧制铜铝复合排。

3.2 界面结合强度

铜铝复合母线中铜铝界面单位面积的结合力，用剪切强度来表示。

3.3 铜层体积比（引自 DL/T 247-2012 第 5.1.6）

铜包铝母线的铜层体积比为铜层的截面积与铜包铝母线的总截面积之比的百分数。

3.4 低压成套开关设备和控制设备（引自 GB 7251.1-2013 第 3.1.1）

由一个或多个低压开关器件和与之相关的控制、测量、信号、保护、调节等设备，以及所有内部的电气和机械的连接及结构部件构成的组合体。

3.5 主母线（引自 GB 7251.1-2013 第 3.1.6）

连接一条或几条配电母线和/或进线、出线单元的母线

3.6 配电母线（引自 GB 7251.1-2013 第 3.1.7）

一个框架单元内的母线，它连接到主母线上，并由它向出线单元供电。

3.7 额定电流（引自 GB 7251.1-2013 第 3.8.10.1）

成套设备制造商宣称的电流值，在规定的条件下通以此电流，成套设备各部件的温升不超过规定的限值。

3.8 额定峰值耐受电流（引自 GB 7251.1-2013 第 3.8.10.2）

成套设备制造商宣称的在规定条件下能够承受的短路电流峰值。

3.9 额定短时耐受电流（引自 GB 7251.1-2013 第 3.8.10.3）

成套设备制造商宣称的，在规定条件下，用电流和时间定义的能够耐受的短时电流有效值。

3.10 母线干线系统、母线槽（引自 GB 7251.6-2015 第 3.101）

为所有类型的负载配电和控制电能，适用于工业、商业和类似用途，导体系统形式的封闭成套设备。该导体系统由管道、槽或相似外壳中绝缘材料间隔和支撑的母线构成。

4. 铜铝复合母线对低压成套设备产品质量的影响因素识别

在低压成套开关设备和控制设备中，导体材料会对电气设备的寿命、安全性能及电气性能造成重要影响。

4.1 电气设备的寿命

电气设备的寿命与导体材料的性能和质量有关，因此低压成套开关设备和控制设备中所选用铜铝复合母线其性能参数首先要符合国家有关产品标准的要求，还要进行可靠性试验，以验证其能否满足设备使用寿命周期的要求。

4.2 安全性能

在低压成套开关设备和控制设备中，电气安全性能参数主要指电气间隙和爬电距离，因此需要分析导体材料更换后，对设备电气间隙和爬电距离的影响。成套电气设备在工程项目选型中都要进行工程设计计算验证。

4.3 电气性能

导体材料主要影响设备的温升和承受短路电流的能力，不同的导体材料，其直流电阻率不同，在相同电流下，达到所要求的温升其截面积不同。因此，在相同电流情况下，应研究在温升相同情况下铜铝复合母线和铜母线的截面对应关系。

设备承受短路电流动稳定的能力，主要取决于产品结构和紧固绝缘件的材质，固定导体绝缘夹之间的距离 L ，按照不同导体材料的屈服极限和承载电流即可以算出 L 值。至于短路电流引起的热稳定，只要截面积满足标准规定的温升要求，就可以满足热稳定需求。

5. 铜铝复合母线的可靠性和使用寿命试验方法

铜铝复合母线是由铜、铝两种金属复合而成（铜材包覆铝材），铜、铝材料物理性能差异较大，影响其可靠性的主要因素就是能否承受热胀冷缩产生的应力。如果铜铝复合母线铜铝界面结合强度大于热胀冷缩产生的应力，铜铝复合母线就是可靠的。依据标准 DL/T 247-2012 规定，铜铝界面结合强度不小于 35MPa，就能够承受热胀冷缩产生的应力。

判定导体材料承受热胀冷缩应力的试验方法：按照 GB7251 标准成套电气设备正常工作温

度通常不会超过 110℃，考虑极限情况，在-40℃~140℃的温度变化范围内进行连续 1000 次冷热循环试验，试验后界面结合强度不应低于 35MPa。

判定导体材料使用寿命的标准是 GB/T9327-2008《额定电压 35KV 及以下电力电缆导体用压接式和机械式连接金具试验方法和要求》，按此标准进行 1000 次通电热循环试验，判定其能否满足成套电气设备使用寿命的要求。

6. 铜铝复合母线替换铜母线对应的截面比例

设备的温升直接与导体的载流量有关，即与导体材料的直流电阻率和散热系数有关，不同的电流等级，不同的导体材料采用的导体截面不同。在我国低压成套开关设备和控制设备采用的基本上都是铜母线，因此计算出在相同的电流等级相同温升下，铜铝复合母线和铜母线的截面对应关系，就可确定铜铝复合母线截面尺寸。

导体的稳定温升通过下式计算：

$$\tau = \frac{i^2 K_f R}{KA} = \frac{i^2 K_f \rho L}{SKA} \quad (1)$$

$i^2 K_f R$ 是导体电阻损耗产生的热量， τKA 通过热传导、辐射和对流散发的热量，当导体电阻损耗产生的热量和通过热传导、辐射、对流散发的热量平衡时，达到稳定温升。

