

# 钛合金防护头盔研究与应用现状

李磊<sup>1</sup>, 杨海瑛<sup>1</sup>, 关洪星<sup>2</sup>, 刘伟<sup>1</sup>

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 详细介绍了钛合金头盔的发展历程以及各种型号钛合金头盔的特点, 总结了近年来钛合金头盔的各类制备技术, 如冷拉伸成形法、不等重模锻成形法、3D 打印成形法等, 并对我国钛合金/芳纶纤维复合头盔的研究进展进行了介绍。最后, 指出钛合金/芳纶纤维复合头盔更符合单兵装备对头盔减重和防护性能升级的要求, 是现代化头盔的发展趋势之一。

**关键词:** 钛合金头盔; 复合头盔; 防护性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)02-038-04

## Research Progress and Application of Titanium Alloy Helmet

Li Lei<sup>1</sup>, Yang Haiying<sup>1</sup>, Guan Hongxing<sup>2</sup>, Liu Wei<sup>1</sup>

(1. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(2. Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** This paper introduces the development of titanium alloy helmets and the characteristics of various types of titanium alloy helmets. The preparation technologies of titanium alloy helmets in recent years are summarized, such as cold drawing molding, unequal weight die forging molding, 3D printing molding and so on. The research progress of titanium alloy/aramid fiber composite helmets in China is introduced. It is proposed that titanium alloy/aramid fiber composite helmets is the development trend of modern helmets that meet the requirements of individual equipment for helmet mass reduction and protection performance upgrading.

**Key words:** titanium alloy helmet; composite helmet; protection performance

防护头盔是单兵装备中非常重要的组成部分, 对作战人员头部的防护起到关键作用。中国安阳殷墟出土的正面铸有兽面纹的商朝铜盔, 被认为是我国迄今为止发现的最早的金属防护头盔<sup>[1]</sup>。进入铁器时代后, 头盔基本采用铁质材料制造。当枪炮等热兵器出现后, 普通铁质头盔已经不能满足防护需求。第一次世界大战时期, 法军首先使用奥氏体高锰钢制造头盔, 该头盔只有金属外壳和衬垫, 是现代头盔的雏形。第二次世界大战中, 美国研制出 M1 锰钢头盔, 其防护能力有较大提高<sup>[2]</sup>。但是, 随着武器的不断发展, 杀伤威力也在不断增大, 锰钢头

盔亦已不能满足防护需求。

20 世纪后半叶, 防护头盔出现了 2 种发展方向: 一种是使用芳纶纤维制造的头盔<sup>[3]</sup>, 其已在美国、德国、法国、日本、西班牙、加拿大、中国等国装备; 另一种是使用低密度、高强度钛合金材料制造的头盔, 这种头盔受到大量特战和特警单位的青睐, 比如德国 GSG-9 特种部队和俄罗斯阿尔法特种部队等。

本文主要介绍钛合金头盔的发展历程, 以及近年来我国钛合金防护头盔的研发情况, 总结钛合金头盔的发展趋势, 以期为我国钛合金防护头盔的研究与应用提供借鉴。

## 1 国外钛合金头盔的发展历程

早期的钛合金头盔生产厂家有瑞士的 Tig Bicord

收稿日期: 2022-02-07

基金项目: 陕西省国际科技合作计划项目(2020KW-040)

通信作者: 李磊(1983—), 男, 研究员。

AG公司、奥地利的Ulbrechts公司以及苏联的钢铁研究院(NII Stali)。

瑞士Tig Bicord AG公司于20世纪70年代设计和生产的PSH-77式头盔,除装备本国陆军和警察部队外,还大量出口。该头盔的盔壳为3 mm厚钛合金材料,采用热加工成形,质量约3.5 kg,可防护各种枪弹、炸弹和手榴弹杀伤破片对头部的伤害。PSH-77式头盔分为警用、通讯兵用及军用3类。PSH-77式警用头盔配有VS-K-77式面罩和颈部防护披风;通讯兵头盔配有VS-L-12式面罩;军用头盔分为全透明面罩头盔和金属面罩头盔2种,前者装备于德军的特种部队,称为北约版TIG头盔,后者主要在苏联等华约部队使用,称为华约版TIG头盔。

