DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.01.005

基于 ZG30CrMo 后处理的轻型化金具研究

牛海军,刘胜春,司佳钧
(中国电力科学研究院有限公司 输变电工程研究所,北京 102401)

摘　要:为了减轻金具质量,提升金具的安全裕度,开展了高强材料金具的研制工作。结果表明,在借鉴我国 ±800 kV 直流和 1 000 kV 交流工程连接金具设计、制造、建设及运行经验基础上,结合输电线路连接金具的特点,通过材料遴选、三维建模、力学性能、热处理仿真及锻造成型仿真分析、力学性能试验研究,成功研制了基于 ZG30CrMo 材料经过热处理和锻造仿真的轻型化金具,金具可减重 12%,技术经济效益显著。

关键词:ZG30CrMo;金具;锻造;三维建模;试验验证

中图分类号: TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)01-0016-06

Research on Lightweight Fittings Based on ZG30CrMo Post-treatment

NIU Haijun, LIU Shengchun, SI Jiajun
(China Electric Power Research Institute Transmission and Transformation Engineering Research, Beijing 102401, China)

Abstract: In order to reduce the weight of fittings and improve the safety margin of fittings, the research and development of high-strength material fittings is carried out. Based on the design, manufacture, construction and operation experience of ±800 kV DC and 1 000 kV AC line project connecting fittings in China, and the characteristics of transmission line connecting fittings, the research on material selection, three-dimensional modeling, mechanical properties, heat treatment process, forging simulation analysis and mechanical property were carried out. As a result, the lightweight fittings based on ZG30CrMo material after heat treatment and forging process have been successfully developed. The weight of fittings can be reduced by 12%, and the technical and economic benefits are remarkable.

Key words: ZG30CrMo; fittings; forging; 3D modeling; experimental verification

在国际大电网委员会 2012 年年会上,国家电网公司提出采用先进的特高压交流和直流输电技术构建洲际输电大通道的战略构想[1-3]。通过建立洲际电力市场,推动全球能源资源优化配置。近年来,国家电网公司先后完成了多条特高压交直流工程建设,使我国架空输电线路金具研制技术获得巨大进步,标志着我国特高压输电线路金具研制水平提升到了一个新的高度。

金具是输电线路工程的重要组成部分，数量多、种类杂,其性能关系工程的质量和长期稳定运行。然而随着特高压工程的建设,许多工程途经极端环境地区,如锡盟–胜利、扎鲁特–青州等特高压线路部分线路途经高山大岭、气候寒冷等地区,这给线路金具施工及运行维护带来极大困难和挑战。

通过开展高强金具用材料及高强金具研究,可为特高压输电线路金具的设计制造与应用提供切实可靠的试验数据支持，确保特高压电网的安全稳定运行。30CrMo 钢金具材料[4]属于合金调质钢,具有较高的强度和韧度，冷变形时塑性中等，淬透性较高,切削加工性能和焊接性能良好,多在调质状态下使用,但铸件存在组织粗大、缺陷多及第一类回火脆性,有形成白点的不足。对形状复杂及强度要求高的金具,可采用铸造方法获得 ZG30CrMo 铸件,再通过锻造来改善组织和铸造缺陷。

本文作者在借鉴我国±800 kV 直流和 1 000 kV 交流工程连接金具设计、制造、建设及运行经验基础上,结合输电线路连接金具的特点,通过材料遴选、三维建模、力学性能仿真、热处理工艺仿真及锻造成型仿真分析、力学性能试验研究,以研制出力学性能满足现行标准要求、满足输电线路工程使用要求的高强轻型化金具。

1　材料遴选

1.1　材料力学性能

前期遴选出 30CrMo 高强钢作为候选材料。通过铸造获得 ZG30CrMo 毛坯,再经过锻造得到金具

收稿日期: 2020-07-18

作者简介: 牛海军(1975-),黑龙江海伦人,硕士,高级工程师.主要从事输电线路导线和金具相关技术方面的工作.
电话:010-58387124,E-mail:13521517742@126.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

试样。采用常规方法测试试样的室温力学性能,如表 1 所示。

表1 30CrMo钢的室温力学性能
Tab.1 Mechanical properties of 30CrMo steel at room temperature

屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后伸长率(%)	冲击吸收功 /J
≥785	≥930	≥12	≥63

1.2　材料低温性能

根据输电线路的运行环境要求,制定了高强金具材料冲击性能试验方案,试验温度点包括 -30、-35、-40、-45、-50、-55 ℃共 6 个点。30CrMo 钢低温冲击试验结果见图 1。

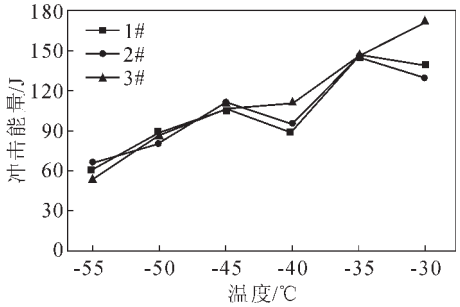


图 1　30CrMo 钢的低温冲击试验曲线
Fig.1　Low temperature impact test curve of 30CrMo steel

从低温冲击试验结果可以看到,30CrMo 高强钢候选材料的低温冲击吸收功高,表明遴选的材料在低温下具有良好的冲击韧性。

2　力学性能仿真

2.1　建模

碗头是连接金具中最具代表性的产品,其结构复杂,工艺要求高。为进一步验证 30CrMo 钢制造金具的性能,以 420 kN 碗头挂板为例,结合现有的金具设计参数要求[6-8],进行力学仿真分析。为了有效模拟试验中碗头挂板的实际拉伸情况,采用球头挂板约束碗头挂板的碗头端，另一侧施加载荷的方式模拟。碗头挂板的拉伸弹塑性仿真有限元模型包括碗头挂板和球头挂板两个部分,球头挂板主要起约束和固定作用。模型整体采用实体网格,为方便起见,将球头槽型连接部分简化为整体,如图 2 所示。

2.2　性能仿真

ZG30CrMo 碗头挂板经过锻造后，其塑性应力应变拟合曲线如图 3 所示。

碗头挂板与球头挂板之间为曲面接触。在拉伸过程中，碗头挂板与球头挂板之间的相对滑移非常小,接触类型设置为绑定接触。施加载荷位置位于碗头挂板的螺栓孔处，球头挂板上部螺栓孔为固定约束,如图 4 所示。以载荷随时间缓慢增加的方式,模拟随着载荷的增大碗头挂板从弹性变形到塑性变形。

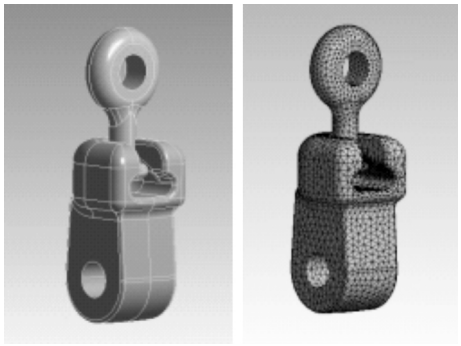


图 2　碗头挂板力学分析几何模型
Fig.2　Geometric model for mechanical analysis of bowl end hanging plate

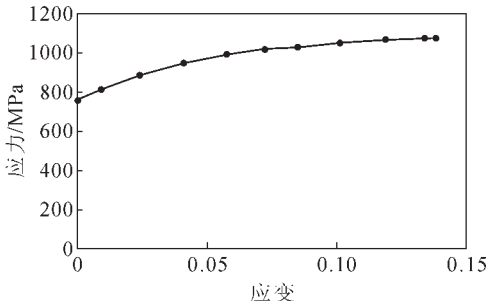


图 3　30CrMo 钢的塑性应力应变拟合曲线
Fig.3　Fitting curve of plastic stress and strain of 30CrMo steel