其中： i 为试验电流峰值 (A)；

L 为导体长度 (m)；

S 为导体截面积 (m^2)；

A 为导体表面积 (m^2)；

K_f 为趋肤系数；

K 为导体表面综合散热系数，是热传导、辐射和对流散热系数的总和。

计算铜母线和铜铝复合母线截面比例时，温升相同，电流相同，导体长度相同。趋肤系数 K_f ，截面较小时，铜铝复合母线与铜母线之间的差异可以不考虑，这里作为常数进行计算。导体表面综合散热系数 K 是热传导、辐射和对流散热系数的总和，铜排和铜铝复合排的试验结构及环境条件相同，辐射和对流散热系数相同，在计算时视为常数。此时 $i^2 K_f L/K$ 视为常数，用 F 来代表。

导体厚度设为 a ，宽度设为 h ，截面积 $S=a \times h$ ，散热表面积 $A=2(a+h)L$ ，单位长度散热表面积 $A=2(a+h)(L=1m)$ 。因此，温升取决于导体直流电阻率 ρ 和导体尺寸 a 和 h 。

设铜母线温升为 τ_T ，铜铝复合母线温升为 τ_F 。

则：

$$\tau_T = \frac{F\rho_T}{2ah(a+h)} \quad (2)$$

$$\tau_F = \frac{F\rho_F}{[2ah(a+h)]_F} \quad (3)$$

$[ah(a+h)]_F$ 为铜铝复合母线截面参数， $ah(a+h)$ 为铜母线截面参数。其中： $P_T=0.01777$ ， $\rho_{F(30\%)}=0.02424$ ， $\rho_{F(25\%)}=0.02498$ ，分别是铜母线和铜铝复合母线 30%含铜量和 25%含铜量在 20℃时的直流电阻率(烟台孚信达双金属股份有限公司生产的铜铝复合排，宽度 40mm 及以下铜层体积比为 30%，宽度 40mm 以上铜层体积比为 25%)。

通过公式 2 和公式 3，令 $\tau_T = \tau_F$ 可以计算出在同等温升下铜母线和铜铝复合母线的截面比值。然后通过计算和试验验证，铜铝复合母线用在低压成套开关设备和控制设备中替换铜母线的截面对照表如下：

表 1 铜铝复合母线替换铜母线规格对照表（宽度相同，厚度调整） 单位：mm

铜铝复合母线宽度不变，厚度增加 32%							
宽度 铜铝复合母线厚度 铜母线厚度	30	40	50	60	80	100	120
3	3.96	3.96	3.96	3.96	3.96	3.96	3.96
4	5.28	5.28	5.28	5.28	5.28	5.28	5.28
5	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60
6	7.92	7.92	7.92	7.92	7.92	7.92	7.92
8	10.56	10.56	10.56	10.56	10.56	10.56	10.56
10	13.20	13.20	13.20	13.20	13.20	13.20	13.20
12	15.84	15.84	15.84	15.84	15.84	15.84	15.84

表 2 铜铝复合母线替换铜母线规格对照表（厚度相同，宽度调整） 单位：mm

铜铝复合母线厚度不变，宽度增加 19%						
铜母线宽度 铜铝复合母线宽度 厚度	30	40	50	60	80	100

3	35.7	47.6	59.5	71.4	95.2	119.0
4	35.7	47.6	59.5	71.4	95.2	119.0
5	35.7	47.6	59.5	71.4	95.2	119.0
6	35.7	47.6	59.5	71.4	95.2	119.0
8	35.7	47.6	59.5	71.4	95.2	119.0
10	35.7	47.6	59.5	71.4	95.2	119.0
12	35.7	47.6	59.5	71.4	95.2	119.0

铜铝复合母线替换铜母线具体实施方案按表3“铜铝复合母线替换铜母线规格选型方案”。

表3 铜铝复合母线替换铜母线规格选型方案

序号	铜母线规格 (mm×mm)	铜铝复合母线规格 (mm×mm)	
		1	2
1	30×3	30×4	36×3
2	30×4	30×5.3	36×4
3	30×5	30×6.6	36×5
4	30×6	30×8	36×6
5	30×8	30×10.5	36×8
6	30×10	30×13.5	36×10
7	30×12	30×15.8	36×12
8	40×3	40×4	47.5×3
9	40×4	40×5.3	47.5×4
10	40×5	40×6.6	47.5×5
11	40×6	40×8	47.5×6
12	40×8	40×10.5	47.5×8
13	40×10	40×13.5	47.5×10
14	40×12	40×15.8	47.5×12
15	50×3	50×4	60×3
16	50×4	50×5.3	60×4
17	50×5	50×6.6	60×5
18	50×6	50×8	60×6
19	50×8	50×10.5	60×8
20	50×10	50×13.5	60×10
21	50×12	50×15.8	60×12
22	60×3	60×4	71.5×3
23	60×4	60×5.3	71.5×4
24	60×5	60×6.6	71.5×5
25	60×6	60×8	71.5×6
26	60×8	60×10.5	71.5×8
27	60×10	60×13.5	71.5×10
28	60×12	60×15.8	71.5×12
29	80×4	80×5.3	95×4

30	80×5	80×6.6	95×5
31	80×6	80×8	95×6
32	80×8	80×10.5	95×8
33	80×10	80×13.5	95×10
34	80×12	80×15.8	95×12
35	100×5	100×6.6	120×5
36	100×6	100×8	120×6
37	100×8	100×10.5	120×8
38	100×10	100×13.5	120×10
39	100×12	100×15.8	120×12
40	120×5	120×6.6	-
41	120×6	120×8	-
42	120×8	120×10.5	-
43	120×10	120×13.5	-
44	120×12	120×15.8	-