苏联在20世纪70年代从瑞士Tig Bicord AG公司订购重型钛合金防护头盔。之后,苏联钢铁科学研究院以PSH-77头盔为基础推出阿尔金(Altyn)头盔,该头盔使用4 mm厚钛材冲压而成,列装在阿尔法特种部队。20世纪80年代,苏联推出组合型STSh-81头盔,装备在阿富汗的苏军特种部队。STSh-81头盔质量为2.4 kg,由3片钛合金装甲板构成,能够包覆头的两侧、上方及后半部,抵御各种角度的攻击。20世纪90年代末期,NII Stali公司在阿尔金头盔的基础上研发出K6系列头盔,其中使用最为广泛、最负盛名的为K6-3头盔。K6系列头盔的盔体和阿尔金头盔基本一致,钛合金盔壳减薄至3 mm,并加装了芳纶纤维内衬,对边缘棱角采取了严格的密封处理,具有极佳的防护性能。K6-3头盔同时装备于俄罗斯内务部(MVD)和联邦安全局(FSB),使用率很高,可见于各种军事演习活动。应俄罗斯内务部的要求,在K6-3头盔的前脸部分添加了全覆盖面板,同时在内部安装通讯系统。这一改动使得K6-3头盔在外观上更像是电焊所使用的防护面罩,因此又称“电焊盔”,常用于反恐作战。该头盔可以达到俄罗斯内务部要求的最高防护等级——ГВИИ-П-5防护标准。

## 2 我国防护头盔的研发

20世纪70年代末期,我国研制出第一代军用头盔——GK80型防弹头盔。该头盔以232防弹钢为主要材料,质量1.10~1.25 kg,抗冲击能量大于392 J, V50值(抗1.1 g标准模拟破片)为366 m/s<sup>[4]</sup>。根据“976”工程的需要,我国于1993年开始研制以芳纶纤维为增强材料的高性能非金属防弹头盔,头盔质

量1.45 kg, V50值为610 m/s,能够防护54式手枪铅芯弹。1997年,我国采用高强度高模量芳纶纤维制造QGF02头盔,其V50值为630 m/s,有效防护面积达1266 cm<sup>2[5,6]</sup>。2004年,我国研制出QGF03头盔,其与QGF02头盔的防护性能相当,但整盔质量减少150 g。2011年,总后军需装备研究所研制出QGF11头盔,并得到广泛应用<sup>[7]</sup>。

虽然目前我国军警部队未列装钛合金头盔,但国内材料研发单位、防护用品生产单位已经开展大量的钛合金头盔研发工作,在头盔模具设计、外壳功能设计、成形工艺等方面申报了大量专利,见表1。

表1 中国钛合金头盔相关专利

Table 1 Chinese patents related titanium alloy helmet

序号	专利名称	专利申请号
1	钛合金头盔及聚乙烯纤维盔层制备模具	202022156715X
2	一种新型钛头盔	2016206698844
3	钛合金盔壳的制造方法	2020110353503
4	一种钛合金防弹防护头盔	2014200047592
5	一种冷成型钛合金防弹头盔的制备方法	2018106341597
6	一种高强度防弹头盔壳及其制备方法	2021106884241
7	一种透气型头盔外壳	2016214596448
8	一种内置流道的透气型头盔外壳	2018221465905
9	一种轻型防爆头盔	202022856851X
10	合金复合型防弹头盔	2020206193371
11	弹道保护头盔	2019800111058
12	贴覆有合金板的防弹头盔	2020215071585

