

高强度铝合金挂环设计与分析

边美华¹, 朱登杰², 张德钦³, 龚 博², 何雨茵¹, 廖永力²

(1. 广西电网有限责任公司电力科学研究院 广西电力装备智能控制与运维重点实验室, 广西壮族自治区 南宁 530023;
2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663; 3. 广西电网有限责任公司北海供电局, 广西壮族自治区 北海 536006)

摘要: 球头挂环是输电线路中重要的连接金具, 提高球头挂环的力学性能对输电线路安全运行十分重要。针对铁质金具高损耗、传统铝合金材料强度不足、现有高强度铝合金耐腐蚀性能差的问题, 采用颗粒增强手段调整 6082 铝合金材料配方, 并通过生产工艺参数优化, 实现了材料与工艺的相匹配。结果表明, 当锻前温度为 520 °C、固溶处理为 535 °C/1 h、时效处理为 175 °C/8 h 时, 高强度 6082-A 铝合金球头挂环的力学性能最佳, 在该工艺参数下, 采用固态模锻方式得到的高强度 6082-A 铝合金球头挂环的抗拉强度可达 410 MPa, 相比于 6082 铝合金球头挂环提高了 22.5%, 极大提升了铝合金球头挂环的承载能力, 拓展了铝合金金具的应用场景。

关键词: 高强度铝合金; 锻造; 颗粒增强; 球头挂环; 抗拉强度; 腐蚀

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.002

中图分类号: TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 05-0006-07

Design and analysis of high-strength aluminum alloy hanging ring

Bian Meihua¹, Zhu Dengjie², Zhang Deqin³, Gong Bo², He Yuyin¹, Liao Yongli²

(1. Guangxi Key Laboratory of Intelligent Control and Maintenance of Power Equipment, Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China;
3. Guangxi Power Grid Company Limited Beihai Power Supply Bureau, Beihai 536006, China)

Abstract: The ball head hanging ring is an essential connection fittings in transmission lines, and it is important to improve the mechanical properties of ball head hanging ring for the safe operation of transmission lines. Therefore, aiming at the problems of high energy loss of iron fittings, the insufficient strength of traditional aluminum alloy and the poor corrosion resistance of existing high-strength aluminum alloy, the composition of 6082 aluminum alloy was modified by particle reinforcement method, and the matching of material and process was realized by the optimization of production process parameters. The results show that the ball head hanging ring of high-strength aluminum alloy 6082-A exhibits the best mechanical properties when the pre-forging temperature is 520 °C, the solution treatment is conducted at 535 °C for 1 h, and the aging treatment is performed at 175 °C for 8 h. Under the above process parameters, the tensile strength of ball head hanging ring for high-strength aluminum alloy 6082-A can reach 410 MPa, which is 22.5% higher than that of ball head hanging ring for 6082 aluminum alloy, which significantly enhances the bearing capacity of ball head hanging ring for aluminum alloy and expands the application scope of aluminum alloy fittings.

Key words: high-strength aluminium alloy; forging; particle reinforcement; ball head hanging ring; tensile strength; corrosion

连接金具^[1]是用于将绝缘子连成串以及连接金具与金具的承受机械荷载的金具, 包含球头挂环、碗头挂板、U 型挂环和直角挂板等。连接金具在输变电工程中起着重要作用, 然而, 现阶段由于连接

金具断裂所导致的事故时有发生^[2]。传统铝合金金具的力学性能普遍较低, 无法满足高强度应用场景, 而满足强度要求的高强度商用铝合金不耐腐蚀, 铁质金具需要再表面进行热镀锌防腐, 均与“双碳”战略背道而驰。

为与电力工业发展相契合, 研发高强度耐腐蚀铝合金连接金具极为重要。在铝合金基体中加入纳米级元素可实现铝合金的颗粒强化, 有利于铝合金晶粒细化和动态再结晶^[3], 提高铝合金金具强度。基于该原理, 本文以连接金具中用量较大的球头挂

收稿日期: 2024-06-15; 修订日期: 2024-09-24

基金项目: 广西电网科技项目 (GXKJXM20220064)

作者简介: 边美华 (1980-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: 27250060@qq.com

通信作者: 朱登杰 (1987-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: zhudj@csg.cn

