

文章编号: 1007-4627(2016)03-0291-06

ILC 正电子源靶接触热传导冷却技术的初步研究

张校铭^{1,2}, 张子民¹, 宗阳¹, 曹树春¹, 申晓康¹, 李中平¹, 刘铭¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 国际直线对撞机 (ILC) 正电子靶沉积的热功率将超过 20 kW, 传统的冷却方式已无法满足要求。美国 Argonne 国家实验室提出了摩擦接触热传导冷却的方法。根据 Argonne 实验室的研究方案, 设计了一种旋转摩擦接触冷却的简化装置, 根据热传导理论, 结合 ANSYS 软件模拟了旋转冷却过程中的温度分布, 理论上验证了方法的可行性。按照模拟的参数和结果, 进行了摩擦接触热传导冷却实验, 通过实验结果和数据分析证实了, 低温区 (20 °C~50 °C) 有良好的冷却效应, 初步验证了摩擦接触热传导冷却方案的有效性。

关键词: ILC 正电子源; 热传导; 旋转靶; 摩擦冷却

中图分类号: TL11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.03.291

1 引言

高能物理界提出了国际直线对撞机 (International Linear Collider, ILC) 的建设构想, 对撞能量将达到 3 TeV。ILC 的关键技术预言已经启动, 正电子源就是预言的关键部件之一。正电子产生的方式有很多, 一般情况下的正电子源有三种: 常规的正电子源, 基于波荡器的正电子源, 基于康普顿散射的正电子源^[1]。在 ILC 正电子源设计方案中, 采用的是基于波荡器的正电子源, 即用 100~250 GeV 高能电子束通过 150 m 的波荡器后产生 10.1 MeV 的伽马光子束, 这些高能的光子束入射到高速旋转的钛合金靶上便产生正电子。在光子束打靶的过程中, 将会有 23 kW 左右的热功率沉积到旋转靶上^[2], 从而导致旋转靶的温度上升, 甚至引起靶的形变, 最终旋转靶难于达到两年的寿命期限^[3]。

关于 ILC 正电子源靶的设计, 美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室 (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL) 和斯坦福直线加速器中心 (Stanford Linear Accelerator Center, SLAC) 实验室提出了旋转靶的设计方案, 即把高速旋转 (2000 r/min) 的钛合金靶置于真空中, 并在旋转靶中构建冷却水通道来冷却靶, 这已成为 ILC 正电子源旋转靶的主流设计方案^[4]。虽然这种方案让旋转靶内真空 (10^{-8} Torr, 1 Torr = 133.322 Pa) 的要求得到满足, 但这种磁流体密

封很难保证靶内真空的可靠性。由此许多研究机构围绕真空密封做出了很多研究, 在保留靶内冷却水槽的前提下, 提出使用差分真空方法来替代磁流体密封部件, 虽然这种方法可以消除真空密封的障碍, 但仍然解决不了靶内冷却水的离心力对轴承带来的机械负载问题, 对此, 德国 DESY 实验室就轴承对旋转靶的支撑进行了相关模拟, 并证实其轴承很难支撑布满冷却水通道的旋转靶^[5]。

目前, ILC 关键技术的预言工作正处于紧张的筹备阶段中, 而正电子源旋转靶冷却系统的设计方案尚未确定。2014 年, 美国 Argonne 国家实验室提出了独立旋转靶系统的设想, 即把旋转靶、冷却水通道及真空密封部件进行分离, 让靶系统置于差分泵构建的真空环境, 并通过摩擦接触热传导的方式冷却旋转靶, 这种设计可以成功地解决真空密封以及冷却水所带来的机械负载的问题^[6-7]。用摩擦接触热传导方式来冷却 ILC 正电子源旋转靶, 这是一个非常新颖的想法。但同时面临着无法预知的困难与挑战, 如冷却效率的提高以及摩擦材料的选取等, 这些都需要不断的探索。为了解决 ILC 正电子源靶冷却的问题, 将选用三种不同功率的热源, 通过对旋转靶施加高 (10^5 W)、中 (10^3 W)、低 (10^2 W) 不同功率热源, 来验证用摩擦接触热传导方法来冷却旋转靶的可行性。本文给出摩擦接触热传导冷却的简化装置, 对小尺寸的旋转靶施加了低功率 (10^2 W) 的热源,

