

Research on Cold Extrusion Technology of Ultra-high Strength Steel Hole Wall

Jianqi Wang Shengrui Zhang

AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710089, China

Abstract

The new material 23Co14Ni12Cr3MoE ultra-high strength steel (A-100 steel) is applied in the development of a certain type of aircraft., the hardness of the material is high, and the hardness of the parts after heat treatment reaches 60HRC, which is close to that of the general high speed steel cutting tool. The technology of drilling and cold extrusion on the parts of this material is first applied in China in the aircraft assembly stage. At present, the hole cold extrusion strengthening technology of ultra-high strength steel is only mastered by one American company, which has formed a technical monopoly. The tools are expensive and the delivery time can not meet the requirements of model development. In view of this situation, this paper starts with the cold extrusion test of new material hole, especially for the problems of difficult control of cold extrusion parameters in the process of hole making and cold extrusion, and optimizes the parameters through the steps of test scheme formulation, test process and data accumulation optimization, result stress analysis and so on., it is very important to improve the fatigue strength of products and break the technical barriers.

Keywords

cold extrusion; ultra-high strength steel; fatigue strength

超高强度钢孔壁冷挤压技术研究

王建旗 张盛锐

中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 中国·陕西 西安 710089

摘要

在某型机研制过程中应用新材料 23Co14Ni12Cr3MoE 超高强度钢(A-100 钢), 其材料硬度高, 零件热处理硬度达到 60HRC, 与通用高速钢加工刀具的硬度接近, 在飞机装配阶段在该材料的零件上进行制孔和冷挤压的工艺均为中国首次应用。超高强度钢的孔冷挤压强化技术目前只有美国一家公司掌握, 并形成了技术垄断, 工具价格昂贵且交货周期根本不能满足型号研制的要求。针对这一现状, 论文从新材料孔的冷挤压试验入手, 特别是针对制孔和冷挤压过程中冷挤压参数难控制等问题, 通过试验方案制定、试验过程及数据累积优化、结果应力分析等步骤进行了参数优化。建立了超高强度钢的冷挤压强化工艺应用参数规范、选型规范等, 对提高产品疲劳强度及打破技术壁垒具有重要意义。

关键词

冷挤压; 超高强度钢; 疲劳强度

1 引言

近年来随着中国飞机新型号研制任务的增加, 对一些特殊功能部位, 局部疲劳性能要求越来越高, 开始在关键对接部位使用超高强度钢, 该材料屈服强度大于 700MPa 的细晶粒高强钢, 抗拉强度在 1200MPa 以上^[1], 与普通结晶钢相比, 超高强度钢具有相当高的强度 ($R_m \geq 1500\text{MPa}$) 和一定的韧性, 被广泛用于航空航天领域^[1,2]。该材料在航空制造业主要用于关键的飞机承力部件, 某飞机研制中因

23Co14Ni12Cr3MoE 钢(A-100 钢)具有良好的机械性能且能满足高载荷高刚性区域的设计性能, 被首次在部件对接区域作为结构零件进行装配, 由于该材料硬度高、孔径尺寸大、制孔工艺复杂等特性, 中国对该材料开缝衬套冷挤压参数尚未开展过系统应用研究, 为了满足飞机研制需求, 论文借鉴其他型号多种材料冷挤压成功经验参数, 制定了科学的试验方案并进行试验验证, 突破其他国家对超高强度钢开缝衬套冷挤压技术壁垒, 形成自主的、成熟的超高强度钢装配制孔冷挤压强化技术体系。

2 冷挤压技术简介

孔冷挤压是强化技术的一种, 是指在室温下利用比被材

【作者简介】王建旗(1970-), 男, 中国陕西富平人, 高级工程师, 从事飞机装配研究。

料硬度高的挤压工具，在孔壁和芯棒之间增加一个开缝的衬套，用芯棒挤压衬套，通过衬套挤压孔壁对孔壁、孔角、埋头窝及孔周端面等表面施加压力，使被挤压部位表面层金属发生塑性变形，在强化过程时在孔周围产生了一定的弹塑性变形和引入了残余压应力，导致位错组态发生了变化和密度增加，同时表面粗糙度也达到可改善。使用该工艺方法可以改善飞机结构中孔的疲劳性能，显著增强飞机疲劳寿命。因此，开展超高强度钢装配阶段开缝衬套冷挤压强化工艺研究，已是型号大部件疲劳寿命研究的关键工艺技术之一^[3]。

