

高强度铝合金碗头挂板的开发与性能研究

王泽禹¹, 杨达¹, 邵星海², 迟鹏¹, 林森¹, 王海龙¹

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司通辽供电公司, 内蒙古自治区通辽 028000;

2. 河南科技大学, 河南洛阳 471003)

摘要: 基于铝铜系合金和T5热处理工艺, 采用砂型铸造技术进行了高强度铝合金碗头挂板的开发与性能研究。结果表明, 铝合金碗头挂板铸件表面光洁, 外观良好, 内部无缩松、缩孔、气孔和渣眼等铸造缺陷, 尺寸满足产品要求, 而质量仅为铸钢碗头挂板的32.5%。铝合金材料的硬度为HB107, 抗拉强度为483 MPa, 屈服强度为317 MPa, 伸长率13.5%, 具有良好的强度和韧性, 样件通过标称破坏载荷型式试验, 最大破坏载荷在129 kN以上, 能够满足碗头挂板的使用要求。

关键词: 铝铜合金; 高强度; 碗头挂板; 轻量化

金具是用于连接和组合的金属附件, 起到传递机械、电气负荷和防护的作用, 在输电线路中大量使用^[1]。金具品种繁多, 目前多数金具产品采用碳钢和铸铁制作, 少部分产品采用铝合金制作, 例如线夹。钢铁材料具有成本低、强度高的优点, 但是钢铁金具产品笨重, 容易造成线路负荷大和施工效率低的问题^[2-3], 给电力工程施工带来很多不便, 而且制备过程需要电镀防腐, 容易造成环境污染。相比之下, 采用铝合金材料制作金具, 具有密度小和抗氧化腐蚀的优势, 在产品制备过程不用进行电镀处理, 是一种绿色节能材料, 是金具材料发展的一种趋势。但是铝合金存在力学性能差和耐磨性不足的问题, 因此产品可靠性差, 且容易磨损造成产品失效, 对因部件更换造成的经济损失和输电线路的安全造成严峻的挑战。

综合来说, 铝合金材质在金具节能、耐腐蚀和环保方面与钢铁材料相比有很大优势^[4-7], 具体表现在磁滞损耗低, 密度低质量轻, 制备过程污染少和耐腐蚀性能高等方面, 但是目前大部分铝合金材料无法满足连接金具等产品的力学性能要求, 例如碗头挂板、联板和端部金具等^[8-9]。因此亟需开发高强度铝合金金具, 拓展铝合金金具的种类和应用范围, 推进金具的轻量化、节能化和耐腐蚀性能提升。目前部分研究人员在高强度复合型铝合金材料和轻量化金具的应用前景方面开展了探索和研究工作, 但是未结合具体的连接金具开展高强度铝合金的设计、制造和性能分析研究^[9-16]。本项目以常见的连接金具碗头挂板为研究对象, 拟采用高性能铝合金材料和砂型铸造工艺, 进行高强度铝合金金具的开发与研究。

1 铝合金金具的性能要求、设计和测试

1.1 性能要求

碗头挂板是金具中形状较为复杂的连接金具, 与其他金具的连接方式为球-窝类型, 一般采用碳钢(Q235A、35、40等)、铸铁(KTH330-08、QT500-7)等通过铸造方法成形^[3]。碗头挂板是一种承受较大载荷的连接金具, 其性能优劣对输配电线路安全至关重要, 应当具备一定的抗拉强度。图1是某型号碗头挂板铸钢件的三维图和实物图。

作者简介:

王泽禹(1982-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为新型电力装置开发与应用。电话: 18538830415, E-mail: yud1@163.com

中图分类号: TG146.2⁺¹

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

10-1401-06

基金项目:

国网蒙东电力科技项目“新型轻质耐蚀连接金具的开发与应用研究”(52662022000A)。

收稿日期:

2023-11-17 收到初稿,

2024-01-27 收到修订稿。

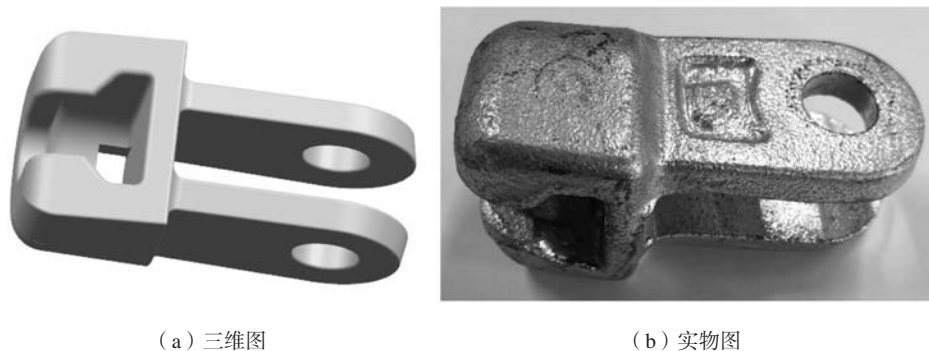


图1 某型号碗头挂板铸钢件的三维图和实物图

Fig. 1 Three dimensional and physical images of a certain model of socket clevis cast steel component

依据《国家电网公司输变电工程通用设计》，钢铁金具材料的抗拉强度应大于330 MPa，但是金具用铝合金材料一般采用中低强度铝合金，其抗拉强度不足300 MPa，无法满足设计要求。为了满足金具的使用要求，需要采用高强度铝合金材料或者进行结构优化，本研究主要考虑前者。铸造高强度铝合金主要是通过合金成分的强化作用和热处理强化实现，从而满足承载能力要求^[1, 5]。

根据电力金具相关标准以及碗头挂板的用途，其铝合金铸件的外观质量要求应满足：

(1) 铝制件表面应光洁、平整，不允许有裂纹等缺陷；

(2) 铝制件的重要部位（指不允许降低机械载荷的部位，以产品图样标注为准）不允许有疏松、气孔、砂眼、渣眼和飞边等缺陷。

1.2 铸造铝合金金具设计和测试

为了满足连接金具承载较大拉力的工况要求，本项目以铝铜系合金为原材料，通过砂型铸造方法进行铝合金碗头挂板金具样件的制备；通过T5人工时效热处理进行材料性能强化，并对热处理后的材料和样件进行力学性能和铸件质量测试和分析。

碗头挂板在大气环境下作为连接金具使用，需要满足较高的强度和耐磨性要求，和一定程度的耐腐蚀性要求。由于铝合金本身具有良好的耐蚀性，所以在合金成分设计方面主要考虑力学性能和耐磨性能的要求。本文参考ZL205A合金的成分，设计铝铜合金的成分如表1所示。在Al-Cu-Mn-Ti四元高强度铸造铝合金基础上，添加Ti、V、Zr、B元素，通过元素反应形成不溶解的复杂化合物实现析出强化，添加Cd元素能改善铝合金的人工时效效果。

表1 铝铜合金成分表

Table 1 Composition table of aluminum copper alloy

								$w_B / \%$
Cu	Mn	Ti	Cd	V	Zr	B	杂质	Al
4.5~5.5	0.2~0.4	0.15~0.35	0.15~0.25	0.1~0.3	0.05~0.2	0.005~0.06	≤0.3	余量

图2是碗头挂板铸件和附铸试棒实物图，附铸试棒设计为力学拉伸圆棒试样，直径为12.5 mm，长度100 mm。通过对铝铜合金附铸试棒进行T5热处理，进行抗拉强度测试以后，再依据相关标准加工出金相分析和硬度测试试样。本文采用光谱分析仪检测铝合金材料的成分，采用布氏硬度计和万能试验机进行了布氏硬度、屈服强度、抗拉强度和伸长率测试，其中硬度测试10个位置后取平均值，强度试验测试3个样品后取平均值。

对铝铜合金碗头挂板T5热处理样件进行铸件缺陷、主要尺寸、表面粗糙度和标称破坏载荷型式试验，共测试3个样件，表面粗糙度和质量取平均值，其他测试内容要求3个样件全部符合要求。采用肉眼