收稿日期: 2015-12-11; 修改日期: 2016-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11435051)

作者简介: 张校铭 (1988-), 男 (土家族), 湖南湘西人, 硕士研究生, 从事核技术及应用研究; E-mail: zhangxiaoming@impcas.ac.cn

通信作者: 张子民, E-mail: zzm@impcas.ac.cn

并结合理论模拟和初步实验，对摩擦接触热传导方法冷却旋转靶进行了初步研究，验证了这种方案可以带走小尺寸转靶上的热量，证实了这种方案的可行性。

2 热传导冷却系统的设计

摩擦接触热传导冷却系统主要由驱动电机、联轴器、轴承、旋转靶、冷却系统、机座等部件组成。图 1 给出了摩擦接触热传导冷却系统的总体结构。图 2 给出了摩擦接触热传导的原理示意图。其中散热垫片的一端与旋转靶滑动接触，另一端与冷却水进行对流换热接触，从而实现接触热传导的功能。这种方案不仅消除了旋转靶中冷却水通道复杂的设计问题，而且也解决了冷却水的离心力对轴承带来的机械负载问题。

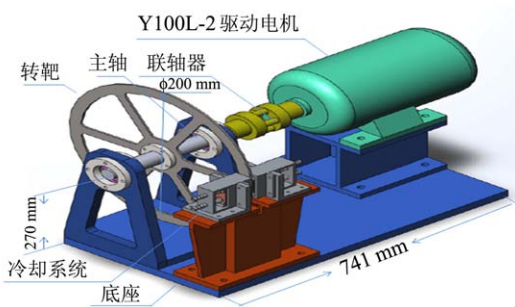


图 1 (在线彩图) 热传导冷却系统的总体结构图

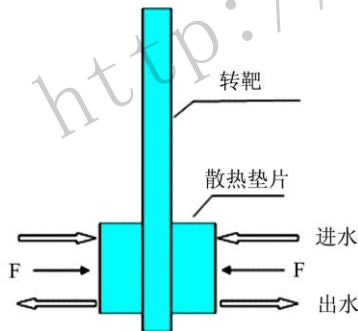


图 2 (在线彩图) 摩擦接触热传导的原理示意图

在具体的简化装置中，不锈钢的导热系数为 16.2 W/m·k，钛合金的导热系数为 15.24 W/m·k，不锈钢与钛合金的热导率比较接近，IG-45 型号的石墨具有导热系数高、摩擦系数低、耐磨系数高的特性，因此分别采用半径为 20 cm 的不锈钢以及 20 mm×50 mm×8 mm 尺寸的 IG-45 石墨作为旋转靶、散热垫片。在整个过程中，散热垫片与旋转靶滑动接触，会产生额外的热量，散热垫片不仅要带走沉积在旋转靶的热量，而且还要带走额外的摩擦热量，因此必须保证散热垫片有足够的冷却能力。

3 热传导的模拟

在分析热传导冷却问题时，就必须了解各个部件的温度分布。根据实际情况，散热垫片固定不动，旋转靶高速旋转 (2000 r/min)，在转动的过程中，散热垫片与旋转靶间会产生摩擦热源。其中摩擦热源的功率为

$$p_f = u \times F_N \times 2\pi \times n \times r, \quad (1)$$

式中的 p_f 为散热垫片摩擦热源的功率； u 表示散热垫片的摩擦因子； F_N 表示为散热垫片与旋转靶间的弹簧压力； n 表示旋转靶的旋转频率； r 表示旋转靶的半径。在实际的简化装置中，仅仅 20 N 的弹簧压力就能保证散热垫片与旋转靶间充分接触，其中旋转靶的半径 r 为 20 cm，并在散热垫片与旋转靶面接触的一端涂上 MoS_2 ，让散热垫片的滑动摩擦因子从 0.2 减低至 0.03。在 20 N 的弹簧压力情况下，结合公式(1)，散热垫片与旋转靶间的摩擦热源功率不足 2 W，所以在正常的摩擦情况下，摩擦产生几瓦的热源功率与外部给定几百瓦的热源功率相比，传递给旋转靶的摩擦热源功率可以忽略不计。为了提高计算效率，在计算的过程中对散热垫片模型以及接触过程进行了进一步的简化处理，结合实际模型，做出了以下假设：