冷挤压示意图见图1。

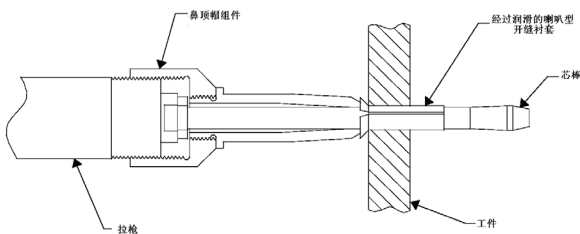


图1 冷挤压示意图

在某飞机机翼对接处使用该材料，在飞机起落过程中，该部位承受较大的交变载荷，影响最严重的就是零件上承受交变载荷的螺栓连接孔，提高连接孔的疲劳抗力是有效防止飞机对接部位这种关键承力结构件失效的直接途径^[4]。

目前，中国已成熟应用不超过1380MPa的材料开缝衬套孔挤压强化研究并形成相应工艺规范，而某飞机采用的超高强度钢的开缝衬套强化技术只有美国疲劳技术公司（FTI）进行了系统研究并掌握，形成技术垄断，中国对该材料的装配阶段的开缝衬套冷挤压强化工艺参数及应用尚属空白。

3 试验过程及数据优化

3.1 试验方案规划

试验方案借鉴成熟机型的开缝衬套冷挤压经验，针对超高强度钢的冷挤压参数未知问题，开展终孔为Φ8mm~Φ18mm的一系列孔开缝衬套冷挤压工艺试验，摸索并掌握超高强度钢开缝衬套冷挤压工艺参数，得出可用于某型架研制上孔挤压强化的工艺流程和技术参数。

试验试板为双真空冶炼的23Co14Ni12Cr3MoE钢，其化学成分为（质量分数）：0.23%C、14%Co、12%Ni、3.1%Cr、1.13%Mo、0.001%S、0.002%P，杂质元素Mn、Al、Ti含量均小于0.05%，其余为Fe。材料热处理制度为：机加前进行正火（900℃×1h空冷）和高温回火（680℃×8h空冷）处理；最

终热处理为淬火（885℃×1h油冷）+冷处理（-73℃×1h空气回温）+二次回火（482℃×2h空冷+482℃×3h空冷）^[5]。

23Co14Ni12Cr3MoE钢的拉伸性能见表1。

表1 23Co14Ni12Cr3MoE钢的拉伸性能

拉伸强度 σ _b /MPa	屈服强度 σ _{0.2} /MPa	伸长率 σ ₅ /%	断面收缩率 ψ/%
1970	1650	15	69.5

为了减少试验成本，针对每种孔径设置6个不同初孔开展孔强化试验，摸索孔挤压参数见表2。论文选取典型终孔φ11.99mm~12.02mm为介绍对象阐述试验过程。

表2 φ12孔冷挤压试验参数

序号	孔编号	孔径 mm	挤压工具
1	12-1	φ11.33~11.41	开缝衬套 CBS-14-1-N-32F (6个) 组合量规 CBG-14-1-N-1 (1个) 芯棒 2inch CBM-14-1-N-1-40-V2 (2个) 芯棒量规 CBMG-14-1-N (1个) 鼻顶帽 MEN-14B-1401F (1个)
2	12-2	φ11.43~11.51	
3	12-3	φ11.53~11.61	
4	12-4	φ11.63~11.71	
5	12-5	φ11.73~11.81	
6	12-6	φ11.83~11.91	

开缝衬套冷挤压试板的形状及尺寸如图2所示，试板的厚度为8mm，为了得到最佳的冷前孔尺寸，针对性的选择比终孔小0.8mm~0.2mm的孔径作为冷挤压前孔径，并逐项进行记录。试验依据XPS12029文件选择合适的开缝衬套冷挤压工具，对不同的冷挤压前孔径进行冷挤压试验。