环为研究对象,采用输电线路中常用的 6082 铝合金为基体,加入 TiB_2 颗粒对其进行增强^[4-5],并对其关键生产工艺参数进行研究,掌握其力学性能增强规律,最终得到一种高强度铝合金球头挂环,以应对高强度金具应用场景,实现“以铝代铁”的目标。球头挂环及其工程应用如图 1 所示。



图 1 球头挂环及其工程应用

Fig. 1 Ball head hanging ring and its engineering application

1 高强度铝合金材料配方

现阶段金具材料主要以 6XXX 系铝合金和 7XXX 系铝合金材料为主,其中 6XXX 系铝合金材料的抗拉强度可以达到 300 MPa 以上,相比于 6XXX 系铝合金,7XXX 系铝合金在屈服强度和抗拉强度上提高了 30% 以上^[6],但是由于 7XXX 系铝合金的耐腐蚀性能差,金具在服役过程中容易受到环境影响而发生局部腐蚀破坏。在局部腐蚀中应力腐蚀开裂往往是导致其失效的主要原因,由于应力腐蚀开裂没有明显前兆,其破坏性和危害极大^[7]。因此,本文以 6XXX 系铝合金材料为基体进行研发,由于 6082 铝合金相比其他 6XXX 系铝合金具有优异的力学性能和耐蚀性能,与电力金具应用场景更为契合^[8],因此,对 6082 铝合金材料进行开发。

颗粒增强铝基复合材料具有优异的可设计性、较高的比强度、较低的密度等优势,可满足输电线路对连接金具抗拉强度的要求。目前,铝合金中原位增强的颗粒有 TiC 、 TiB_2 、 SiC 等,考虑到 TiB_2 颗粒与铝基体存在共格关系,能够通过增加形核率和抑制晶粒长大来双重细化晶粒^[9],同时 TiB_2 具有高

模量、高硬度的特点,采用原位自生法可较好地解决 TiB_2 与金属基体界面的润湿不良等限制^[10],且原位自生的 TiB_2 颗粒尺寸细小,可达纳米级,呈等轴状,对基体合金的抗拉强度和弹性模量具有很高的强化效果。

本文所开发的材料为 6082-A 铝合金材料,其是以 6082 铝合金材料为基体^[11],加入少量 Mg、Ti 和 B 等微量元素进行调配所得到的材料,其基本成分与普通 6082 铝合金的成分相似,Al 含量为 97% (质量分数) 左右, TiB_2 含量为 1.5% 左右,仅在少量微量金属元素上与 6082 铝合金成分存在区别。通过 X 射线光电子能谱 (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) 检测 6082-A 与 6082 铝合金中金属元素的质量分数,得到微量元素质量分数的对比图如图 2 所示。

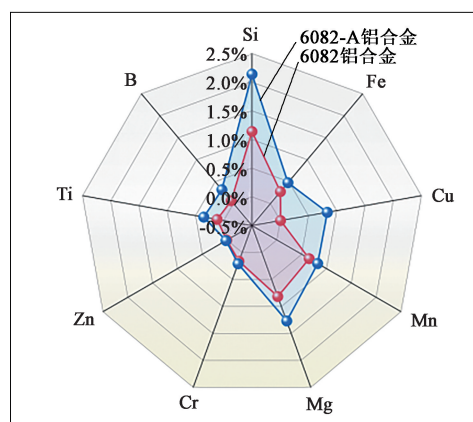


图 2 6082-A 和 6082 铝合金微量元素质量分数对比图

Fig. 2 Comparison of mass fraction for trace elements between 6082-A and 6082 aluminum alloys

为探究 6082-A 铝合金材料的力学性能提升效果,分别试制了 6082-A 与 6082 铝合金标准拉伸试样,将经过固溶处理和时效处理后的试样通过 E45.504 立式拉力机对试样进行拉伸试验,拉伸试样示意图及拉伸试验布置如图 3 所示。

6082-A 与 6082 铝合金标准拉伸试样的载荷-位移曲线如图 4 所示。由载荷-位移曲线可知,6082-A 铝合金的抗拉强度相比于 6082 铝合金提高了约 80 MPa,微量元素的添加对 6082 铝合金材料基体起到了强化作用。对拉伸后的 6082-A 铝合金拉伸试样取样进行能量色散谱仪 (Energy Disperse Spectroscopy, EDS) 扫描,EDS 面扫描结果如图 5 所示。