- (1) 所有的材料都为各向同性材料，在温度低于 100 °C 时，模型中固体材料的热物性随温度的变化不明显，可认为材料的热物参数不变；
- (2) 在实际的热传导过程中，辐照热源功率远远大于摩擦热源功率，因此可以忽略摩擦热源的影响；
- (3) 在整个热传导的过程中，忽略热辐射传递和各个部件的接触热阻。

在构建实物模型中，其中转靶的材料为不锈钢，散热垫片的材料为石墨，水的流速为 1 m/s，冷却水初始的温度为 17 °C。计算所需要的参数见表 1。

表 1 冷却系统的热物参数 (20 °C)

特性参数	转靶 (不锈钢)	石墨	铜块	冷却水
导热率 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	16.2	129	397	0.599
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7800	2000	8000	998.2
比热容 $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	500	710	210	4200

由于旋转靶高速 (2000 r/min) 旋转，可以认为散热垫片在旋转靶的圆周上均匀分布，从而简化实际模型，图 3(a) 表示简化的实体模型图。由于实体模型是轴对称模型，所以沿旋转靶的径向方向上取一个截面作为分析的目标，并采用 PLANE55 作为热单元，图 3(b) 表示模型的网格划分示意图。

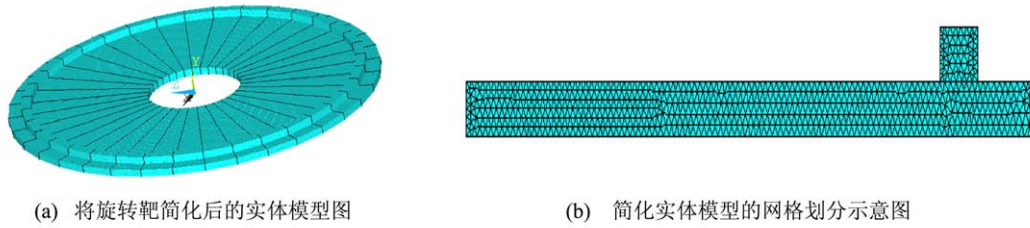


图 3 (在线彩图) 对旋转靶的简化模型及模拟过程中的网格划分

根据上述的计算模型、表格数据和实际的边界条件,给旋转靶表面分别施加 300 W 与 450 W 的加热功率,并对模拟仿真得到的温度场进行分析。图 4 中的 (a)、(b) 分别表示在热源为 300 W 时,热平衡后,非冷却与冷却旋转靶系统的温度分布云图。(c)、(d) 分别表示在热源为 450 W 时,热平衡后,非冷却与冷却旋

转靶系统的温度分布云图。从 (a) 与 (b) 对比可以看出,当热源为 300 W 时,冷却前后的温差为 8 °C。从 (c) 与 (d) 对比可以看出,当热源为 450 W 时,冷却前后的温差为 12 °C。通过非冷却与冷却旋转靶系统温度分布的对比,证实了该简化装置具备一定的冷却能力,可以实现用摩擦接触热传导方法对旋转靶进行冷却。