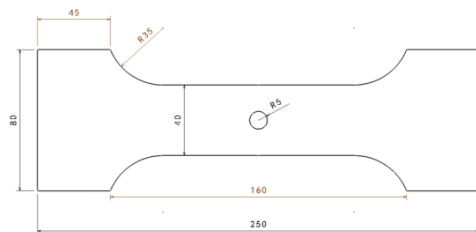


图2 试板尺寸

3.2 试验强化方案

试验流程如图3所示，开缝衬套冷挤压工艺过程如图4所示。

4 结果分析

试验后对不同参数的冷挤压过程进行技术分析，计算出塑变量并对残余应力进行检测，选择最佳的冷挤压应用参数。

冷挤压后孔壁上存在微小的凸痕外形（试验表明超高强度钢凸痕明显小于铝合金凸痕），如图5所示。因凸痕根部

容易产生微裂纹,可能还存在参与拉应力,这对孔强化极为不利,在后续的铰孔工序中需把这个凸痕较掉^[6]。

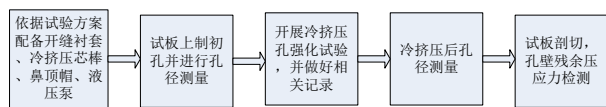


图 3 试验流程图

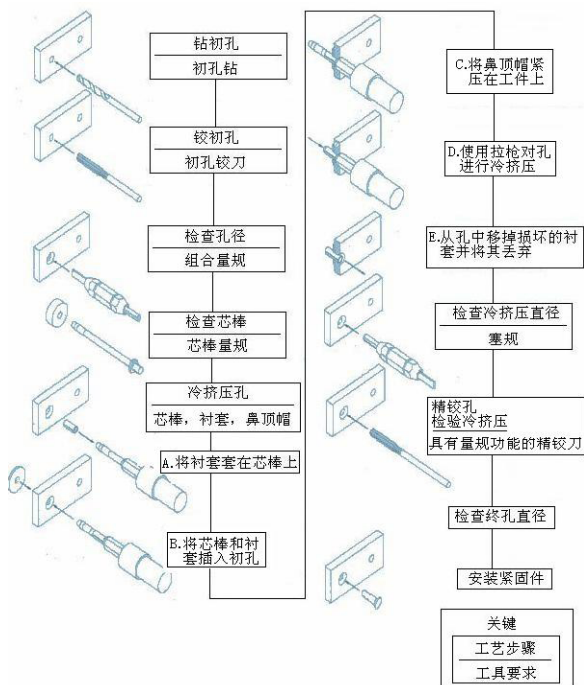


图 4 开缝衬套冷挤压工艺过程示意图

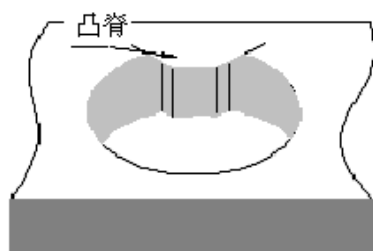


图 5 凸脊示意图

采用 X 光衍射法检测孔的强化效果,图 6 是开缝衬套冷挤压后峰残余应力分布图,从图 6 所知,当单边切削量达到 0.18D 时,峰值值接近材料的压缩屈服强度,而残余拉应力因挤压后表层材料在残余压应力作用下产生反向屈服,所以残余压应力峰值出现在孔壁次表层,孔的强化效果达到最优。

仍以典型孔径 $\phi 12\text{mm}$ 初孔冷挤压后的试板进行残余应力检测,开缝衬套冷挤压强化使样板在孔周围产生了一定的残余压应力,残余应力检测设备见图 7,残余应力值见表 3。经过应力检测分析得出该孔径最佳冷前孔径为 $\phi 11.466\text{mm}$,

冷挤压后孔径为 $\phi 11.62\text{mm}$ 。不同初孔孔径应力分布见图 8。

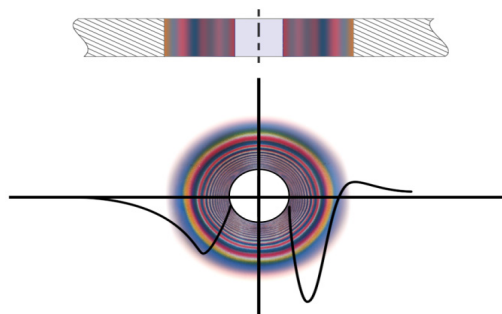


图 6 X 光衍射法检测孔冷挤压后孔径向 / 周向残余应力分布图



图 7 应力检测设备

表 3 应力检测值 /MPa

孔	孔壁上侧	孔壁中间	孔壁下侧
12-1	-451	-342	-416
12-2	-317	-113	-284
12-3	-482	-518	-521
12-4	-492	-595	-535
12-5	-528	-628	-568
12-6	-598	-715	-655