图2 碗头挂板铸件和附铸试棒实物图

Fig. 2 Picture of socket clevis casting and attached test bar

观察铸件表面质量,通过X射线工业CT设备(型号COMET)进行铸件内部质量无损检测,通过粗糙度仪测量内孔的表面粗糙度 Ra ,采用万能试验机进行标称破坏载荷试验。

2 铝合金碗头挂板的制备

砂型铸造具有制造成本低,工艺流程简单,以及便于铸造工艺优化和尺寸质量控制的优点,适合新产品开发和小批量试制。本文采用砂型重力铸造的方法制备铝合金碗头挂板样件。为了避免铝合金碗头挂板铸造过程中可能出现的浇不足、渣孔和氢气孔等缺陷,因此在熔炼过程中严格执行除气、除渣和精炼等工艺规程,降低铝液中的氢气泡;调节铝液的流动性,控制浇注温度、加压时间和速度等,保证铸件的内部组织和表面质量^[5]。

采用铝铜合金材质和砂型铸造方法制备碗头挂板,能够通过合金成分加入改善铝合金的流动性和降低热裂倾向性,减少缩松和提高铸件的气密性;能够实现碗头挂板内窝复杂形状的成形,保障铸件的成形质量和控制废品率。本文在碗头挂板三维图的基础上,制备铝合金碗头挂板金具的具体过程如下:

(1)通过预留加工余量、浇注系统设计和冒口设计,进行碗头挂板的砂型铸造工艺设计;

(2)在碗头挂板的砂型铸造工艺基础上,根据碗头挂板的结构特征设计出砂型和砂芯,得到碗头挂板的铸型分模工艺;

(3)采用分层制造方法(SLS)将砂型和砂芯3D打印成形,并按照碗头挂板的铸型分模工艺进行砂型砂芯的试组装;

(4)采用水基氧化铝涂料将砂型砂芯与铝液的接触面进行涂料涂刷,干燥以后进行砂型砂芯的合模和固定,按照表1的成分表进行备料和熔化后,将铝合金金属液浇注至铸型中;

(5)待铝合金金属液凝固冷却后,进行清理、打磨和抛丸;

(6)将铸件进行T5人工时效热处理后,进行螺栓孔加工,得到金具样件。T5热处理工艺是将铸造铝合金碗头挂板随炉升温至540℃,固溶14h后,在55℃热水中淬火,然后进行155℃人工时效8h。

3 铝合金碗头挂板的性能测试和分析

3.1 碗头挂板化学成分和尺寸分析

表2是铝合金随炉试棒的化学成分及含量。各合金元素能够提高铝合金的力学性能。Cu和Mn是主要的合金元素,能够提高合金的强度、硬度、耐磨性和耐蚀

表2 铝合金随炉试棒的化学成分及含量
Table 2 Chemical composition and content of aluminum alloy furnace test bars $w_B/\%$

Cu	Mn	Ti	Zr	V	B	Cd	Mg	Al及其他
5.0	0.42	0.24	0.091	0.17	0.029	0.19	0.001	93.859

性;少量Ti能细化晶粒和降低有害杂质的含量,进一步提升耐磨性能;Zr、V、B等元素能进一步提高合金的热强性;Cd能改善铝合金的人工时效效果,显著提高合金的力学性能。

图3是经过T5热处理和螺栓孔加工后的铝合金碗头挂板实物图。可以看出碗头挂板铸件的外观良好,表面光洁、平整,无肉眼可见的气孔、夹渣和裂纹等铸造缺陷。对制备的3个样件进行尺寸和质量检测,表3是三个样件的尺寸和质量测量值与判定标准对比表。可以看出,对三个样件的五处位置尺寸进行了测量,均符合判定标准要求,而铝合金碗头挂板的质量仅为铸钢碗头挂板的32.5%,减重效果显著。低密度的铝合金金具在安装和施工过程中比较方便,并且还能够有效减轻杆塔的负载。



图3 铝合金碗头挂板实物图

Fig. 3 Physical picture of aluminum alloy socket clevis

表3 三个样件的尺寸和质量测量值与判定标准对比表
Table 3 Comparison table of dimensions and quality measurement values of three samples with judgment criteria