铜母线厚度 $\geq 8\text{mm}$ 时，可采用两根铜铝复合排替换，具体实施方案按表4“铜铝复合母线替换铜母线规格选型方案”。

表4 铜铝复合母线替换铜母线规格选型方案

序号	铜母线规格 (mm×mm)	铜铝复合母线规格 (mm×mm)	
		1	2
1	50×8	50×10.5	2 (50×5.3)
2	50×10	50×13.5	2 (50×6.6)
3	50×12	50×15.8	2 (50×8)
4	60×8	60×10.5	2 (60×5.3)
5	60×10	60×13.5	2 (60×6.6)
6	60×12	60×15.8	2 (60×8)
7	80×8	80×10.5	2 (80×5.3)
8	80×10	80×13.5	2 (80×6.6)
9	80×12	80×15.8	2 (80×8)
10	100×8	100×10.5	2 (100×5.3)
11	100×10	100×13.5	2 (100×6.6)
12	100×12	100×15.8	2 (100×8)
13	120×8	120×10.5	2 (120×5.3)
14	120×10	120×13.5	2 (120×6.6)
15	120×12	120×15.8	2 (120×8)

7. 短耐的验证及固定母线绝缘夹之间距离 L 值的计算

母线承受短路电流动热稳定的能力主要取决于固定母线绝缘夹之间的距离 L，其次是母线的截面系数，当母线截面选定后，计算满足动稳定的最大 L 值。在产品设计和制造时 L 值必须小于计算值。

低压开关柜 2500A 以上，每相母线都由 2 根以上导体组成，在短路电流下，相与相之间母线存在电动力，同相母线之间也存在电动力，其计算很复杂，而且，其结构一般不能改变，无论采用什么导体材料，都必须满足该结构对短耐的要求，铜铝复合排替换铜排后，也必须满足原结构对短耐的要求。因此，对标准型低压开关柜短耐采取计算在短路电流下母线产生的弯曲应力，验证其是否小于材料允许的最大弯曲应力的方法。

对于非标准的控制柜，母线槽采用计算最大 L 值的方法，产品设计制造时 L 必须小于计算出的最大 L 值。

7.1 低压开关柜动稳定的校验

以 GCK 为例，其弯曲应力的计算方法见附录 A。

7.2 固定铜铝复合母线绝缘夹之间距离 L 值的方法

在三相系统导体短路时中间相受到最大电动力：

$$F = \frac{\sqrt{3} * i^2 * L * 10^{-7}}{a} \quad (4)$$

单位为 N。

其中：i 为短路电流峰值，单位 A；

L 为两固定导体绝缘夹之间的距离，单位 m；

a 为导体之间中心距，单位 m；

导体间作用力引起的弯曲应力：

$$\sigma = \frac{\beta * F * L}{8W} = \frac{\sqrt{3} * \beta * i^2 * L^2 * 10^{-7}}{8aW} \quad (5)$$

单位为 N/mm^2 。

其中：W=1/6 hb² 为导体立放时的截面系数（宽面立放）；

b 为导体厚度，单位 m；h 为导体宽度，单位 m；

β 为动态应力系数，与导体固有振动频率有关，取决于固定支架类型，简单支架取 1，对低压开关柜水平母线，中间有垂直引出排取 0.73，中间没有垂直引出排取 0.5。

导体能承受短路时的弯曲应力必须 $\sigma \leq q \sigma_{xu}$ ， σ_{xu} 是导体材料屈服强度。其中 q 为可塑性系数，对矩形截面取 q=1.5。

由于铜、铝没有明显的屈服极限，工程上一般取永久变形值达 0.2% 时所对应的应力值作

为该材料的屈服极限 (σ_{xu})。依据中国电机工程手册 (第 2 卷, 2002 年 1 月 1 日出版), σ_{xu} 对铜取 $300\sim 380\text{N/mm}^2$, 铝 $150\sim 190\text{N/mm}^2$, 按 GB/T3880.2-2006 (一般工业用铝及铝合金板、带材第 2 部分: 力学性能) 一般工业用铝, 铝取 170N/mm^2 。铜铝复合母线还没有屈服极限的参数, 按铝的参数作为铜铝复合母线的参数计算更安全可靠。

母线能否承受短路电流的冲击, 主要取决于固定导体两绝缘夹之间的距离 L , L 值可由公式 $\sigma \leq q\sigma_{xu}$ 求出 (β 取 1):

$$L = \sqrt{\frac{69.36 \cdot a \cdot W \cdot \sigma_{xu}}{i^2}} \quad (6)$$

其中: a 导体相间中心距; W 导体截面系数; i 额定峰值耐受电流。

额定峰值耐受电流在不同的额定电流下是不同的, 因各额定电流下, 回路变压器的电阻、电抗, 配电线路的电阻、电抗都不同, 总的短路阻抗也不同, 根据《工业与民用配电设计手册》第三版中表 31 给出的数据, 在高压侧短路容量无限大时, 短路电流最大, 数据如下表, 因此, 各额定电流下短路电流是不同的, 固定导体的绝缘夹间距也是不同的, 表 5 给出了应考核的短路电流和固定导体两绝缘夹之间的最大距离 L 值。