通过 EDS 对 6082-A 铝合金拉伸试样进行面扫描,并在面扫描结果中选取了 7 个点 (点 1~点 7) 进行点扫描,其中点 4 的点扫描结果如图 6 所示。

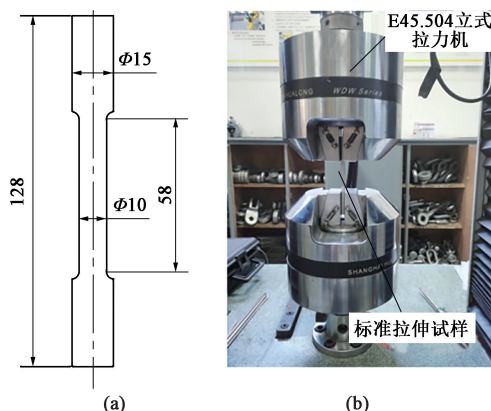


图3 拉伸试样示意图 (a) 及拉伸试验布置图 (b)

Fig. 3 Schematic diagram of tensile specimen (a) and tensile test layout (b)

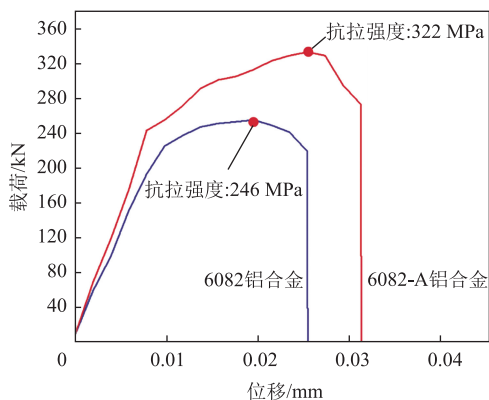


图4 6082-A 与 6082 铝合金标准拉伸试样的载荷-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of standard tensile specimens for 6082-A and 6082 aluminum alloys

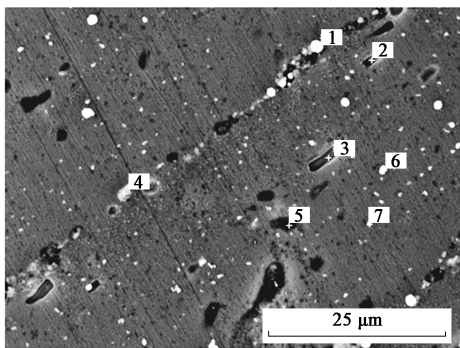


图5 6082-A 铝合金拉伸试样的EDS面扫描图

Fig. 5 Surface scanning diagram of EDS for 6082-A aluminum alloy tensile specimen

从点扫结果中发现, Al、Ti、B 这 3 种元素的峰值较高, 推测该点为 TiB_2 相, TiB_2 颗粒与基体之间的相互作用可以阻碍位错移动和裂纹扩展, 从而提高材料的屈服强度和抗拉强度, 这是由于颗粒的存在使基体中的应力场发生了变化, 形成了一种“场效

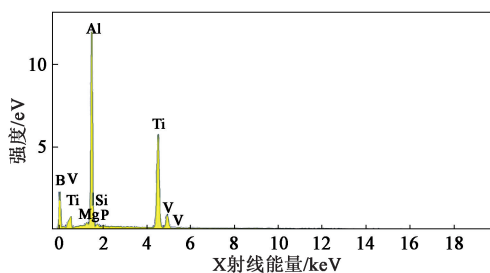


图6 点4的点扫描结果

Fig. 6 Point scanning result for point 4

应”。此外, 颗粒也可以限制位错的滑移和扩散, 从而提高了材料的塑性变形能力。

因在铝合金中增加了多种元素, 因此, 开展了高强度 6082-A 铝合金、2A14 铝合金和 7050 铝合金 480 h 中性腐蚀试验, 试样表面腐蚀产物的去除依照 GB/T 16545—2015^[12], 置于 25 ℃ 的浓 HNO_3 (浓度为 $1.42 g \cdot ml^{-1}$) 中 3~5 min 以去除腐蚀产物, 经蒸馏水、酒精清洗后吹干。采用 VHX-2000 型超景深三维显微镜拍摄除锈后的试样表面微观形貌, 铝合金腐蚀 24 h 后的情况如图 7a 所示, 铝合金腐蚀 480 h 后的情况如图 7b 所示。