样品编号	主要尺寸/mm					质量/kg
	A	B	C	M	H	
1#	34.4	18.82	21.39	17.78	85.02	0.39
2#	34.34	18.84	21.98	17.88	84.86	0.39
3#	34.4	18.7	21.57	17.93	84.99	0.39
	34.5	19.2	20	18	85	
判定标准要求	基本尺寸小于或等于50mm时,其允许极限偏差为 ± 1.0 mm;基本尺寸大于50mm时,其允许极限偏差为基本尺寸的 $\pm 2\%$ 。					0.4

3.2 碗头挂板的无损检测和粗糙度分析

表4是铝合金碗头挂板的铸件内部缺陷检测和内孔表面粗糙度 Ra 检测结果。可以看出铸件内部无缩松、缩孔、气孔、砂眼、渣眼、飞边等缺陷。铝铜合金加入了Si元素等，流动性好，充型充分，热裂倾向性小，铸造工艺对凝固过程的缩松缩孔起到了良好的补缩作用。因此，采用铝铜合金来制造形状较为复杂的碗头挂板等零件能够满足其形状要求和铸造缺陷控制。碗头挂板的工作面主要是螺栓孔，是通过机加工成形；

表4 铝合金碗头挂板的铸件内部缺陷检测和内孔表面粗糙度 Ra 检测结果

Table 4 Internal defect detection and inner hole surface roughness Ra detection results of aluminum alloy socket clevis castings

样品 编号	无损检测				结论	孔表面 粗糙度
	夹渣	分散状 疏松	缩孔	气眼、砂眼和 飞边等其他缺陷		
1 [#]	无	无	无	无	接受	$Ra0.199\ \mu\text{m}$
2 [#]	无	无	无	无	接受	/
3 [#]	无	无	无	无	接受	/

加工后的螺纹孔表面粗糙度为 $Ra0.199\ \mu\text{m}$ ，表面光洁，满足产品使用要求。

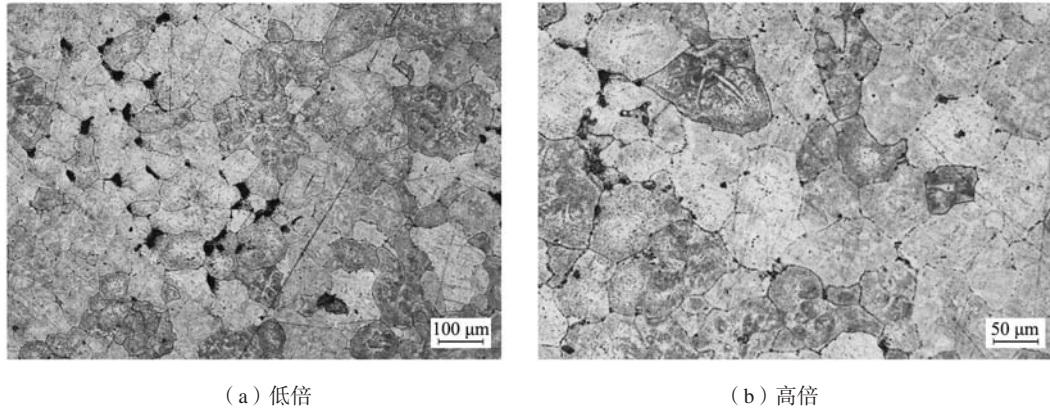
3.3 碗头挂板的微观组织分析

图4是不同倍数下铝合金碗头挂板的微观组织SEM图。可以看出铝铜合金经过T5热处理以后，组织呈明显的等轴晶粒，在晶界处分布有较多细小析出相弥散分布。这说明铝基体中有第二相的析出，弥散分布在晶粒周围，能够起到弥散强化的作用。

为了进一步判断析出相的成分，对含有析出相的区域进行能谱分析。图5是铝合金碗头挂板微观组织的能谱分析结果。可以看出，所测试的区域包含铝基体和析出相，主要成分是Cu和Al。常温下Cu在Al中的最大溶解度为0.5%，因此所测试区域中析出相应是 CuAl_2 等析出相，具有明显的时效强化效果。