下面以空气型母线槽为例, $a=0.023\text{m}$, 导体截面和截面系数见表 5, 按照考核短路电流计算的 L 值见表 5。

表 5 固定母线绝缘夹距离 L 的最大值

变压器容量 (kVA)	设备设计电流 (A)	实际最大短路电流 (kA)	短路电流考核值 (kA)	铜铝复合母线规格 (mm^2)	截面系数 (10^{-6}m^3)	L (mm)
200	400	7.16	10	5×40	0.16	336
315	630	10.73	15	6×60	0.36	330
400	800	13.53	19	6×80	0.48	286
500	1000	16.79	23.5	6×100	0.6	258
600	1250	20.83	29.2	6×125	0.75	234
800	1600	21.41	30	6×160	0.96	256
1000	2000	21.99	41	6×200	1.2	210
1250	2500	26.78	50	8×200	2.13	230
1600	3200	33.58	65	2 (6×200)	2×1.2	160
2000	4000	40.28	80	2 (8×160)	2×1.7	200
2500	5000	49	100	3 (8×160)	3×1.7	200

母线干线系统由两层或三层构成时，短路电流也分配到每层，两层的每层短路电流是总短路电流的二分之一除以分流系数来验证，三层的每层短路电流是总短路电流的三分之一除以分流系数来验证。比如双层结构，短耐 80kA，每层短路电流 $40/0.85=47\text{kA}$ ，三层结构 100kA，每层短路电流 $33.3/0.7=47.6\text{kA}$ 。

参考资料：

- 1) 《发电厂及变电站电气设备》中国水利水电出版社
- 2) 低压配电系统中矩形水平母线动热稳定计算《电控配电》2013 第 4、5 期
- 3) 《工业与民用配电设计手册》第三版中国电力出版社

8.附录 A：铜铝复合母线在成套电力开关设备和控制设备中应用示例

A.1 GGD、GCK、GCS、MNS 标准柜型

水平主母线短耐的分析验证：以 GCK 为例进行计算（水平母线排列方式相同的其它柜型计算方式可以参考）。

1) GCK 参数：

表 A.1 GCK 参数

额定电流 (A)	1600	2500	3200	4000	5000
短路电流 (kA)	30	50	65	80	100
柜宽 (mm)	600	600	800	1000	1000
水平母线 (mm×mm)	10×100	2 (10×100)	3 (10×100)	3 (10×120)	4 (10×120)

2) 计算过程如下：

1600A 每相是单根导体，只需计算相间导体产生的弯曲应力，2500A 以上主母线是由两根以上导体构成，因此，不但要考虑主导体（相与相之间）的电动力还要考虑分支导体（同相间导体）之间的电动力，总的弯曲引力是这两部分弯曲应力的和。验证方式采取按 GCK2 柜体结构分别计算主导体的弯曲应力和分支导体的弯曲应力，两者之和是否小于 255 N/mm^2 。

A：主导体的电动力和弯曲应力计算如下： $\beta=0.73$

$$F = \frac{1.73 * i^2 * L}{a} * 10^{-7}$$

$$\sigma = \frac{\beta * F * L}{8W} = \frac{1.26 * i^2 * L^2}{8aW} * 10^{-7}$$

W 为导体截面系数。W 取值根据 IEC60865-1-2011 《短路电流效应计算 第 1 部分:定义和计算方法》计算公式、图表及 GCK 柜体参数:

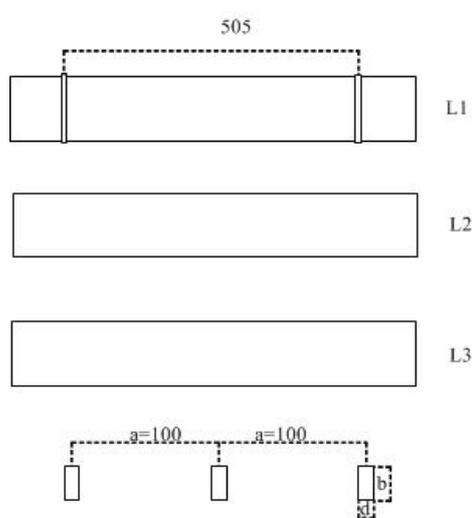
$$1600\text{A}, i=63\text{kA}, L=0.505\text{m}, a=0.1\text{m}, W=0.167hb^2=1.67\times 10^{-6}\text{m}^3$$

$$2500\text{A}, i=105\text{kA}, L=0.505\text{m}, a=0.1\text{m}, W=0.867hb^2=8.67\times 10^{-6}\text{m}^3$$

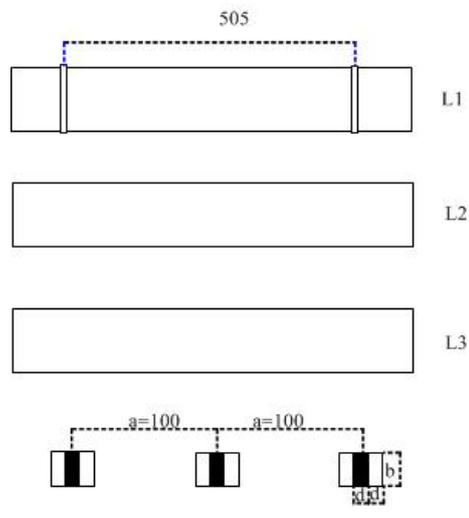
$$3200\text{A}, i=143\text{kA}, L=0.705\text{m}, a=0.158\text{m}, W=1.98hb^2=19.8\times 10^{-6}\text{m}^3$$

$$4000\text{A}, i=176\text{kA}, L=0.905\text{m}, a=0.184\text{m}, W=1.98hb^2=23.76\times 10^{-6}\text{m}^3$$