对图 7 中腐蚀后的形貌进行对比可知, 经 480 h 腐蚀处理后 6082-A 铝合金中的灰色基体仍清晰可见, 具有金属光泽, 但 7050 和 2A14 铝合金表面附着有大量白色腐蚀产物, 在中心处尤为聚集, 6082-A 铝合金耐蚀性远远好于 7050 铝合金和 2A14 铝合金, 满足电力金具应用场景对金具材料腐蚀性能的要求。

2 高强度铝合金球头挂环工艺试验与分析

高强度铝合金球头挂环的制造加工工序为: 下料→网带炉加热→锻造→切边、钻孔→打磨→固溶处理→时效处理→检测。高强度铝合金球头挂环的生产过程如图 8 所示。

工艺试验分为两个部分: 锻造工艺试验和热处理工艺试验。锻造工艺试验主要考虑不同锻前温度下金具产品的力学性能^[13], 为此, 锻造工艺试验共准备 32 个样品, 并设置 460、480、500 和 520 ℃ 这 4 个锻前温度, 按照每个锻前温度加热 8 个样品。热处理工艺试验主要考虑不同的时效处理温度^[14], 将对应不同锻前温度下的 8 个样品分别进行 165 ℃/8 h、170 ℃/8 h、175 ℃/8 h、180 ℃/8 h 的不同时效处理试验。

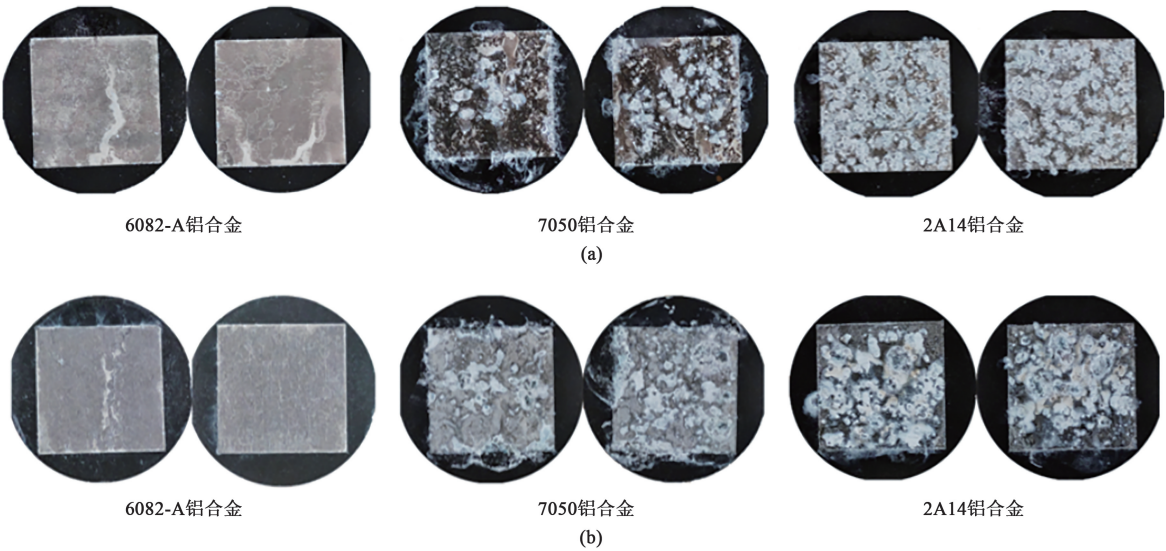


图 7 不同铝合金在不同腐蚀时间下的腐蚀形貌
(a) 24 h (b) 480 h

Fig. 7 Corrosion morphologies of different aluminum alloys at different corrosion time

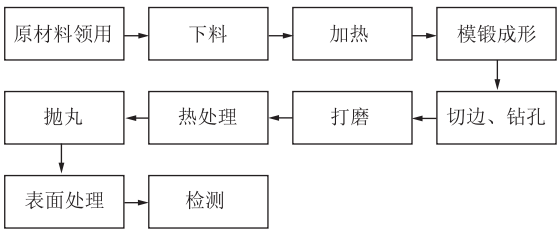


图 8 高强度铝合金球头挂环生产过程

Fig. 8 Production process of ball head hanging ring for high-strength aluminum alloy