西北有色金属研究院提出一种冷拉伸成形钛合金防弹头盔的制备方法<sup>[8]</sup>。钛合金防弹头盔属于深腔件,对材料的深冲性能、冷拉成形工艺以及盔壳成形精度的要求较高。研究团队以强度高且深冲性能良好的TB5和TB8钛合金板材为原料,首先涂覆抗氧化涂料,并通过固溶处理改善板材的加工性能;一模拉伸使用植物油进行润滑,成形时使用15 MPa液压固定边部,拉伸速率为20 mm/s,成形深度为110 mm;二模冷拉伸变形量大,使用石墨乳进行润滑,成形时使用20 MPa液压固定边部,拉伸速率为10 mm/s,成形深度为180 mm;最后对盔壳进行表面处理 and 时效处理,得到冷成形钛合金防弹头盔。该制备方法不仅简化了加工流程,而且降低了对加工模具的要求,使加工成本大大减少。此外,根据

头盔的不同用途,制备了厚度在 0.3 ~ 3.0 mm 的不同牌号的钛合金头盔。图 1 为二模成形后的 TB8 钛合金盔壳和头盔成品照片。

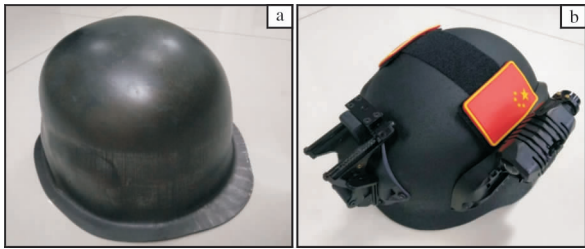


图 1 TB8 钛合金盔壳和头盔成品照片

Fig. 1 Photos of TB8 titanium alloy helmet shell (a) and helmet product (b)

沈阳中钛装备制造有限公司提出了一种钛合金盔壳制造方法<sup>[9]</sup>,其过程为:将钛合金板材进行一次模压获得具有壳顶的盔壳;二次模压获得具有壳身的盔壳;三次模压获得具有局部耳部轮廓的盔壳;四次模压获得具有完整耳部轮廓的盔壳。该公司还开发出以钛合金盔壳为外层,复合聚乙烯纤维层为内层的复合头盔,并制造出用于 2 种材料复合成形的专用模具<sup>[10]</sup>。

宝鸡欧亚化工设备制造厂设计的钛合金防弹头盔,其盔壳采用一体化钛合金结构,可有效减小头盔重量。同时,根据盔壳各部分的重要性及受攻击的概率,采用不等重模锻技术,对盔壳正面、顶面等重要部位作增厚处理,对盔壳侧面、背面等次要部位作减薄处理,综合提高了头盔的防弹防护能力<sup>[11]</sup>。

西安铂力特增材技术股份有限公司设计出一种透气型钛合金头盔,采用 3D 打印技术成形,头盔内置环面透气区,在不降低头盔安全性的基础上,提升了产品的舒适性<sup>[12]</sup>。陕西双扶钛业有限责任公司设计了一种适用于机车驾驶员佩戴的钛合金头盔,在盔体的外表面设有加强筋,以确保外层盔体的保护性能<sup>[13]</sup>。青岛格林沃德新材料科技有限公司以玻璃钢为外壳、钛合金防弹板为内防护层,制备出轻型防爆头盔<sup>[14]</sup>。河北森宝新材料科技有限公司等单位也提出了芳纶纤维与钛合金复合的头盔,盔壳外层为 TC4 等牌号的钛合金<sup>[15-17]</sup>。

国内多家企业长期关注钛合金头盔的研发,并已经完成多项欧盟国家警用钛合金头盔的外贸订单。目前,我国的头盔需求单位也逐渐关注到钛合金头盔的优点,加大了对钛合金头盔加工工艺、性能调