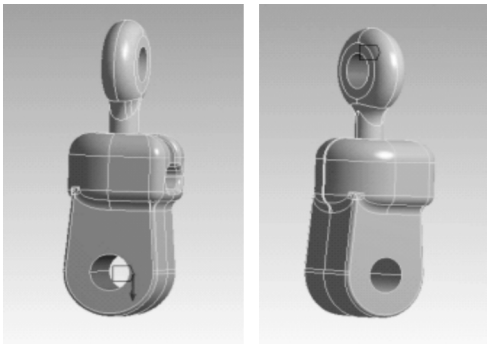


图 4　载荷位置示意图
Fig.4　Schematic diagram of load applied position

在拉力达到 504 kN 时,碗头挂板的等效应力如图 5 所示。最大等效应力为 559.7 MPa,超过屈服极限,已发生塑性变形。

碗头挂板的塑性变形区域如图 6 所示，紫色区域为塑性变形区域。

从图 6 看出，碗头挂板的内侧已经部分发生塑性变形;载荷持续增加,此处首先发生断裂。加载到 504 kN 载荷后,碗头挂板的变形如图 7 所示。

可见,碗头挂板的下端变形最大,这与实际试验情况相符,最大变形量为 1.1 mm。经拟合得到载荷–位移曲线如图 8 所示。可以看出，在拉力载荷 420 kN 左右,碗头挂板达到屈服极限,发生塑性变形。在载荷达到 504 kN 时,碗头挂板仍然没有达到抗拉极限，但是塑性变形区域已经贯穿碗头挂板中

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

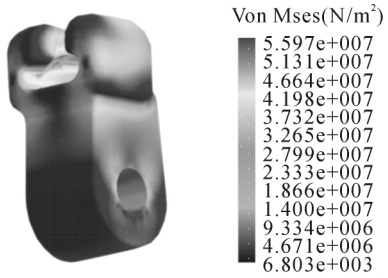


图 5 拉力 504 kN 碗头挂板应力分布

Fig.5 Stress distribution of hanging plate at bowl head with 504 kN tension

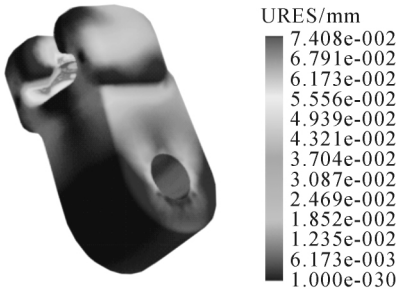


图 6 塑性变形区域

Fig.6 Plastic deformation area

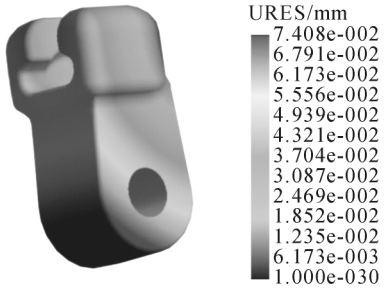


图 7 碗头挂板变形分布图

Fig.7 Deformation distribution of bowl end hanging plate

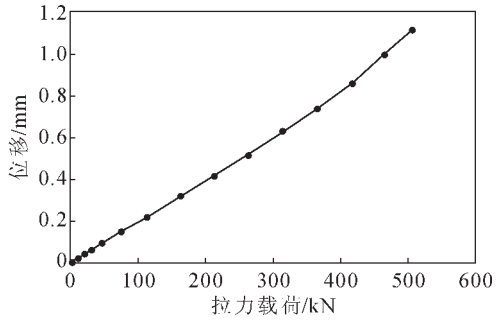


图 8 碗头挂板位移–载荷曲线

Fig.8 Displacement-Load curve of the bowl-head hanging plate

部区域。

3 热处理仿真

3.1 有限元模型

针对碗头挂板和球头挂板分别按照实际生产中热处理工艺利用仿真程序进行有限元模拟分析。图 9 为有限元分析采用的几何模型。

3.2 热处理参数

热处理过程及时间安排如表 2 所示，热处理参数设置如表 3 所示，油冷参数如表 4 所示。

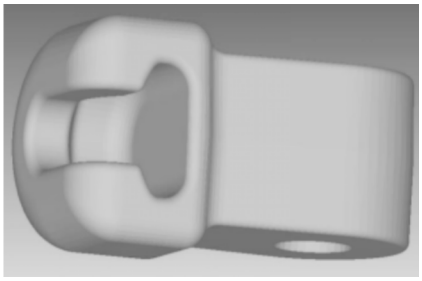


图 9 碗头挂板几何模型

Fig.9 Geometric model of bowl end hanging plate

表2 热处理过程及时间安排

Tab. 2 Heat treatment process and schedule

热处理过程	预热	加热	空冷	预热	加热	油冷	风冷	加热	空冷
时间 /h	1.0	2.0	1.0	1.5	2.0	0.4	0.8	1.0	0.8
对应温度 /℃	650	880	20	700	860	100	20	620	20