6082-A 铝合金挤压棒料由切割机切割为 $\Phi 32\text{ mm}\times 84\text{ mm}$ 的短棒坯料，完成下料工序；坯料通过网带炉加热至试验所需的锻前温度，锻造模具预热至 $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；采用 J58K-630 型数控电动螺旋

压力机以 21.5 kJ 的打击能量对坯料进行锻造。试验过程所用坯料及试制的部分球头挂环如图 9 所示。

本文共进行了 32 组高强度铝合金球头挂环工艺试验，试验结果如表 1 所示。通过表 1 的试验结果分析锻前温度对球头挂环的性能影响，得到如图 10 所示的不同锻前温度下球头挂环的平均拉断力和平均抗拉强度。发现 6082-A 铝合金更适合高温锻造，其在高温下的锻造性能更加优良。当锻前温度为 $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，锻造的球头挂环拉断力均达到了 84 kN 以上，抗拉强度均达到了 393 MPa 以上，平均拉断力为 88.61 kN ，平均抗拉强度为 400.64 MPa ，相比于其他锻前温度下锻造的球头挂环的平均抗拉强度

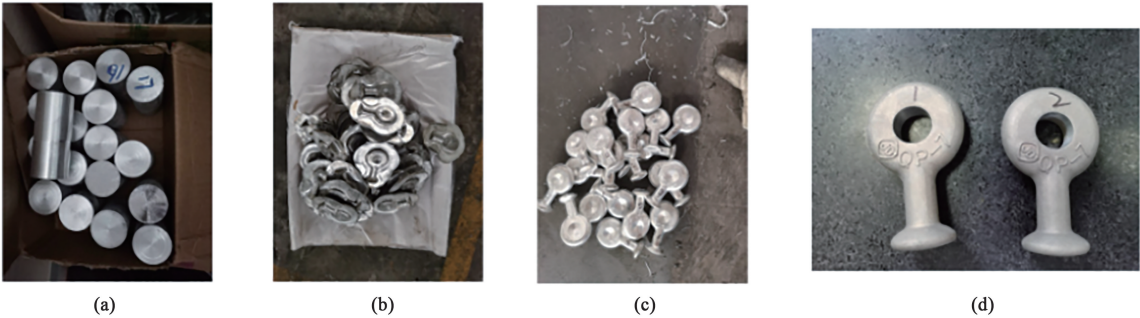


图 9 试验所用坯料及试制的球头挂环

(a) 锻造坯料 (b) 锻造成形的球头挂环 (c) 切边后的球头挂环 (d) 热处理后的球头挂环

Fig. 9 Blank for test and trial production of ball head hanging rings

(a) Forging blanks (b) Forged ball head hanging rings (c) Ball head hanging rings after trimming
(d) Ball head hanging rings after heat treatment

表 1 高强度铝合金球头挂环工艺试验结果

Table 1 Technology test results of ball head hanging rings for high-strength aluminum alloy

序号	T6 工艺	锻前温度/ ℃	拉断力/ kN	抗拉强度/ MPa
1		460	88.70	413.26
2		460	73.57	320.35
3		480	74.87	334.54
4	固溶 535 ℃/1 h	480	78.23	349.58
5	时效 165 ℃/8 h	500	82.35	376.87
6		500	88.98	392.03
7		520	87.87	393.72
8		520	88.67	393.50
9		460	84.60	371.86
10		460	88.57	403.06
11		480	90.38	414.82
12	固溶 535 ℃/1 h	480	82.83	365.66
13	时效 170 ℃/8 h	500	90.36	402.81
14		500	88.05	394.37
15		520	93.64	409.67
16		520	91.26	402.68
17		460	83.71	364.52
18		460	90.48	416.24
19		480	86.60	400.12
20	固溶 535 ℃/1 h	480	83.32	381.28
21	时效 175 ℃/8 h	500	85.88	400.65
22		500	91.04	416.64
23		520	88.87	416.61
24		520	89.06	411.48
25		460	84.91	383.04
26		460	85.24	390.08
27		480	86.20	379.75
28	固溶 535 ℃/1 h	480	85.55	372.52
29	时效 180 ℃/8 h	500	82.04	379.07
30		500	87.99	387.66
31		520	84.47	385.66
32		520	85.02	393.78