3.4 碗头挂板的强度测试和破坏载荷试验

为了判断铝合金碗头挂板的力学性能，采用布氏硬度和万能试验机对T5热处理后的铝铜合金附铸试棒进行了硬度和强度测试；并依据金具型式试验相关标准，

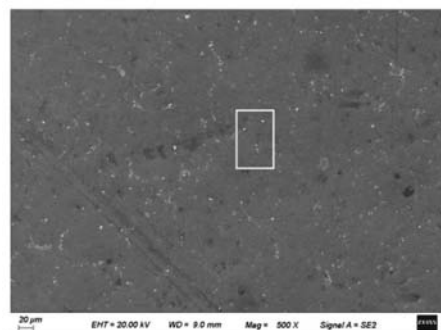


(a) 低倍

(b) 高倍

图4 不同倍数下铝合金碗头挂板的微观组织SEM图

Fig. 4 SEM images of microstructure of aluminum alloy bowl head hanging plate at different magnifications



(a) 组织

元素	质量分数/ %	原子分数/ %
Al	88.07	84.45
Cu	5.26	2.14
C	4.92	10.59
O	1.74	2.82

(b) 能谱分析

图5 铝合金碗头挂板微观组织的能谱分析结果

Fig. 5 Energy spectrum analysis results of microstructure of aluminum alloy socket clevis

对热处理后的铝合金碗头挂板样件进行了破坏载荷实验。表5是T5热处理后的铝铜合金附铸试棒硬度和强度测试结果,以及与Q235力学性能对比。表6是T5热处理后的铝铜合金碗头挂板的标称破坏载荷试验结果。由表5可以看出,经过热处理后的铝铜合金材质的硬度为HB107,抗拉强度可以达483 MPa,屈服强度可以达到317 MPa,伸长率13.5%,具有良好的强度和韧性。除伸长率以外,性能已经接近金具常用的碳钢材

料Q235,其中铝铜合金的屈服强度显著高于Q235,这能够提高金具的可靠性。样件经过标称破坏载荷试验后,破坏位置位于螺栓连接孔处,在标称破坏载荷100 kN下保持60 S时间不破坏,最大破坏载荷在129 kN以上,满足碗头挂板的破坏载荷型式试验要求。这说明铝铜合金经过T5热处理后,通过析出强化显著提升了铝合金的力学性能,能够满足金具的力学性能要求。

表5 T5热处理后的铝铜合金随炉试棒硬度和强度测试结果,以及与Q235力学性能对比
Table 5 Hardness and strength test results of aluminum copper alloy after T5 heat treatment in furnace, as well as comparison of mechanical properties with Q235

材质	布氏硬度HB	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
铝铜合金(T5热处理)试棒	107	317	483	13.5
Q235	135~155	235	370~500	24

表6 T5热处理后的铝铜合金碗头挂板的标称破坏载荷试验结果
Table 6 The nominal failure load test results of aluminum copper alloy socket clevis after T5 heat treatment

样品编号	标称破坏载荷	最大破坏载荷/kN
1#	标称破坏载荷100 kN, 保持60 s, 不破坏	136.9
2#	标称破坏载荷100 kN, 保持60 s, 不破坏	131.2
3#	标称破坏载荷100 kN, 保持60 s, 不破坏	129.1

4 结论

本文基于铝铜系合金和T5热处理工艺,采用砂型铸造工艺能够制备出铸件质量合格的高强度铝合金碗头挂板,减重效果显著,且尺寸、铸件质量和力学性能等满足产品要求。

(1) 采用砂型铸造工艺试制铝铜合金碗头挂板,铸件样件外观良好,尺寸满足产品要求,内部无明显缺陷。

(2) 铝铜合金碗头挂板质量仅为铸钢碗头挂板质量的32.5%,减重效果显著,能够有效减轻杆塔的负载,提升杆塔可靠性。

(3) 铝铜合金经过T5热处理后,硬度为HB107,抗拉强度为483 MPa,屈服强度为317 MPa,伸长率13.5%,具有良好的强度和韧性,铝铜合金碗头挂板满足标称破坏载荷等形式试验要求。

参考文献:

- [1] 谭琳. 输电线路金具用材料及其应用技术展望 [J]. 科学与信息化, 2020 (29): 98-100.
- [2] 党乐, 郭金刚, 崔亚茹, 等. 架空输电线路金具材料研究现状及发展 [J]. 电气技术, 2022, 23 (4): 1-6.
- [3] 宋铁创, 李俊辉, 张力方, 等. 特高压输电线路连接金具的高强度材料选型 [J]. 中国新技术新产品, 2019 (7): 57-58.
- [4] 余虹云. 浅论铝合金金具铸造方法 [J]. 电力建设, 2003 (2): 57-58.
- [5] 陈胜男, 何卫, 杜挺, 等. 输电线路金具用材料及其应用技术研究进展 [J]. 电工技术, 2019 (15): 149-151.
- [6] 李捷, 张军. 镗变质时间对近共晶铝合金电力金具材料组织与性能的影响 [J]. 铸造技术, 2020, 41 (10): 913-915.
- [7] 祝志祥, 丁一, 迟铨, 等. 高性能8xxx系铝合金材料研究进展及其在电力电缆领域的应用 [J/OL]. 热加工工艺, 2024 (21): 16-21.
- [8] 黄应敏, 邹科敏, 许翠珊, 等. 高导电性能铝合金在新型电力金具制造中的应用研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50 (4): 53-57.
- [9] 洪润洲, 周永江, 姚惟斌. 时效工艺对ZL101A合金性能的影响 [J]. 材料工程, 2004 (10): 39-41.
- [10] 季伟, 张飞勇, 孟繁东, 等. 高强度铝合金材料电力金具的应用研究 [J]. 浙江电力, 2020, 39 (6): 111-114.
- [11] 徐巍峰, 朱培红, 季伟, 等. 一种真空压力浸渗法制备碳改性铝合金复合材料的方法: CN112111665B [P]. 2021-09-10.

- [12] JULIEN S, BLANKA L, NICOLE F, et al. Mechanical reinforcement of a high-performance aluminium alloy AA5083 with homogeneously dispersed multi-walled carbon nanotubes [J]. Carbon, 2012, 50 (6) : 2264–2272.
- [13] 蔡炜, 王利民, 何卫, 等. 一种纳米碳合金材料及基于该材料制备的电力金具: CN107881374B [P]. 2019-07-30.
- [14] 王泽禹, 薛洪龙, 王明明, 等. 一种轻质高强度的金具联板: CN216390430U [P]. 2022-04-26.
- [15] 丁仁杰, 葛宁, 刘海宁, 等. 一种复合型铝合金端部金具的离心铸造模具: CN216370093U [P]. 2022-04-26.
- [16] 张强, 许超, 李海龙, 等. 耐热铝合金导体材料的研究进展 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (19) : 7–10.

Development and Performance Study of High Strength Al Alloy Socket Clevis

WANG Ze-yu¹, YANG Da¹, SHAO Xing-hai², CHI Peng¹, LIN Sen¹, WANG Hai-long¹

(1. State Grid Inner Mongolia Eastern Electric Power Co., Ltd., Tongliao Power Supply Company; Tongliao 028000, Inner Mongolia, China; 2. Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan, China)

Abstract:

Based on Al-Cu alloy, T5 heat treatment process, and sand casting process, high-strength Al alloy socket clevis was developed. The quality and performance of the samples were studied. The results showed that the surface of Al alloy socket clevis castings was smooth and had a good appearance. In the interior of the casting, casting defects such as shrinkage, porosity, slag pores, etc. were not detected. The size of the casting met the requirements of the product, but the quality was only 32.5% of the cast steel socket clevis. The hardness of material was tested as HB107, the tensile strength was tested as 483 MPa, the yield strength was tested as 317 MPa, and the elongation was tested as 13.5%. The nominal failure load type test of the sample was tested, and the test result showed that the maximum failure load was above 129 kN. Therefore, the high-strength Al alloy socket-clevis eye had good strength and toughness, which could meet the requirements of socket-clevis eye.

Key words:

aluminum copper alloy; high strength; socket clevis; light weight