表3 热处理参数设置

Tab.3 Setting of heat treatment parameters

热处理过程	加热	风冷	空冷
对应热交换参数	0.1	0.8	0.5

表 4 油冷参数

Tab.4 Setting of oil cooling parameters

温度 / ℃	100	300	500	700	800	900	1 000
换热系数	3.5	6.3	9.0	16.5	10.5	6.6	4.2

针对两个零件热处理过程分别进行分析，通过研究温度场、应力场、组织转变[9]，来展示零部件在热处理过程中的性能转变以及热处理工艺对它们的影响，从而更好地指导实际生产。

3.3 热处理模拟结果

针对碗头热处理过程进行分析。下面主要从温度场、应力场来展示零件在热处理过程中的性能转变以及热处理工艺对它们的影响，从而更好的指导实际生产。

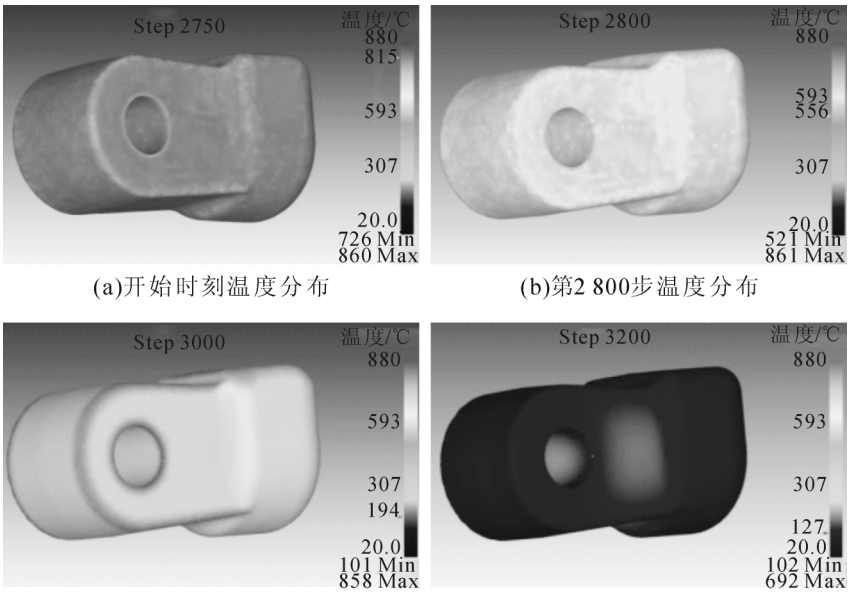
3.3.1 温度场

在碗头挂板的热处理过程中，淬火时温度降低速度极快，此时零件表面与内部冷却速度不一致。这里主要将碗头挂板淬冷时的温度场进行分析，结果见图 10。其它升温降温阶段相对速度较慢，造成的应力比较小。

3.3.2 应力场

碗头挂板淬冷时的应力分布云图如图 11 所示。通过碗头挂板在热处理淬火阶段应力的分布可知，碗头挂板应力变化比较剧烈，而且应力分布比较大的区域多处于连接处。图 11(b)为热处理结束阶段云图，应力分布较大区域在前面挂板中心区域。因此在淬冷过程中要尽可能的使零件冷却均匀，提前做好防护，以免产生淬裂。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)开始时刻温度分布　(b)第2 800步温度分布

(c)第3 000步温度分布　(d)第3 200步温度分布

图 10 碗头挂板淬火降温系列图

Fig.10 Quenching and cooling series diagram of bowl head hanging plate

4 锻造成型仿真

对碗头挂板的锻造热成形重点研究模锻工艺设计、模具质量和模锻的工艺流程之间的关系。通过对 ZG30CrMo 锻件碗头挂板的锻造过程仿真分析,确定锻造工艺对材料的成型和性能的影响因素。