均有所提高，且随着锻前温度的提高，球头挂环抗拉强度标准差均大幅降低，加工稳定性大幅提高。颗粒增强球头挂环的平均抗拉强度均随着锻前温度的升高先增大后减小，当锻前温度为 480 ℃ 时，平均抗拉强度达到了最小值。当锻前温度为 460 ℃ 时，晶粒尺寸较小，晶界的位错阻挡作用较强；当锻前

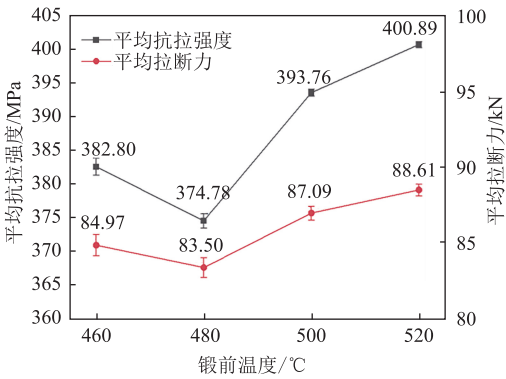


图 10 不同锻前温度下球头挂环的平均拉断力和平均抗拉强度

Fig. 10 Average tensile breaking force and average tensile strength of ball head hanging rings at different pre-forging temperatures

温度提高至 480 ℃ 时，晶粒长大导致晶界位错阻挡作用减弱，材料抗拉强度降低；随着温度的进一步增高，发生了晶粒的再结晶，原本的大晶粒被细化，再次增加了材料的强度。

通过表 1 的试验结果分析不同热处理工艺对球头挂环力学性能的影响规律，得到如图 11 所示的不同时效温度下球头挂环的平均拉断力和平均抗拉强度。结果发现，当时效温度相对较高时，热处理效果较好。当时效温度为 165 ℃ 时，T6 处理之后的颗粒增强球头挂环的平均拉断力和平均抗拉强度均表现最差，且其性能极不稳定，该时效温度下抗拉强度的最大值与最小值差值超过 90 MPa。经过较高时效温度（170~180 ℃）的 T6 处理的 6082-A 铝合金球头挂环的抗拉强度和拉断力提升效果更为明显，抗拉强度均达到了 360 MPa 以上，拉断力均超过了 82 kN，这表明当时效温度较高时，6082-A 铝合金球头挂环的力学性能更加优良。因此，虽然 6082-A 铝合金球头挂环在力学性能方面存在一定的波动性，但是通过提高时效处理温度可以使 6082-A 铝合金球头挂环的力学性能维持在一个较高且稳定的范围内，其中，平均抗拉强度超过了 380 MPa，相比于 6082 铝合金球头挂环的抗拉强度提高了 22.5%，同时超过了输变电工程标准设计^[15]中对铸铁金具抗拉强度的要求（该金具为球头挂环，强度等级在 70 kN，要求抗拉强度不低于 375 MPa），使得铝合金球头挂环的应用场景得到了极大的扩展。

当时效温度为 175 ℃ 时，经 T6 处理后的 6082-A 铝合金球头挂环的力学性能达到最优，推测其原因此时铝合金中的固溶元素可迅速析出形成强化相，析出相的尺寸和分布也相对更为均匀，这些析

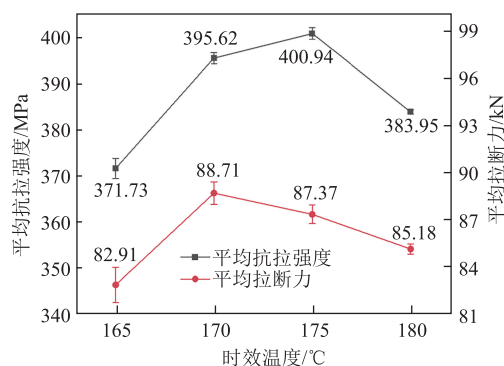


图 11 不同时效温度下球头挂环的平均拉断力和平均抗拉强度

Fig. 11 Average tensile breaking force and average tensile strength of ball head hanging rings at different aging temperatures

出相可以有效限制位错的移动和滑移。同时, 该温度下的时效处理避免了过高时效温度下的晶粒长大和晶界消溶, 保持了较小的晶粒组织。因此, 175 °C 的时效温度下处理的 6082-A 铝合金球头挂环的性能达到最佳。