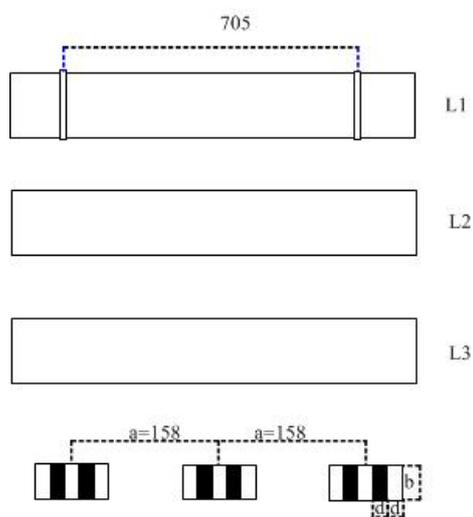
$$5000\text{A}, i=220\text{kA}, L=0.905\text{m}, a=0.184\text{m}, W=3.48hb^2=41.76\times 10^{-6}\text{m}^3$$



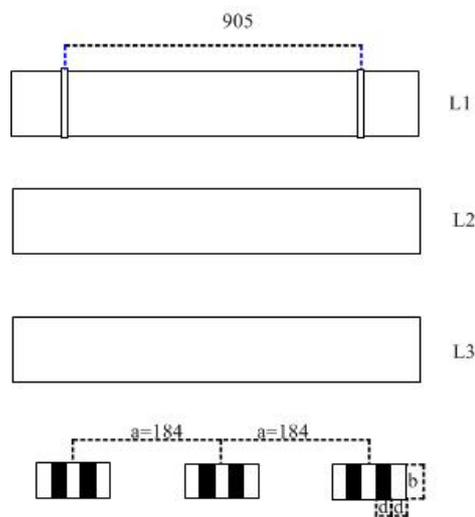
1600A (柜宽 600mm)



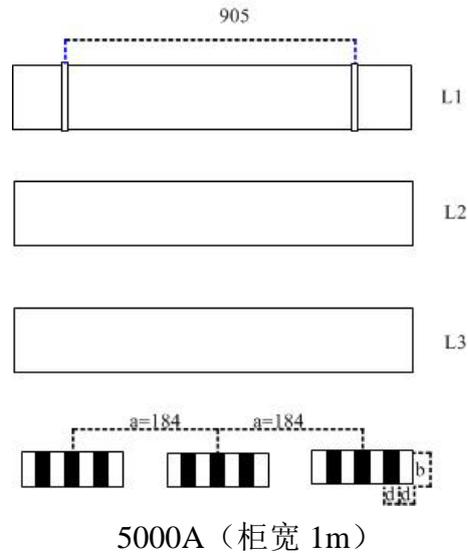
2500A (柜宽 600mm)



3200A (柜宽 800mm)



4000A (柜宽 1m)



以上尺寸为 GCK 开关柜的结构参数。

计算结果如下：

表 A.2 计算结果

电流等级 (A)	1600	2500	3200	4000	5000
σ (N/mm ²)	95.46	51.08	51.17	91.4	81.25

B: 分支导体（同相间导体）产生的电动力计算

$$F_s = \frac{2 * 10^{-7} * i^2 * L_s}{n^2 * a_s}$$

弯曲应力

$$\sigma_s = \frac{F_s * L_s}{16W_s} = \frac{2 * 10^{-7} * i^2 * L_s^2}{n^2 * 16a_s W_s}$$

a_s 和 W_s 为 IEC60865 给出的计算公式。

其中： n 为并联导体数， a_s 为分支导体间有效距离， L_s 为相邻支持件或衬垫间的距离， W_s 为分支导体截面系数。

按 IEC60865-1-2011《短路电流效应计算 第 1 部分:定义和计算方法》的计算公式、图表和 GCK2 开关柜的柜体参数计算如下：

$$a_s: 1/a_s = K_{12}/a_{12} + k_{13}/a_{13} + k_{14}/a_{14}$$

$$2500A, i=105kA, n=2, \text{ 则 } 1/a_s = K_{12}/a_{12} = 0.43/20 = 0.0215 \quad a_s = 46.5$$

$$L_s \text{ 最大 } 0.505, W_s = 1/6hb^2 = 1.67 \times 10^{-6};$$

$$3200A, i=143kA, n=3, 1/a_s = K_{12}/a_{12} + k_{13}/a_{13} = 0.43/20 + 0.63/40 \quad a_s = 26.8$$

$$L_s \text{ 最大 } 0.549, W_s = 1/6hb^2 = 1.67 \times 10^{-6}$$

4000A, $i=176\text{kA}$, $n=3$, $1/a_s=K_{12}/a_{12}+k_{13}/a_{13}=0.37/20+0.57/40$ $a_s=30.5$

L_s 最大 0.7085, $W_s=1/6hb^2=2\times 10^{-6}$

5000A, $i=220\text{kA}$, $n=4$, $1/a_s=K_{12}/a_{12}+k_{13}/a_{13}+k_{14}/a_{14}=0.37/20+0.57/40+0.7/60$ $a_s=22.5$

L_s 最大 0.7085, $W_s=1/6hb^2=2\times 10^{-6}$

由此计算出分支导体产生的弯曲应力和总的弯曲应力。

表 A.3 分支导体产生的弯曲应力和总的弯曲应力

电流等级 (A)	1600	2500	3200	4000	5000
σ_s (N/mm ²)	/	113.15	181.26	354.03	421.8
σ (N/mm ²)	95.46	51.08	51.17	91.4	81.25
$\sigma=\sigma_s+\sigma$ (N/mm ²)	95.46	164.23	232.43	445.43	503.05
在 L1 和 L3 相增加一个绝缘支撑件后 $\sigma=\sigma_s+\sigma$ (N/mm ²)				232.4	229.25