4.1 模型建立

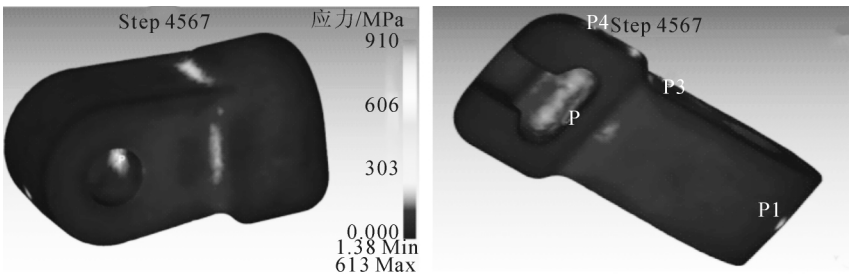
碗头挂板的热成形重点就是模锻工艺的设计,模具的质量和模锻的工艺流程直接关系到成形后的质量。通过对 30CrMo 材料的 WS-42110 碗头挂板的锻造过程进行仿真分析,以确定材料对锻造过程的影响[10-12]。

根据碗头挂板结构设计的半模模具如图 12 所示,胚料形状如图 13 所示。由于碗头挂板本身是对称结构,模具由相同的上、下模构成。

建立用于锻造仿真的有限元模型,其设置参数如下:

(1)模拟方案:一次成型,研究分析模具的磨损和胚料成形情况。

(2)模拟温度:胚料温度为 1 050 ℃,模具温度为 350 ℃。



(a)应力云图一　(b)应力云图二

图 11 应力分布云图

Fig.11 Stress distribution nephogram

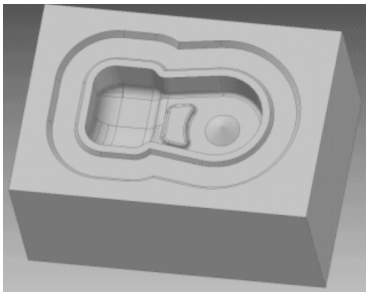


图 12 碗头挂板半模

Fig.12 Schematic diagram of bowl head hanging plate half die

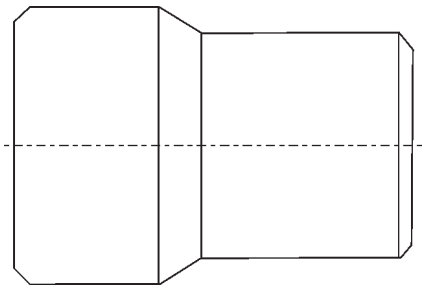


图 13 胚料形状

Fig.13 Schematic diagram of blank shape

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(3)上、下模材料:AISI-H-13 钢。

(4)模具硬度:HRC50。

(5)运动关系:上模为主动模,运动速度为750 mm/s,方向沿轴向向下。

(6)摩擦系数:采用剪切摩擦类型,摩擦系数为0.3。

(7)热交换系数:11。

其中,胚料的摆放位置如图 14 所示。

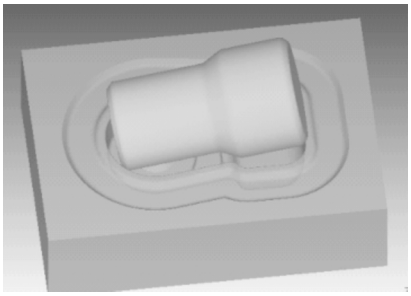


图 14 胚料摆放状态

Fig.14 Placement state of blank

4.2 仿真结果及分析

铸坯的锻造成形过程如图 15 所示,由于模具型腔较深,刚接触时,胚料被初步压入型腔,如图 15(a)所示。然后从胚料后端顶部与成形上模相接触的部分开始变处,如图 15(b)所示,变形较大的区域为胚料直径较大些,变形类型主要为挤压变形。如图 15(c)所示,随着模具不断下压,胚料充满成形上模的后部轮廓,变形逐渐向胚料小段和边缘处扩展,金属开始填充碗头挂板的小头端。如图 15(d)所示,变形结束时,模具型腔已经基本全部充满。