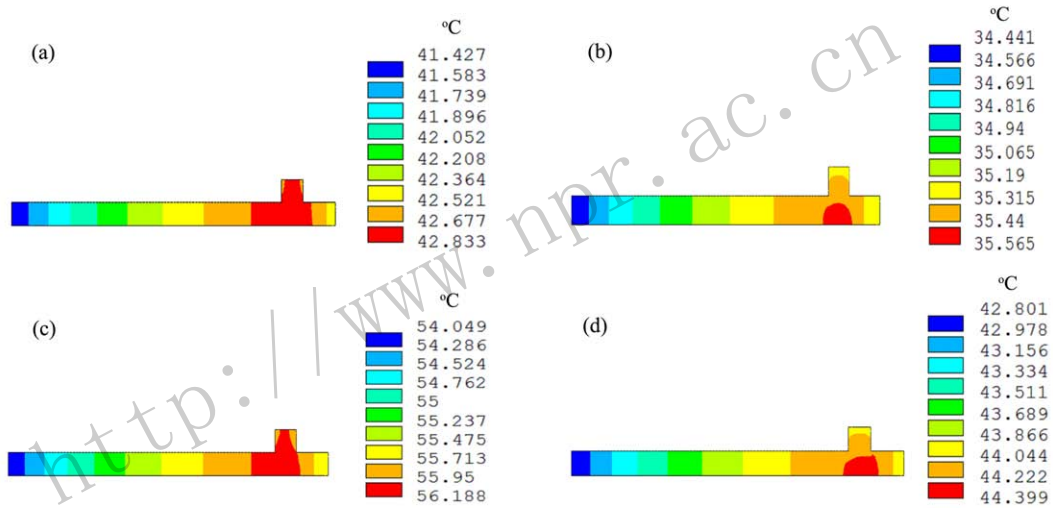


图 4 (在线彩图) 施加不同功率热源情况下,冷却前与冷却后的旋转靶温度分布云图

(a) 和 (b) 分别表示施加 300 W 热源情况下,冷却前后旋转靶温度分布云图; (c) 和 (d) 分别表示施加 450 W 热源情况下,冷却前后旋转靶温度分布云图。

4 实验测量

4.1 实验方法

摩擦接触热传导冷却的实验装置包括驱动电机、联轴器、轴承、旋转靶、冷却系统、机座等部件,旋转靶的转速通过变频器驱动步进电机来进行调节控制,散热垫片与旋转靶间的滑动接触,通过接触热传导的方式来带走旋转靶上的热量。在实验过程中,采用两种方法对旋转靶进行加热。第一种方法通过热风枪给旋转靶施加不同功率的热源,即分别施加 1.6 kW 与 700 W 的热源于旋转靶上,并用红外线温度测量仪时时监控旋转靶温度的变化,热平衡后,两种功率热源导致旋转靶的温度相差不大。热风枪是通过热风对流的方式对旋转靶加

热,在加热的过程中,大部分的热量通过对流散失在空气之中,实际用于加热旋转靶的热量只是热风枪功率的很小一部分,因此,对流热源不能作为本实验的理想热源。第二种方法采用摩擦热源,即通过散热垫片与旋转靶间的摩擦力作为热源。在具体的实验过程中,通过调节压力弹簧来改变石墨与旋转靶间的压力,或者通过调节变频器来改变旋转靶的转速,从而调节摩擦热源的大小。由于旋转靶的两端都与散热垫片接触,因而会产生两部分摩擦热源。对于本实验来说,其中一个摩擦热源是用来给旋转靶加热,称为加热热源,另外一个摩擦热源用来冷却旋转靶,称为冷却热源。为了减少冷却热源对加热热源的影响,在保证冷却热源垫片与旋转靶面充分接触的基础上,尽量减少冷却热源一端的弹簧压力,

并在冷却热源与旋转靶的接触面上涂 MoS₂, 使滑动摩擦因子从 0.2 降低至 0.03, 从而减小冷却热源对加热热源的影响。

在散热垫片与旋转靶面相对滑动的过程中, 会产生摩擦热源, 其中一部分流向了转靶, 另外一部分流向了散热垫片。其中散热垫片与旋转靶的摩擦热源的分配系数^[7-8]为

$$F_w = \frac{q_z}{q_z + q_s} = \frac{\gamma}{1 + \gamma} \quad (2)$$

式中: $\gamma = (\lambda_z c_z \rho_z / \lambda_s c_s \rho_s)^{\frac{1}{2}}$, 下标 z, s 表示旋转靶、散热垫片。将表 1 的数据带入式(2), 得 $F_w = 0.92$, 即摩擦产生的热量有 92% 流入到旋转靶中。可以认为几乎所有摩擦产生的热量流入到旋转靶中。旋转靶的转速为 2000 r/min, 在实际热源加载的过程中, 加热热源的一端给予 35 N 的弹簧压力, 冷却热源一端给予 20 N 的弹簧压力, 其中加热热源一端的摩擦因子为 0.2, 冷却热源一端的摩擦因子为 0.03, 故加热热源的功率为 300 W, 而冷却热源的功率为 1.33 W, 所以相对于加热热源功率来说, 冷却热源产生的热源功率可以忽略不计。若加热热源一端施加 52 N 的弹簧压力, 即热源的功率为 450 W。

在具体实验过程中, 实验测量方法如下图测量框图所示: 图 5(a) 表示, 首先给旋转靶面加载一个摩擦热源, 在没有冷却系统的情况下, 用红外线温度测量仪来测量旋转靶的温度分布。图 5(b) 表示, 在给定旋转靶面相同的摩擦热源情况下, 采用热传导冷却系统进行冷却, 并测定旋转靶的温度的分布。根据图 5(a) 和图 5(b) 测量的温度结果来进行比较, 来验证摩擦接触热传导的冷却方式是否起到冷却的作用。