由计算可知, 分支导体(同相)产生的弯曲应力比相间主母线产生的弯曲应力大得多, 1600A 每相是单根导体, 总的弯曲应力远小于 255 N/mm², 2500A 和 3200A 总的弯曲应力也小于 255 N/mm² 是安全的, 4000A 和 5000A 同相导体间产生的弯曲应力都超过了铜铝复合母线的允许应力 225 N/mm², 因此铜铝复合母线的 GCK2=4000 和 GCK2-5000 开关柜中在水平母中间加一个绝缘支撑件, 以保证 L_s 的最大值不超过 0.45m, 这样在相导体上增加一个绝缘支撑件后, 4000A 规格的产品, $\sigma_s=141$, $\sigma_s+\sigma=232.4$; 5000A 规格的产品, $\sigma_s=148$, $\sigma_s+\sigma=229.25$, 也没超过铜铝复合母线的允许应力, 因而是安全的。

通过上述分析, 铜铝复合母线替换铜母线后, 水平主母线能够满足短耐的要求。

在标准柜型中通过分析验证, 铜铝复合母线替换铜母线, 短耐能满足要求, 只需改变导体截面, 满足温升要求, 按 A.1.1—A.1.3 方法不改变低压开关柜结构直接由铜铝复合母线替换铜母线。

母线分主母线(水平母线、N 排、PE 排)、馈电母线(进出断路器的母线、控制柜垂直馈电母线)。

A.1.1 水平母线及 N 排和 PE 排

按照表 A.4 “水平母线由铜铝复合母线替换铜母线示例” 进行替换。

A.1.2 馈电母线（进出断路器母线）

按照表 A.5 “进出断路器的母线由铜铝复合母线替换铜母线示例” 方案 1 选取，在铜母线厚度大于 8mm 时，建议采用两根铜铝复合母线替换，按方案 2 选取。

A.1.3 控制柜中垂直馈电母线

控制柜中垂直馈电母线由铜铝复合母线替换铜母线时，按照表 3 “铜铝复合母线替换铜母线规格选型方案” 进行替换。

A.1.4 其他标准柜型

其他标准柜型是指型号不同而结构和 GGD、GCK、GCS、MNS 相同的低压开关柜，参考 A.1.1—A.1.3 由铜铝复合母线替换铜母线。

A.2 非标准设计的成套电力开关设备和控制设备

铜铝复合母线替换铜母线既要满足温升极限的要求，也要满足短耐的要求，参考表 A.4 “水平母线由铜铝复合母线替换铜母线示例”、表 A.5 “进出断路器的母线由铜铝复合母线替换铜母线示例” 选取。同时，按公式 6 计算固定铜铝复合母线两绝缘夹之间的间距 L。

表 A.4 水平母线由铜铝复合母线替换铜母线示例

序号	额定电流 (A)	主母线		N 排		PE 排	
		铜母线 (mm ²)	铜铝复合母线 (mm ²)	铜母线 (mm ²)	铜铝复合母线 (mm ²)	铜母线 (mm ²)	铜铝复合母线 (mm ²)
1	400	5×60	6.6×60	3×60	4×60	4×40	5×40
2	630	5×80	6.6×80	4×60	5×60	5×40	6.6×40
3	800	6×80	6×100	4×60	5×60	5×40	6.6×40
4	1000	8×80	8×100	4×80	5×80	5×40	6.6×40
5	1250	10×80	10×100	5×80	50×10	5×40	6.6×40
6	1600	10×100	10×120	8×80	8×100	5×50	6.6×50
7	2000	2 (10×80)	2 (10×100)	10×80	10×100	5×80	6.6×80
8	2500	2 (10×100)	2 (10×120)	10×100	10×120	8×80	10×80
9	3200	3 (10×100)	3 (10×120)	2 (8×100)	2 (10×100)	10×80	10×100
10	4000	3 (10×120)	4 (10×120)	2 (10×100)	2 (10×120)	2 (6×80)	2 (6×100)
11	5000	4 (10×120)	5 (10×120)	3 (8×100)	3 (10×100)	2 (8×80)	2 (8×100)
12	6300	5 (10×120)	6 (10×120)	3 (10×100)	3 (10×120)	2 (10×80)	2 (10×100)

表 A.5 进出断路器的母线由铜铝复合母线替换铜母线示例

序号	额定电流 (A)	方案 1		方案 2	
		铜母线 (mm ²)	铜铝复合母线 (mm ²)	铜母线 (mm ²)	铜铝复合母线 (mm ²)
1	400	5×60	6.6×60	—	—
2	630	5×80	6.6×80	—	—
3	800	6×80	8×80	—	—
4	1000	8×80	10×80	8×80	2 (5.3×80)
5	1250	10×80	2 (6.6×80)	—	—
6	1600	2 (8×80)	4 (5.3×80)	—	—
7	2000	2 (10×80)	4 (6.6×80)	—	—
8	2500	3 (10×80)	4 (10×80)	3 (10×80)	6 (6.6×80)
9	3200	3 (10×100)	4 (10×100)	3 (10×100)	6 (6.6×100)
10	4000	4 (10×100)	5 (10×100)	4 (10×100)	8 (6.6×100)
11	5000	5 (10×120)	7 (10×120)	5 (10×120)	8 (8×120)
12	6300	7 (10×120)	10 (10×120)	—	—