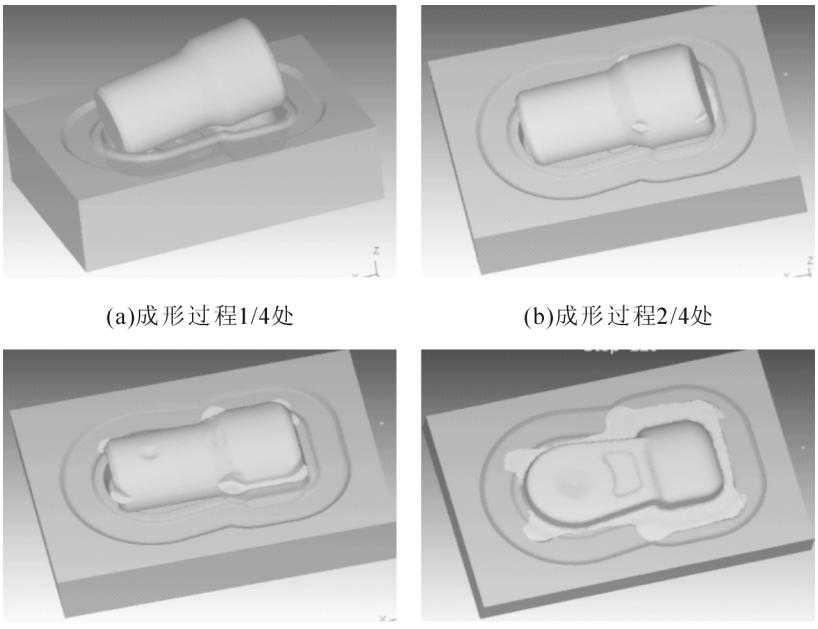
在成形过程中,金属发生了大位移变形。采用粒子跟踪的方法研究金属的流动规律和迁移轨迹,分析变形过程中碗头挂板模具的填充情况。ZG30CrMo 金属流动情况如图 16 所示。金属由上向下移动,当接触到模具型腔时,沿型腔向外流动。在成形终止前,仍然有部分下端金属流动的方向仍然直接向外,并没有沿模具壁面流动,说明此处产生充型不满的情况。

ZG30CrMo 钢胚料的最大流动速度为 5520mm/s,理论上 ZG30CrMo 的流动性稍差些。图 17 所示 ZG30CrMo 的流动速度为 2950 mm/s,这与理论符合。

锻件中的残余应力分布不合理会导致锻件在锻造及后续的加工过程中出现加工变形、裂纹等缺陷,图 18 为碗头挂板成形过程中的残余应力分布情况。ZG30CrMo 锻造后最大应力为 286 MPa,没有残余应力极大的区域,对后续的加工不会造成严重影响。

由上述锻造仿真结果可知,30CrM 钢在锻造成形结束时刻,模具内部仍有充型不满的位置存在,可能导致产品缺料、折叠等缺陷。需要对下料尺寸进行优化,可以考虑将胚料的尺寸增大,增加挂环端胚料的长度和直径,以避免生产过程中的质量问题。

另外根据经验,在成形过程中模具的磨损位置主要集中在模具型腔边缘处,可以考虑对模具进行修改,在不影响产品外部尺寸的基础上,增大模具边缘处圆角,这样既能减少模具的磨损量又可以改善金属的流动性。