控等方面的研究投入,故钛合金头盔有望在未来得到应用。

### 3 钛合金头盔发展趋势

与钢盔相比,在同等防护性能下,钛合金头盔的重量更轻,耐蚀性更强,且使用寿命长,至今仍受到俄罗斯等国家特警部队的青睐。但由于钛合金头盔原材料和加工成本高,导致无法大量装备。另一方面,钛合金头盔质量往往超过 2 kg,长期佩戴会对颈椎造成伤害。此外,在战斗中金属头盔易产生子弹反弹、跳弹,容易造成二次伤害。

20 世纪 60 年代,低密度、高强度的芳纶纤维材料出现。之后,以芳纶纤维制备的头盔逐渐成为各国部队的主流装备。但是,在强紫外线照射下,芳纶纤维头盔的部分芳纶材料会发生降解;芳纶纤维的吸水能力较强,在潮湿环境中头盔的防弹性能会受到影响。因此,随着使用时间的延长,芳纶纤维头盔的防护效果逐渐减弱,保质期约为 8 年。此外,芳纶纤维头盔在受到子弹冲击时产生的变形远大于钛合金头盔,容易造成佩戴者出现颅脑损伤<sup>[18]</sup>。有限元模拟研究表明,9 mm 铅芯手枪弹以 343 m/s 侵彻芳纶纤维头盔,子弹 0°入射造成颅骨骨折的概率为 23.4%。

由此可见,钛合金头盔和芳纶纤维头盔都有各自的优缺点,而使用钛合金与芳纶纤维制造的复合型头盔可结合二者的优点,既能充分利用芳纶纤维轻质高强的特点,在不影响防护性能的前提下减轻头盔重量,还能利用钛合金高强度和优良抗变形能力的特点,减小头盔在受到子弹冲击时产生的变形。

俄罗斯 K6-3 头盔以及我国沈阳中钛装备制造有限公司等单位研制的复合型头盔,盔壳外层为钛合金,内层为高性能芳纶纤维。手枪弹侵彻试验过程中,子弹穿过外层钛合金,部分能量被吸收,内层芳纶纤维层在经历剪切断裂、拉伸破坏和成层破坏过程中,则吸收了子弹剩余能量。由于钛合金的吸能作用,该类复合型头盔的弹痕高度较芳纶纤维头盔得到了改善,但是对于大角度入射子弹仍存在跳弹风险。

西北有色金属研究院等多家单位联合开发了内层为多种厚度的钛合金盔壳,外层为高性能芳纶纤维层的复合型头盔。在手枪弹侵彻试验过程中,主要由外层芳纶纤维层承担防护作用,吸收子弹能量,

而子弹最终停留在盔体中, 可有效减少跳弹造成的二次伤害; 钛合金内层对盔体起到支撑作用, 能够有效减小弹击弹痕高度, 提高头盔保护能力, 降低颅骨骨折概率。但由于钛合金的支撑作用使芳纶纤维层的变形受限, 会导致分层破坏的吸能效果降低。因此, 钛合金作为内层材料时, 该类复合型防护头盔的 V50 值相对减小。

采用 54 手枪发射的 51 式 7.62 mm 铅芯弹弹侵彻钛合金/芳纶纤维复合板时, 当钛合金作为迎弹面, 弹痕高度平均值为 23.3 mm, V50 值为 768.6 m/s; 而当芳纶纤维作为迎弹面, 弹痕高度平均值降为 15.5 mm, V50 值降为 704.7 m/s。通过调节钛合金/芳纶纤维复合板中钛合金层与芳纶纤维层的厚度, 可以调整复合头盔的弹痕高度和 V50 值。

图 2 为西北有色金属研究院与国内多家防护装备单位合作研发的钛合金/芳纶纤维复合头盔。该复合头盔面密度为 7~8 kg/m<sup>2</sup>。使用 54 手枪发射的 51 式 7.62 mm 铅芯弹侵彻该头盔, 当弹丸速率为 445±10 m/s 时, 有效命中条件下头盔未穿透, 弹击弹痕高度小于 25 mm。