以上数据适用于 GGD、GCK、GCS、MNS 等外壳防护等级 IP40 及以下柜型。

A.3 铜铝复合排在 1600A GGD 中实际验证示例

开关柜 GGD-1600A，内装 2000A 刀开关，2000A 断路器，主母线：铜排为 10×100，铜铝复合排为 10×120；进出断路器母线：铜排为 (5×100)×2 根，铜铝复合排为 (6×100)×2 根。

温升试验结果见表 A.6：

表 A.6 GGD-1600A 铜排和铜铝复合排温升

GGD-1600A	铜排规格	铜排温升	复合排规格	复合排温升	截面比 (复合排/铜排)	温升差 (复合排-铜排)
水平母线	100×10	35	120×10	35.3	1.2	0.3
刀开关进线	100×10	49	120×10	48.7	1.2	-0.3
刀开关出线	100×10	50	120×10	50	1.2	0
断路器进线	2×(100×5)	56	2×(100×6)	57	1.2	1
断路器出线	2×(100×5)	47.7	2×(100×6)	48	1.2	0.3

短耐试验中，短路电流峰值 63kA，母线夹间距 0.93m，导体之间中心距 0.115m，根据公式 5 计算得到铜排弯曲应力 $\sigma = 281.5\text{N/mm}^2$ ，铜铝复合排弯曲应力 $\sigma = 234.6\text{N/mm}^2$ ，均小于要

求值；实际短耐试验也均符合要求。

9.附录 B：铜铝复合母线在母线干线系统（母线槽）中的应用示例

在母线干线系统中,铜铝复合母线替换铜母线既要满足温升极限的要求,也要满足短耐的要求。

B.1 空气型母线槽水平安装以及密集型母线槽水平安装、垂直安装,铜铝复合母线替换铜母线按表 3“铜铝复合母线替换铜母线对应的的截面规格方案”替换;空气型母线槽垂直安装,铜铝复合母线替换铜母线暂无替换方案(见表 B.4)。

B.2 为满足短耐的要求,空气型母线槽固定导体两绝缘夹之间 L 值和密集型母线槽固定侧板的螺栓之间 L 值,按照表 B.1“固定导体两绝缘夹之间的间距 L”规定。

表 B.1 固定导体两绝缘夹之间的间距 L

序号	短路电流(kA)	铜铝复合母线 (mm×mm)	L(mm)
1	10	6×30	300
2	30	6×40	300
3	30	6×50	300
4	30	6×60	200
5	30	6×80	200
6	30	6×100	200
7	30	6×120	200
8	10	5×30	240
9	30	5×40	240
10	30	5×50	240
11	30	5×60	160
12	30	5×80	160
13	30	5×100	160
14	30	5×120	160
15	10	4×30	200
16	10	4×40	200
17	30	4×50	200
18	30	4×60	130
19	30	4×80	130
20	30	4×100	130
21	30	4×120	130
22	10	3×30	160
23	10	3×40	160
24	10	3×50	160
25	30	3×60	110
26	30	3×80	110
27	30	3×100	110
28	30	3×120	110
29	50	2(5×120)	130

30	65	2 (6×120)	160
31	65	2 (8×120)	220

B.3 裸排结构中水平温升、短耐对比验证

短耐等级 30kA, $i=63\text{kA}$, 时间为 1s, 铜铝复合排规格为 8×60 , 母线夹间距 $L=180\text{mm}$ 。

短耐等级 50kA, $i=105\text{kA}$, 时间为 1s, 铜铝复合排规格为 10×120 , 母线夹间距 $L=186\text{mm}$ 。

铜铝复合排短耐试验验证详见表 B.2, 铜铝复合排与铜排温升对比试验详见表 B.3。

表 B.2 铜铝复合排短耐试验验证

序号	规格 (mm*mm)	短耐等级 (kA)	峰值电流 i (kA)	a 相间距 (mm)	固定绝缘夹距离 L	
					实验值	理论值
1	复合排 8×60	30	63	23	180	175
2	复合排 10×120	50	105	23	186	186

表 B.3 铜铝复合排与铜排温升对比试验

规格 (mm*mm)	截面积 (mm ²)	电流 (A)	电流密度 (A/mm ²)	温升 (K)	温升差 (复合排-铜排)
铜排 6×60	360	630	1.75	22.35	
复合排 8×60	480	630	1.31	22.5	0.15
铜排 10×100	1000	1350	1.35	26.55	
复合排 10×120	1200	1350	1.13	25.97	-0.53

B.4 裸排结构中铜铝复合排与铜排垂直安装温升对比验证

铜铝复合排与铜排垂直安装温升对比试验详见表 B.4。

表 B.4 铜铝复合排与铜排垂直安装温升对比试验

序号	规格 (mm*mm)	截面积 (mm ²)	电流 (A)	电流密度 (A/mm ²)	温升 (K)	温升差 (TL-T)	截面积增大 百分比
1	T 5×50	250	425	1.7	21.88		
	TL 5×60	300	425	1.42	25	3.12	20%
2	T 8×40	320	500	1.56	26.13		
	TL 8×50	400	500	1.25	25.28	-0.85	25%
3	T 60×6	360	630	1.75	30.52		
	TL 60×8	480	630	1.31	29.98	-0.55	33%
4	T 8×80	640	1350	2.1	57.86		
	TL 8×100	800	1350	1.69	56.78	-1.08	25%