部分拉伸试验后的 6082-A 铝合金球头挂环样品如图 12 所示, 其中第 2 组、第 12 组、第 24 组和第 30 组的试样的拉伸曲线如图 13 所示。对试验后的产品进行观察, 发现大部分球头挂环样品均在球头附近断裂。对断口进行分析发现, 此次锻制的样品, 断裂处均为脆性断裂, 且拉断后球头挂环断裂处未出现明显的颈缩现象, 其载荷-位移曲线也无屈服变形阶段, 球头挂环断裂后载荷均断崖式下降。



图 12 部分拉伸试验后的球头挂环样品

Fig. 12 Partial samples of ball head hanging ring after tensile test

通过试验获得了最优的锻前温度为 520 °C、最优的时效处理温度为 175 °C, 在该工艺参数组合下 6082-A 铝合金球头挂环的晶粒尺寸较小且分布均匀, 力学性能达到最佳, 其中, 拉断力达到了

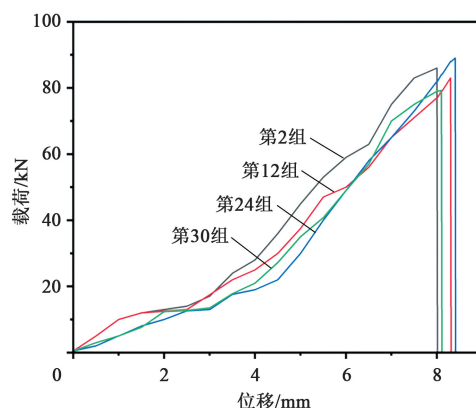


图 13 部分球头挂环的载荷-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of partial ball head hanging rings

89 kN, 抗拉强度超过了 410 MPa, 这使铝合金金具的应用场景得到了极大地拓展。

为进一步验证所研发的高强度 6082-A 铝合金球头挂环的性能, 依据 GB/T 2317.1—2008^[16] 进行破坏载荷测试。经过试验验证, 该高强度铝合金球头挂环的标称破坏载荷相比于同规格的铸铁金具提升了 10%, 且其他项目也均符合 GB/T 2317.4—2023^[17] 的要求。

3 结论

(1) 通过颗粒增强方法得到的 6082-A 铝合金球头挂环的抗拉强度可达到 410 MPa 以上, 标称破坏载荷相比于同规格的铁质金具提高了 10%, 可实现“以铝代铁”的目标, 在降低金具全生命周期损耗的同时提高了挂环强度。

(2) 6082-A 铝合金球头挂环更适合进行高温锻造, 当锻前温度为 520 °C 时, 其抗拉强度和拉断力均达到了最大值。

(3) 当时效处理温度为 175 °C 时, 经热处理后的 6082-A 铝合金球头挂环性能达到最佳, 该温度下铝合金中的固溶元素可迅速析出形成强化相, 并避免了因温度过高可能导致的晶粒长大和晶界消溶。

(4) 当锻前温度为 520 °C、T6 处理为固溶 535 °C/1 h+时效 175 °C/8 h 时, 6082-A 铝合金球头挂环的拉断力达到了 89 kN, 抗拉强度超过了 410 MPa, 相比于 6082 铝合金球头挂环的抗拉强度提高了 22.5%, 使得铝合金金具的应用场景得到了极大的拓展。

参考文献:

- [1] 林双平, 钟振前, 司红, 等. 40 钢球头挂环的断裂失效分析 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (22): 256-260.
Lin S P, Zhong Z Q, Si H, et al. Fracture failure analysis of 40 steel ball head hanging ring [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (22): 256-260.
- [2] 刘小会, 周晓慧, 叶中飞, 等. 风荷载作用下输电线路数值模拟及金具失效分析 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (20): 8210-8217.
Liu X H, Zhou X H, Ye Z F, et al. Numerical simulation of transmission line and failure of fittings under wind load [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20 (20): 8210-8217.
- [3] Dareini M, Jabbari A H, Sedighi M. Effect of nano-sized Al_2O_3 reinforcing particles on uniaxial and high cycle fatigue behaviors of hot-forged AZ31B magnesium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30 (5): 1249-1266.
- [4] 任昊, 李天鹏, 张晓峰, 等. 氮掺杂纳米碳包覆 MnO 复合材料的制备与电化学性能 [J]. 机械工程材料, 2023, 47 (6): 53-60.
Ren H, Li T P, Zhang X F, et al. Preparation and electrochemical performance of nitrogen-doped nanocarbon coated MnO composites [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2023, 47 (6): 53-60.
- [5] 刘骏华, 张娟, 张晨, 等. 颗粒增强金属基复合材料细观有限元建模方法的对比 [J]. 机械工程材料, 2022, 46 (4): 82-88.
Liu J H, Zhang J, Zhang C, et al. Comparison of meso finite element modeling methods for particle reinforced metal matrix composites [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022, 46 (4): 82-88.
- [6] Dai P, Luo X, Yang Y Q, et al. High temperature tensile properties, fracture behaviors and nanoscale precipitate variation of an Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2020, 30 (1): 63-73.
- [7] 李安敏, 王晖, 郭长青, 等. 7xxx 系铝合金应力腐蚀的控制 [J]. 材料导报, 2015, 29 (17): 84-88.
Li A M, Wang H, Guo C Q, et al. Control on stress corrosion of 7xxx aluminum alloys [J]. Materials Reports, 2015, 29 (17): 84-88.
- [8] 庞锴, 卢明, 田瑞, 等. 动态风荷载下交叉跨越线路连接金具受力特性 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (19): 7798-7803.
Pang K, Lu M, Tian R, et al. Analysis of force characteristics of typical connecting metals of cross-over lines [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20 (19): 7798-7803.
- [9] 郝志飞, 刘志伟, 解佩佩, 等. TiB_2 颗粒增强 6061 铝合金的组织及力学性能 [J]. 热加工工艺, 2024, 53 (5): 136-141.
Hao Z F, Liu Z W, Xie P P, et al. Microstructure and mechanical properties of TiB_2 particles reinforced 6061 aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2024, 53 (5): 136-141.
- [10] 刘敬福, 贾婧, 庄伟彬, 等. 原位合成 TiB_2 颗粒增强铝基复合材料研究进展 [J]. 功能材料, 2024, 55 (2): 2063-2073.
Liu J F, Jia J, Zhuang W B, et al. Progress in in-situ synthesis of TiB_2 particle reinforced aluminum matrix composites [J]. Journal of Functional Materials, 2024, 55 (2): 2063-2073.
- [11] 张浩, 王国文, 曾凡宜, 等. 基于 BP 神经网络的 6082 铝合金固溶时效处理后的晶粒尺寸预测 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (3): 227-235.
Zhang H, Wang G W, Zeng F Y, et al. Grain size prediction of 6082 aluminum alloy after solution and aging treatment based on BP neural network [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (3): 227-235.
- [12] GB/T 16545—2015, 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除 [S].
GB/T 16545—2015, Corrosion of metals and alloys—Removal of corrosion products from corrosion test specimens [S].
- [13] 韩啸, 陈飞, 崔振山. 含孔隙 7055 铝合金材料包套锻造工艺与材料改性研究 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (11): 85-94.
Han X, Chen F, Cui Z S, et al. Research on canned forging process and material modification of 7055 aluminum alloy with voids [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (11): 85-94.
- [14] 叶拓, 邱飒蔚, 刘杰, 等. 挤压态 6082-T6 铝合金的高温拉伸力学性能及微观组织 [J]. 材料热处理学报, 2024, 45 (3): 113-120.
Ye T, Qiu S W, Liu J, et al. High temperature tensile mechanical properties and microstructure of extruded 6082-T6 aluminum alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45 (3): 113-120.
- [15] 中国南方电网有限责任公司. 中国南方电网公司输变电工程标准设计 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
China Southern Power Grid Company Limited. China Southern Power Grid Corporation Standard Design for Power Transmission and Substation Projects [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [16] GB/T 2317.1—2008, 电力金具试验方法 第 1 部分: 机械试验 [S].
GB/T 2317.1—2008, Test method for electric power fittings—Part 1: Mechanical tests [S].
- [17] GB/T 2317.4—2023, 电力金具试验方法 第 4 部分: 验收规则 [S].
GB/T 2317.4—2023, Test method for electric power fittings—Part 4: Acceptance inspection [S].