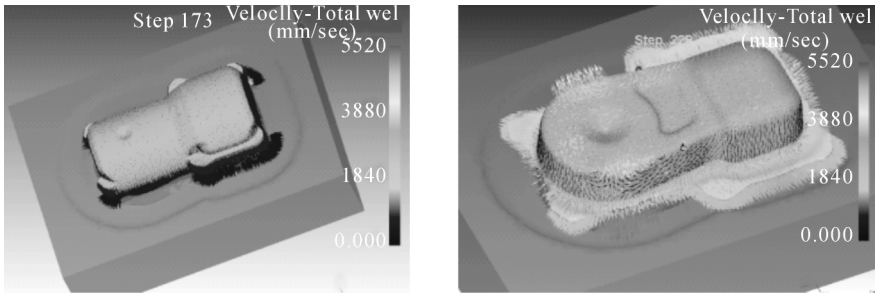
(a)成形过程1/4处　(b)成形过程2/4处

(c)成形过程3/4处　(d)成形终止时刻

图 15 成形过程

Fig.15 Schematic diagram of forming process

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)成形过程中金属流动情况　　(b)成形结束金属流动情况

图 16 ZG30CrMo 金属流动规律

Fig.16 Metal flow law of ZG30CrMo

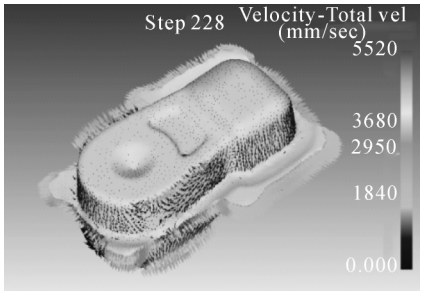


图 17 ZG30CrMo 坯料金属流速

Fig.17 Metal flow rate of ZG30CrMo blank

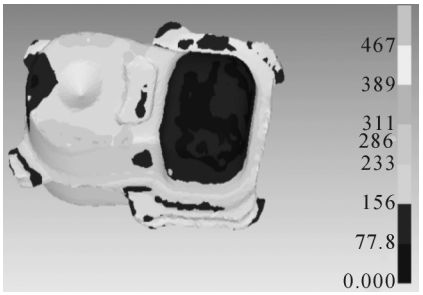


图 18 最终时刻残余应力分布

Fig.18 Residual stress distribution at the final moment

5 验证性试验

基于 30CrMo 钢及连接金具设计、工艺控制、连接尺寸要求，完成了典型连接金具的系列化设计、试制及试验。30CrMo 材料轻型化碗头挂板、U 型环如图 19 所示。

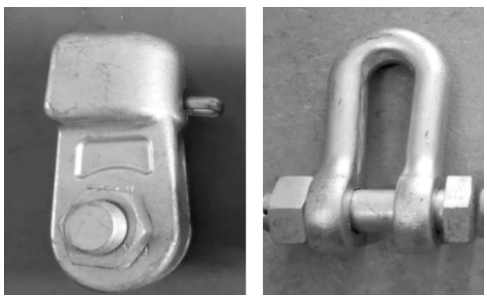


图 19 30CrMo 材料轻型化金具

Fig.19 Schematic diagram of 30CrMo steel light type metal fittings

根据标准电力金具通用技术条件[13]和电力金具试验方法[14]，对试制的典型连接金具开展力学性能试验即破坏载荷试验。轻型化金具破坏载荷均大于标称破坏载荷的 1.2 倍，满足工程实际需求。

6 结束语

采用有限元仿真方法完成了基于 30CrMo 钢的碗头的力学计算和加工过程模拟，试制出碗头并通过了破坏载荷试验。与传统材料金具相比，30CrMo 高强钢金具可降低重量 12%以上，减少了金具制造、运输及施工成本。且 30CrMo 钢金具相较于传统材料在屈服强度和抗拉强度等级上有显著提升，提高了金具安全裕度，提升了线路的可靠性，对建设资源节约型电网具有重要意义。

参考文献：

[1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京：中国经济出版社，2005.

[2] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑 (2008)[M]. 北京：中国经济出版社，2005.

[3] 刘振亚. 特高压电网(工程)前期论证[M]. 北京：中国电力出版社，2008.

[4] GB/T 3077—2015 合金结构钢[S].

[5] GB/T 700—2006 碳素结构钢[S].

[6] 董吉谔. 电力金具手册 [M]. 第 3 版. 北京： 中国电力出版社，2010.

[7] 张殿生. 电力工程高压送电线路手册[M]. 北京：中国电力出版社，2004.

[8] 程应镗. 送电线路金具的设计安装试验和应用[M]. 北京：水利电力出版社，1989.

[9] 张宝昌. 有色金属及其热处理[M]. 西安：西北工业大学出版社，1993.

[10] 伍太宾，彭树杰. 锻造成形工艺与模具[M]. 北京：北京大学出版社，2017.

[11] 陈炎嗣. 冲压模具设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.

[12] 贾俐俐. 冲压工艺与模具设计[M]. 北京：人民邮电出版社，2008.

[13] GB/T 2314—2008 电力金具通用技术条件[S].

[14] GB/T 2314.1-2008《电力金具试验方法 第 1 部分：机械试验》[S].

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net