10.附录 C：烟台孚信达双金属股份有限公司生产的铜铝复合母线产品工艺、参数及规格

C.1 孚信达公司生产的铜铝复合母线产品工艺

烟台孚信达双金属股份有限公司成立于 2007 年 6 月，坐落于烟台市牟平经济开发区，公司主导产品为铜铝复合母线系列化产品，产品已应用于电力、新能源（风电）等领域。

烟台孚信达双金属股份有限公司生产的铜铝复合母线采用水平连铸工艺，产品铜铝界面结合强度不低于 35MPa。该技术生产铜铝复合导体材料主要分为五道工序：1、水平连铸——将铜铝两种金属熔体在一个真空的复杂复合装置中，实现铜铝之间同时结晶和两种金属结合面的原子间纯净高性能的冶金结合，形成不同工艺规格的连铸铜包铝棒坯；2、轧制拉拔——棒坯经 13~15 道次二辊可逆轧机往复连轧，再经拉拔后形成各规格的铜铝复合导体材料；3、热处理——铜铝复合导体材料根据客户需求进行热处理以满足不同使用场景的产品性能要求；4、表面处理——产品表面进行打磨抛光处理；5、机加工——产品如有其它规格型号要求及加工要求，进行后续机加工工序，对产品进行冲孔、铰丝、压铆、折弯、铣边等操作。

本工艺生产的产品为铜铝复合母线，铜包覆层体积比分别为 25% 与 30%，密度分别为 4.25g/cm³ 与 4.56g/cm³，且铜铝接触面为冶金结合，无氧化物夹杂，界面结合强度不低于 35MPa。目前，公司生产的铜铝复合母线系列产品实现宽度 30~120mm、厚度 3~20mm 全系列覆盖。

C.2 孚信达公司生产的铜铝复合母线参数

孚信达公司生产的铜铝复合母线参数见表 C.1，C.2，C.3，C.4。

表 C.1 孚信达铜铝复合母线的参数

序号	参数	标准要求
1	材质	铜层的材质应符合 GB/T 5231 的规定，含铜量不小于 99.90%。 铝芯的材质应符合 GB/T 1196 的规定，含铝量不小于 99.70%。
2	铜层体积比、铜层厚度及偏差	铜层体积比为 25% 或者 30%，允许偏差±2%；允许产品横断面宽边和窄边铜层厚度存在不均匀分布，但宽度在 50.00mm 以上的铜铝复合母线任意位置的最小铜层厚度不小于 0.4mm；宽度不大于 50.00mm 的铜铝复合母线任意位置的最小铜层厚度不小于 0.2mm；
3	密度	体积比 25% 铜包铝母线的密度为 4.25g/cm ³ ，允许偏差±3%； 体积比 30% 铜包铝母线的密度为 4.56g/cm ³ ，允许偏差±3%；
4	界面结合的剪切强度	不小于 35MPa

5	电阻率	见表 C.2
6	温度变化特性试验	100 次冷热循环试验后铝芯和铜包覆层之间的剪切强度不小于 35MPa。
7	尺寸及偏差	见表 C.3
8	平直度	在 1m 长度内窄边 (a) 的平直度应不超过 2mm, 宽边 (b) 的平直度不应超过 5mm。
9	弯曲特性试验	铜包铝母线用宽边弯曲 90°, 表面不应出现褶皱或裂纹。
10	抗拉强度与伸长率试验	见表 C.4

表 C.2 孚信达铜铝复合母线的直流电阻率

铜层体积比	型号	20℃ 直流电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	导电率 (%IACS)
25%	软态	≤ 0.02498	≥ 69
	硬态	≤ 0.02548	≥ 67.7
30%	软态	≤ 0.02424	≥ 71.1
	硬态	≤ 0.02477	≥ 69.6
注: 20℃ 时铜包铝母线的物理参数应取下列数值: a) 体积比 25% 铜包铝母线的密度为 $4.25\text{g}/\text{cm}^3$; 体积比 30% 铜包铝母线的密度为 $4.56\text{g}/\text{cm}^3$; b) 电阻温度系数(20℃): $4.0 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$; c) 线膨胀系数: $2.25 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。			

表 C.3 孚信达铜铝复合母线的尺寸偏差

标称尺寸 (mm)	窄边 (a) (mm)	宽边 (b) (mm)
$2.50 < a \leq 6.30$	± 0.12	—
$6.30 < a \leq 12.50$	± 0.15	—
$12.50 < a$	± 0.20	—
$30 < b \leq 100$	—	± 0.80
$100 < b$	—	± 1.20

表 C.4 孚信达铜铝复合母线的抗拉强度与伸长率

抗拉强度 (MPa)		伸长率 (%)	
硬态	软态	硬态	软态
≥ 110	≥ 90	≥ 1.5	≥ 11

注：铜铝复合母线硬度 HB62 及以上为 Y 类（硬态），HB62 以下为 R 类（软态）。

C.3 孚信达铜铝复合母线规格

孚信达公司生产的铜铝复合母线规格见表 C.5。

表 C.5 孚信达铜铝复合母线的规格

厚度 宽度	3	4	5	5.3	6	6.6	8	10	10.5	12	13.5	15.8
15	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○
18	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○
20	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
23	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
25	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○
28	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
30	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
36	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
40	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
47.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
50	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
60	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
71.5	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
80	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
95	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
100	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
120	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×

注 1:

×: 推荐规格

○: 可生产不推荐规格

注 2:

孚信达公司生产的铜铝复合母线，宽度 40mm 及以下铜层体积比为 30%，宽度 40mm 以上铜层体积比为 25%