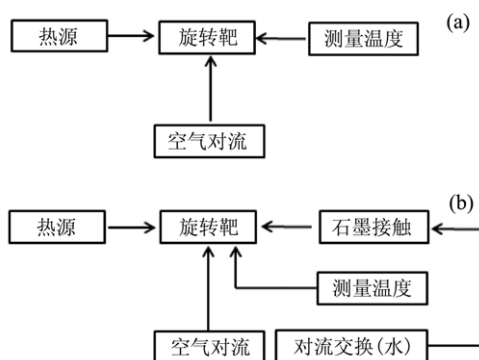


图 5 实验测量方法

4.2 实验数据分析

通过调节散热垫片与旋转靶间的压力, 分别施加 300 W、450 W 的摩擦热源至旋转靶上, 其中冷却水

的流速为 1 m/s, 并每隔两分钟对旋转靶的温度记 1 次数, 从图 6(a)、(b) 可以看出, 在 80 min 后, 旋转靶系统达到热平衡状态, 当热源为 300 W 时, 冷却与非冷却后旋转靶的温度相差 8 °C, 当热源为 450 W 时, 冷却与非冷却后旋转靶的温度相差 15 °C。通过本实验可以说明: 简化的摩擦接触冷却模型装置不仅能带走摩擦产生的热量, 也可以带走额外施加到装置上的热量, 基于这种摩擦接触热传导方法冷却的简化装置, 在它冷却能力范围内, 该简化装置能够起到冷却旋转靶的作用, 也充分地验证了摩擦接触热传导方法冷却低功率热源的可行性和有效性。

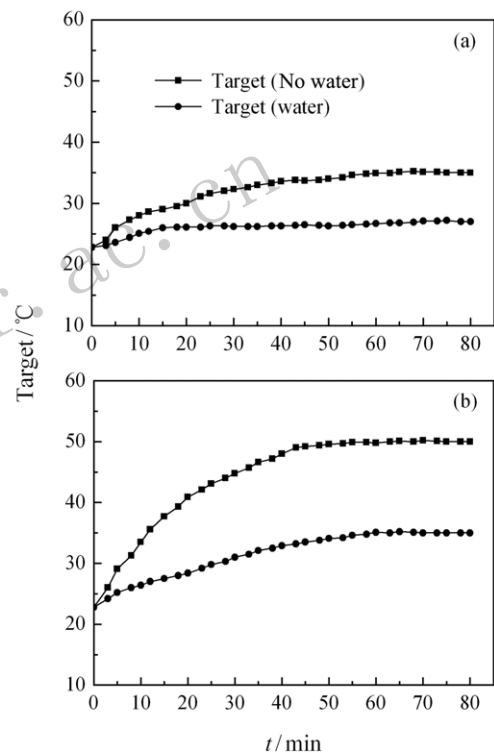


图 6 采用不同功率热源对旋转靶进行加热后的冷却与非冷却情况下旋转靶温度随加热时间的变化
热源为 300 W 时, 冷却与非冷却情况下旋转靶温度随加热时间的变化; (b) 热源为 450 W 时, 冷却与非冷却情况下旋转靶温度随加热时间的变化。

5 结论及展望

用摩擦接触热传导方式来冷却正电子源旋转靶, 将来很有可能运用于 ILC 正电子源旋转靶上。本文主要对摩擦接触热传导的冷却技术进行了初步研究, 首先给出了摩擦接触热传导方式冷却的总体设计, 通过理论分析和软件模拟说明了这种冷却设计的可行性。通过本实验, 可以得出, 这种规格的简化装置能够起到冷却低功率旋转靶的作用, 充分地说明了摩擦接触热传导方法冷

却低功率热源的可行性。

本实验采用的是摩擦热源,但是摩擦热源存在一定的不稳定性,在长期的摩擦过程中,散热垫片会存在摩擦受损以及摩擦因子改变等问题,因此选择一个合适的热源成为了实验的关键,在后续的实验过程中,将采用电磁感应加热作为一种新的热源,通过涡流来加热旋转靶,并开展下一步的实验。