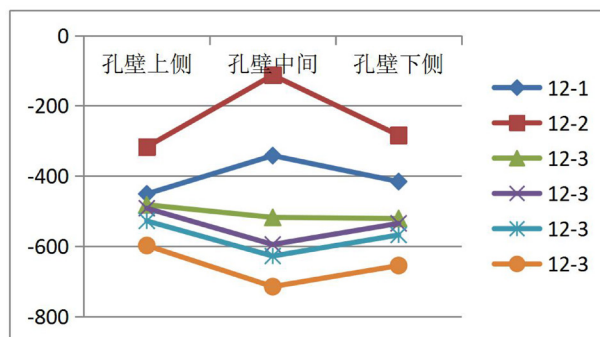


图 8 不同初孔孔径应力分布

试验后经过系统分析得出最佳冷挤压参数结果如表 4 所示。

5 结论

论文通过对 A-100 钢的试验方案规划、试验验证、数据分析结果,得出以下结论:

表4 不同孔径最优冷挤压前后参数对比

φ8 终孔							
挤压前		挤压后		孔均值	挤压后均值	挤压量	塑变量
上	7.577	上	7.705	7.577	7.708	0.131	0.0655
中	7.576	中	7.706				
下	7.577	下	7.712				
φ10 终孔							
挤压前		挤压后		孔均值	挤压后均值	挤压量	冷挤压率
上	9.601	上	9.721	9.602	9.728	0.126	0.063
中	9.602	中	9.723				
下	9.603	下	9.740				
φ12 终孔							
挤压前		挤压后		孔均值	挤压后均值	挤压量	冷挤压率
上	11.468	上	11.61	11.466	11.62	0.154	0.077
中	11.465	中	11.62				
下	11.464	下	11.63				
φ14 终孔							
挤压前		挤压后		孔均值	挤压后均值	挤压量	冷挤压率
上	13.276	上	13.429	13.276	13.431	0.155	0.0775
中	13.276	中	13.431				
下	13.277	下	13.432				
φ16 终孔							
挤压前		挤压后		孔均值	挤压后均值	挤压量	冷挤压率
上	15.191	上	15.426	15.191	15.365	0.174	0.087
中	15.190	中	15.415				
下	15.191	下	15.417				
φ18 终孔							
挤压前		挤压后		孔均值	挤压后均值	挤压量	冷挤压率
上	17.123	上	17.277	17.123	17.281	0.158	0.079
中	17.123	中	17.281				
下	17.122	下	17.285				

①开缝衬套冷挤压在距孔边大约一个孔径的范围内形成残余应力，最大残余应力出现在距孔边 1/6D 处。

②开缝衬套冷挤压后孔的切削量为 0.015D~0.020D 时表面形成的残余应力最大，材料的综合疲劳性能更佳。

由于中国超高强度钢冷挤压技术尚处在初始研究阶段的现状，其挤压强化机理、强化效果以及工艺参数的优化等还需要大量深入研究，论文通过对超高强度钢装配制孔冷挤压强化技术试验研究，建立了超高强度钢的冷挤压强化工艺应用参数规范，并将试验数据总结为型号工艺规范 XPS16018《超高强度钢孔的冷挤压》和工艺操作规程 XYD1225《A-100 钢制孔典型工艺规程》，形成自主的成熟超高强度钢装配制孔冷挤压强化技术体系，对后续新材料孔壁冷挤压强化试验提供借鉴。

参考文献

- [1] 李亚江. 高强钢的焊接 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [2] 范长刚, 董瀚, 雍岐龙, 等. 低合金超高强度钢的研究进展 [J]. 机械工程材料, 2006, 38(8): 1-4.
- [3] 高玉魁. 孔挤压强化对 23Co14Ni12Cr3MoE 钢疲劳性能的影响 [J]. 金属热处理, 2007, (11): 34-36.
- [4] 张洪双, 段晓飞. 孔挤压强化和工艺参数研究 [J]. 机械设计与制造, 2011, (11): 111-113.
- [5] 胡春东, 孟利, 董瀚. 超高强度钢的研究进展 [J]. 材料热处理学报, 2016, 37(11): 178-182.
- [6] 杨煜. 国内外冷挤压技术发展综述 [J]. 锻压机械, 2001(1): 3-5.