图 2 钛合金/芳纶纤维复合头盔照片

Fig. 2 Photos of titanium alloy/aramid fiber composite helmet

钛合金作为一种高比强度金属材料, 已广泛应用于防弹衣及装甲车、坦克等战车的防护装甲。钛合金/芳纶纤维复合头盔可将钛合金与芳纶纤维材料的优势结合, 不仅重量轻, 而且具有优异的防护性能, 符合单兵装备对头盔减重和防护性能升级的要求, 是现代化头盔的发展趋势之一, 有望在未来得到广泛应用。

## 4 结 语

防护头盔重量的减轻、防护能力的提升、使用功能的完善都要依赖于防护材料, 因此防护材料的优化升级是防弹装备研制领域的重点和根本。各种防护材料的防弹机理研究与防护材料的研究相互补

充, 可为头盔的设计和生產提供数据支持<sup>[19]</sup>。在过去的 50 年间, 钛合金头盔和钛合金/芳纶纤维复合头盔在多次军事战役和反恐行动中起到了重要作用。随着新型防护材料的升级, 防护头盔将呈现出高防护性、高集成性和高匹配性的发展趋势。

## 参考文献 References

- [1] 包元晖, 李象群, 周宏. 军用防护头盔的造型设计研究[J]. 中国个体防护装备, 2002(6): 16-22.
- [2] 王书勤, 吴鹤林. 外军头盔大观园[J]. 轻兵器, 2001(4): 26-29.
- [3] 李绍东, 张建春, 林子光. 芳纶防弹头盔的研制与试验[J]. 天津纺织工学院学报, 1999, 18(4): 57-61.
- [4] 赵宇. 中国军用头盔发展概说[J]. 轻兵器, 2002(7): 38-39.
- [5] 刘善晖. 中国 QGF02-军用防弹头盔[J]. 现代兵器, 1997(11): 2-4.
- [6] 杨廷欣, 凌天德, 刘善晖. 国产 QGF02 军用防弹头盔[J]. 兵器知识, 1998(3): 2-3.
- [7] 陈晓, 周宏. 我军军盔基于头型规律的分号理论与实践[J]. 中国个体防护装备, 2004(2): 17-22.
- [8] 西北有色金属研究院. 一种冷成型钛合金防弹头盔的制备方法: 201810634159.7[P]. 2018-11-13.
- [9] 沈阳中钛装备制造有限公司. 钛合金盔壳的制造方法: 202011035350.3[P]. 2021-01-29.
- [10] 沈阳中钛装备制造有限公司. 钛合金头盔及聚乙烯纤维盔层制备模具: 202022156715.X[P]. 2021-06-15.
- [11] 宝鸡欧亚化工设备制造厂. 一种钛合金防弹防护头盔: 201420004759.2[P]. 2014-11-26.
- [12] 西安铂力特增材技术股份有限公司. 一种透气型头盔外壳: 201811591150.9[P]. 2019-05-17.
- [13] 陕西双扶钛业有限责任公司. 一种新型钛头盔: 2016206698844[P]. 2016-12-14.
- [14] 青岛格林沃德新材料科技有限公司. 一种轻型防爆头盔: 202022856851.X[P]. 2021-07-06.
- [15] 河北森宝新材料科技有限公司. 合金复合型防弹头盔: 202020619337.1[P]. 2021-01-19.
- [16] 乌尔布里希特有限责任公司. 弹道保护头盔: 中国, 202110434507.8[P]. 2021-10-22.
- [17] 星河星通科技有限公司. 贴覆有合金板的防弹头盔: 202021507158.5[P]. 2021-05-07.
- [18] 蔡志华, 包正, 王威, 等. 枪弹冲击防弹头盔致头部非贯穿性损伤的数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(6): 1097-1105.
- [19] 孙幸福. 防弹头盔研制技术及发展前景[J]. 中国个体防护装备, 2009(1): 14-38.