本文论述的仅仅是对摩擦接触热传导冷却技术的初步设计、计算和实验,还有很多地方有待完善。本文尝试了用摩擦接触热传导来带走了低功率(10^2 W)热源,由于简化装置的尺寸和热源大小的限制,这种方法所带走的热源离 ILC 高功率热源(23 kW)还有一段距离,在以后的设计过程中,将准备做一个等比例尺度的 ILC 旋转靶系统的样机,采用四对摩擦接触散热垫片,把整个样机系统置于真空环境中,并用中国科学院近代物理研究所电子加速器的电子束作为热源^[9-10],来替代伽玛光子束热源,让设计的整个样机系统处于与 ILC 正电子靶系统极其类似的环境下,从而进一步开展更全面的实验研究。

致谢 感谢美国 Argonne 国家实验室 W.Gai (盖炜) 教授和中国科学院上海应用物理研究所王莉研究员在结构设计和理论模拟工作中的帮助。

参考文献:

- [1] ZHAO Jikiu, YING Zhaosheng. Particle Accelerator Technology[M]. Beijing, Higher Education press, 2006, 482. (in Chinese) (赵籍九, 尹兆升. 粒子加速器技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006, 482.)
- [2] BHARADWAJ V, PITTHAN R, SHEPPARED J, *et al.* Heat Deposition in Positron Sources for ILC[C]//HORAK C. ed. Proceedings of the Particle Accelerator Conference. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2005: 2574.
- [3] GAI Wei, LIU Wanming. Conceptual Design of an Electromagnetic Driven Undulator based Positron Target System for ILC [C]// JAcow ed. Proceedings of the 5th international Particle Accelerator Conference. European community: Inspire, Inc, 2014: 3908.
- [4] BAILEY I R, JENNER L J, NELSON C J, *et al.* A Prototype Target Wheel for the ILC Positron Source[C]//Proceedings of the European Physical Society Accelerator Conference. European community: inspire, Inc, 2008: 706.
- [5] BHARADWAJ V, PITTHAN R, SHEPPARED J, *et al.* Design Issues for ILC the Positron Source[C]//HORAK C. ed. Proceedings of the Particle Accelerator Conference. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2005: 3230-3232.
- [6] GAI Wei, DORAN D S, ERCK R, *et al.* A new Positron Source Target System Using Sliding Contact Cooling[C]//HENERSON S ed. Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference. USA: Inspire, Inc, 2015: 21968.
- [7] TAO Wenquan. Heat Transfer[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006: 28. (in Chinese) (陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 28.)
- [8] INCROPERA F P, DEWITT D P, BERGMAN T L. Fundamentals of Heat and mass Transfer[M]. Beijing: Chemical Industry Publishing Institute, 2012: 61.
- [9] CAO Shuchun, ZHANG Zimin, LI Zhongping. Nuclear Technology, 2009, **32**(3): 206. (in Chinese) (曹树春, 张子民, 李中平. 核技术, 2009, **32**(3): 206.)
- [10] SU Yalong, CAO Shuchun, ZHANG Zimin. Nuclear Physics Review, 2009, **26**(3): 210. (in Chinese) (苏雅龙, 曹树春, 张子民. 原子核物理评论, 2009, **26**(3): 210).

Preliminary Research of Sliding Contact Cooling Method for ILC Positron Source Target

ZHANG Xiaoming^{1,2}, ZHANG Ziming¹, ZONG Yang¹, CAO Shuchun¹,
SHEN Xiaokang¹, LI Zhongping¹, LIU Ming¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A new scheme that cooling international Linear Collider (ILC) positron source target by touching thermal conduction (TTC) is presented by Argonne National Laboratory (ANL). Recent results of simulation for cooling the iron targets with 300 and 450 W heat reservoir by ANSYS and experiment of cooling the iron target with 300 and 450 W friction heat reservoir at Institute of Modern Physics (IMP), Chinese Academy of Sciences (CAS), have proved that the TTC has good cooling effect in low temperature zone (20 °C ~ 50 °C), and preliminarily verified the feasibility of TTC for cooling the ILC positron source target.

Key words: ILC positron source; heat conduction; rotating target; frictional conduction

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 11 Dec. 2015; **Revised date:** 23 Feb. 2016

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11435051)

Corresponding author: ZHANG Ziming, E-mail: zzm@impcas.ac.cn.